

ISSN 2413-9203

# ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

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

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

**ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

Труды 4-й Международной научной конференции

«Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» (МТСТ'16)

**TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY**

Proceedings of the 4th International Scientific Conference

"Maglev transport systems and technologies" (MTST'16)

Выпуск 3 (5), 2016

Issue 3 (5), 2016

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. Ditrhhs

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

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

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

**Свидетельство о регистрации средства массовой информации**

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

**Mass media registration certificate number**

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

Журнал имеет институт рецензирования

The Journal has the Peer-review division

Журнал распространяется через Интернет без ограничений

и по адресно-целевой подписке через редакцию

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

**Минимальные системные требования**

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ  
INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

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

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

**Колесников Владимир Иванович**, Академик Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, С.-Петербург, Россия  
**Vladimir Kolesnikov**, Academician of the Russian Academy of Sciences, doctor of technical sciences, professor, St. Petersburg, Russia

**Ганиев Ривнер Фазылович**, Академик Российской академии наук, директор Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия  
**Rivner Ganiev**, Academician of the Russian Academy of Sciences, director of the Institute of Mechanical Engineering. Blagonravov Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Глухих Василий Андреевич**, Академик Российской академии наук, научный руководитель НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, доктор технических наук, профессор, председатель Совета  
**Vasily Gluhih**, Academician of the Russian Academy of Sciences, scientific adviser NIIÉFA name D.V. Efremov, doctor of technical sciences, professor, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

**РЕДКОЛЛЕГИЯ  
EDITORIAL TEAM**

**Антонов Юрий Федорович**, доктор технических наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель редколлегии  
**Yuri Antonov**, Dr. Sc., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial team

**Галкин Александр Геннадьевич**, Ректор Уральского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор, Екатеринбург, Россия  
**Alexander Galkin**, Rector of the Ural State State Transport University, Dr. Sc., Professor, Ekaterinburg, Russia

**Верескун Владимир Дмитриевич**, Ректор Ростовского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор, Ростов-на-Дону, Россия  
**Vladimir Vereskun**, Rector of Rostov State Transport University, Dr. Sc., Professor, Rostov-on-Don, Russia

**Паньчев Александр Юрьевич**, Ректор Петербургского государственного университета путей сообщения, кандидат экономических наук, доцент, Санкт-Петербург, Россия  
**Alexander Panychev**, Rector of Petersburg State Transport University, Ph.D., Associate Professor, St. Petersburg, Russia

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДЛАГАЕМЫМ  
ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «БЮЛЛЕТЕНЬ РЕЗУЛЬТАТОВ  
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ» ONLINE-ЖУРНАЛ

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

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

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

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

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

**Файл 4** – информация об авторах:

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

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

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

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

**Файл 8** – лицензионный договор.

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

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

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

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

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

**Библиографический список** приводится в конце статьи и составляется в порядке упоминания в тексте рукописи.

Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках.

**Рисунки, графики и таблицы** должны иметь номер и заголовок (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 подрисуночной 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 (большее не имеет смысла, меньшее 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>Лапидус Б. М.</b>	О создании вакуумно-левитационной транспортной системы	5
<b>Фомин В. М., Звегинцев В. И., Наливайченко Д. Г., Терентьев Ю. А.</b>	Вакуумный магнитолевитационный транспорт: поиск оптимальных рабочих параметров	18
<b>Котова Е. А.</b>	Направления инновационного развития железнодорожного транспорта	36
<b>Грошев Г. М., Сугоровский А. В., Сугоровский Ан. В.</b>	Эффективность использования диспетчерского приёма «изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке»	47
<b>Волкова Е. М.</b>	Выбор модели развития пригородного транспортного комплекса с учетом мирового опыта функционирования региональных пассажирских перевозок	57

### Раздел 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

<b>Гулин С. А., Никитин В. В., Серёда Г. Е., Серёда Е. Г.</b>	Системы электроснабжения собственных нужд высокоскоростных магнитолевитационных экипажей с линейным синхронным тяговым приводом	70
<b>Люминарская Е. С.</b>	Определение переходного сопротивления слаботочных электрических контактов в условиях запыленности контактных поверхностей	84
<b>Вавилов В. Е.</b>	Математическая модель гибридных систем магнитной левитации энерговырабатывающего оборудования автономных систем электроснабжения	97
<b>Соловьев Л. Ю.</b>	Модель деформирования бетона на основе теории течения при исследовании долговечности бетонных и железобетонных конструкций мостов	109
<b>Федюкин В. К.</b>	Невозможность сверхпроводимости электрического тока	119
<b>Воеводский К. Э., Стрепетов В. М.</b>	Метод условной границы	133

### Раздел 3. БЕЗОПАСНОСТЬ

<b>Шматченко В. В., Плеханов П. А.</b>	Современная нормативная база обеспечения безопасности магнитолевитационного транспорта	145
--	--	-----

## CONTENTS

### Section 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

<b>Lapidus B. M.</b>	On the establishment of vacuum-levitation transport system	5
<b>Fomin V. M., Zvegintsev V. I., Nalivaichenko D. J., Terent'ev Y. A.</b>	Vacuum magnetic levitation transport: definition of optimal characteristics	18
<b>Kotova E. A.</b>	Directions of innovative development of railway transport	36
<b>Groshev M. G., Sugorovsky A. V., Sugorovsky An. V.</b>	The efficiency of the control method of "changing the points of crossing or overtaking of freight trains on the railway section"	47
<b>Volkova E. M.</b>	Choice of regional passenger transportation development model based on world-wide survey	57

### Section 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENT

<b>Gulin S. A., Nikitin V. V., Sereda E. G, Sereda G. E.</b>	Auxiliary power supply systems for high speed maglev vehicles with linear synchronous traction motors	70
<b>Lyuminarskaja E. S.</b>	Determination of transient resistance low-current electric contacts in dusty conditions the contact surfaces	84
<b>Vavilov V. E.</b>	Mathematical model of the hybrid system of magnetic levitation energy production equipment autonomous power supply systems	97
<b>Solovyov L. Yu.</b>	Model of deformation of concrete based on flow plasticity theory for analysis of durability of plain concrete and reinforced concrete bridge constructions	109
<b>Fedyukin V. K.</b>	Impossibility of superconductivity electric flow	119
<b>Voevodskii K. E., Strepetov V. M.</b>	The method of conditional boundary	133

### Section 3. SAFETY

<b>Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A.</b>	Modern regulations of safety assurance for maglev transportation	145
---	--	-----

## Раздел 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

УДК: 656.2.027.3

**Б. М. Лapidус**

Объединенный ученый совет ОАО «РЖД»

Международный совет по железнодорожным исследованиям (IRRB)

Международный Союз железных дорог (UIC)

### О СОЗДАНИИ ВАКУУМНО-ЛЕВИТАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Дата поступления 19.04.2016

Решение о публикации 29.04.2016

Дата публикации 30.09.2016

**Аннотация:** Начало двадцать первого века характеризуется усилением глобальных приоритетов в развитии транспортной системы. Переход к ресурсоэффективной экономике с минимальным воздействием на экологию и климат требует развития инновационных технологий на транспорте. Помимо инноваций драйвером развития технологий на железнодорожном транспорте является растущая конкурентоспособность альтернативных видов транспорта (авиационный, автотранспорт).

Современные оценки скоростных параметров транспортной системы основаны на контактных парах «колесо – рельс» и «токоприемник – контактный провод», которые определяют предел скорости на уровне 350–360 км/час. Для построения эффективных высокоскоростных транспортных средств обоснован бесконтактный способ передачи энергии от инфраструктуры к подвижному составу – магнитно-левитационный. Однако из-за сохранения высокого уровня сопротивления окружающей воздушной среды подвижного состава реализуемая скорость ограничена 450–500 км/час.

Проект транспортной системы, основанный на использовании искусственно созданной вакуумной среды для движения транспортного средства по принципу магнитной или аэролевитации, базируется на «подрывных» для традиционных видов транспорта технологиях. Физическая основа проекта – многократное снижение сопротивления воздушной среды движущемуся транспортному средству, определяет многократный энергетический эффект.

Алгоритм подготовки концепции проекта создания высокоскоростной системы с использованием вакуумно-левитационного поезда представляет собой систему организационно-выстроенных шагов по формированию фундаментальной научной основы для создания высокоскоростного сообщения до 1000 и более км/час на новых принципах.

Особое значение для России и мирового сообщества может иметь разработка принципиально нового вида транспорта – вакуумно-левитационной «контейнерной системы», которая по принципу непрерывного скоростного конвейера смогла бы обеспечить многократный рост конкурентоспособности российской транспортной системы в глобальном товарообмене между странами Европы и Азии.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, конкуренция на рынке транспортных услуг, безопасность, доступность, качество перевозок, скорость, себестоимость перевозок, «подрывные» технологии, прорывные технологии, магнитная левитация, вакуумная среда, скоростные ограничения, вакуумно-левитационный поезд, аэродинамическое сопротивление движению, Объединенный ученый совет, экспертные группы ученых, сверхвысокие скорости, вакуумно-левитационная транспортная система, трансформация железнодорожной системы, вакуумно-левитационная контейнерная система.

## **Boris M. Lapidus**

Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways"

The International Council on Railway Research (IRRB)

International Union of Railways (UIC)

### **ON THE ESTABLISHMENT OF VACUUM-LEVITATION TRANSPORT SYSTEM**

**Abstract:** The beginning of the twenty-first century is characterized by strengthening of global priorities in the transport system development. The transition to a resource efficient economy requires the development of innovative technologies in transport. Besides innovations the driver of the development of technologies in railway transport is the growing competitiveness of alternative transport modes (aviation, road transport).

Modern estimates of high-speed parameters of transport system are based on the contact pairs «wheel – rail» and «collecting pantograph – contact wire», which predetermine the speed limit at the level of 350–360 km/h. In the paper, the contactless of energy transmission from infrastructure to rolling stock (magnetic levitation method) is substantiated for creation of efficient high-speed transport means. However, due to a high level of environmental air resistance of rolling stock, the speed is limited to 450–500 km/h.

The transport system project, which based on using artificially created vacuum environment for the movement of transport mean by the principle of a magnetic or aero levitation, bases on "disruptive" technologies for traditional transport modes. The physical basis of the project is a multiple reduction of air resistance to the moving transport mean. It predetermines the multiple energy effect.

An algorithm for preparation of the project concept for a high-speed system using vacuum-levitation train system of the organizational represents a sequence of steps. Its goal is to create fundamental scientific principles for development of a high-speed service of up to and over 1000 km/h.

The development of a fundamentally new transport mode – vacuum-levitation «container system» can have a particular importance for Russia and the world community. It could provide a multiple growth of Russian transport system competitiveness in the global goods exchange between Europe and Asia.

**Keywords:** railway transport, competition in the market of transport services, safety, availability, transportation quality, speed, transportation costs, "disruptive" technologies, breakthrough technologies, magnetic levitation, vacuum environment, speed limits, vacuum-levitation train, aerodynamic resistance to movement, Joint Scientific Council, expert groups of scientists, ultrahigh speeds, vacuum-levitation transport system, transformation of railway system, vacuum-levitation container system.

## **Введение**

Визитной карточкой любой страны являются отрасли экономики, без которых она существовать не может. Очевидно, что с учетом географических и экономических особенностей нашей страны, в России такую роль выполняют железные дороги.

Начало двадцать первого века характеризуется усилением глобальных приоритетов в развитии транспортной системы [1, 2].

Стремление стран найти способы уменьшения зависимости роста экономики от использования ресурсов и энергии, а также достигнуть перехода к ресурсоэффективной, растущей экономике с минимальным использованием углерода, избегая тем самым загрязнения окружающей среды и транспортных заторов, требует значительных усовершенствований и систематических и радикальных изменений в сфере технологий, обеспечивающих «масштабное обезуглероживание» [3].

Развитие современного транспорта зависит от наличия научно-обоснованной государственной транспортной Стратегии, сбалансированной программы развития технологического и организационного уровня предприятий как самой транспортной системы, так и поставщиков оборудования, определяющего технологический уровень транспортной системы.

Помимо традиционных требований к безопасности, доступности и качеству перевозок наиболее четко проявляются требования к экологичности, мультимодальности и скорости оказываемых транспортных услуг [4, 5].

## **Факторы влияния на развитие железнодорожного транспорта**

Наиболее сильное влияние на развитие железнодорожного транспорта как технологической и бизнес системы оказывает воздействие двух главенствующих факторов:

Первый фактор – растущая конкурентоспособность альтернативных видов транспорта (авиация, автотранспорт, водный транспорт) по принципу развития поддерживающих и прорывных технологий в самой транспортной подсистеме. Как правило, они позволяют поддержать стабильность и улучшить технико-экономические параметры транспортных продуктов, прежде всего – скорость и себестоимость перевозок. Опора на развитие

прорывных технологий позволяет придать базовым характеристикам продуктов количественный рост, например, изменение скорости в 1,5–2 раза, снижение себестоимости на десятки процентов. При этом перераспределение спроса на продукт происходит внутри традиционного рынка и, как правило, между представителями традиционных продуктовых сегментов, или внутри них.

Второй фактор – появление подрывных<sup>1</sup> технологий, фактически формирующих новый рынок (или, по крайней мере, сегмент рынка) с предложением продукта принципиально нового качества, обеспечивающего формирование нового спроса. При этом полностью разрушается интерес потребителей к традиционным продуктам, оставляя целые сегменты рынка устаревшими элементами экономической и технологической истории. Современными примерами таких «подрывных» технологий являются появление мобильной связи относительно проводной, цифровых устройств хранения информации против аналоговых и др.

Проект транспортной системы, основанной на использовании искусственно созданной вакуумной среды для движения транспортного средства по принципу магнитной или аэролевитации, безусловно относится к проектам, базирующимся на подрывных для традиционных видов транспорта технологиях, поскольку проектируемые и заявляемые характеристики нового продукта в разы превосходят соответствующие характеристики традиционного наземного транспорта.

### **Вакуумная среда для магнитно-левитационного движения – решение для сверхвысоких скоростей**

Физическая основа проекта – многократное снижение сопротивления воздушной среды движущемуся транспортному средству – позволяет увеличить скорость доставки объекта (как пассажира, так и товара) по сравнению с традиционными наземными видами транспорта в пять-десять раз.

Теоретические оценки затрат энергии на создание разряженной среды для движения транспортной единицы в сравнении с аналогичными затратами энергии, необходимой для достижения той же скорости в естественной воздушной среде предполагают многократный энергетический эффект.

Практическое решение этой задачи представляется вполне реалистичным, поскольку уже имеющиеся технические решения

---

<sup>1</sup> Термин «Подрывные технологии» введен профессором Гарвардской Бизнес школы Клейтоном М. Кристенсоном. Клейтон М. Кристенсен. Дилемма инноватора: Как из-за новых технологий погибают сильные компании. Пер. с англ. 4-е изд. М.: Альпина Паблишер, 2015. 238 с.

позволяют создавать в крупных замкнутых объемах разряженную среду с глубиной, приближающейся к нулю.

Известно, что такие взаимосвязанные величины, как сила тяги, мощность двигателя, нагрузка на ось и коэффициент сцепления определяют приемлемый предел эксплуатационной скорости подвижного состава, который в настоящее время на высокоскоростных магистралях достигает 300–330 км/час.

Увеличить коэффициент сцепления можно за счет увеличения нагрузки на ось, однако теоретически и практически доказано, что нагрузки на ось ограничиваются скоростными параметрами, как с учетом стоимостных характеристик инфраструктуры, так и условиями, гарантирующими безопасность эксплуатации.

Токосъем высокоскоростных поездов осуществляется через механический контакт токоприемника с контактным проводом. При больших скоростях движения, как показывают расчеты и практика эксплуатации, такой токосъем становится неэффективным и имеет предел для постоянного тока – 200 км/ч, а для переменного – 350 км/ч. На уровне современной оценки перспективы увеличения скорости транспортной системы колесо – рельс и токоприемник – контактный провод величина скоростных ограничений сходится на скоростях 350–360 км/ч [6]. Можно поставить задачу увеличить скорость, но в процессе практического использования дальнейшее увеличение скорости наземного транспорта, основанного на трибологических системах колесо – рельс, пантограф – контактный провод будет требовать существенного роста затрат на производство, эксплуатацию и энергопотребление.

В условиях достигнутых фундаментальных скоростных ограничений системы колесо – рельс для построения и эффективной эксплуатации перспективных транспортных средств обоснован принципиально другой, бесконтактный способ передачи энергии, трансформируемой в силу тяги подвижного состава относительно инфраструктуры – магнитно-левитационный.

В то же время использование магнитно-левитационного привода для тяги не позволит повысить скорость движения на принципиально больший уровень, чем на высокоскоростных магистралях из-за сохранения ограничивающего скорость воздействия сопротивления окружающей воздушной среды подвижному составу.

Научное сообщество уже более ста лет видит принципиальным решением для кратного увеличения скорости использование принципа магнитной левитации в сочетании с искусственно создаваемой перед движущимся составом вакуумной (или приближенной к вакууму) «воздушной» среды, что позволит повысить скорость магнитно-левитационного поезда с 400–500 км/час до 1000 и более км/час.

Теоретически исследования показывают, что без оценки воздействия сверхвысоких скоростей на организм человека, скорость подвижного состава в вакуумной среде может достигать 6 Мах (6000 км/ч) [7].

Предварительные экспертные оценки позволяют сделать вывод, что целесообразной целевой скоростью при проектировании вакуумно-левитационных транспортных систем является скорость 1000–1200 км/час.

При использовании технологии Маглев в разреженной воздушной среде при крейсерской скорости 1000–1200 км/ч, можно обеспечить быстрое ускорение и тормозной путь, бесконтактная магнитная левитация увеличивает ресурс узлов передачи тяговой силы, обеспечивая энергетическую эффективность благодаря отсутствию механического контакта и высокому КПД линейного двигателя.

Вместе с тем, наряду с решением задачи снижения сопротивления движению, проектирование транспортной системы нового технологического уклада, помимо конструкционного проектирования, требует решения целого ряда физико-технологических задач, таких как:

- выбор принципа и технологии передачи энергии для разгона и торможения транспортного средства на основе левитации [магнитной или воздушной],
- определение допустимых режимов разгона, торможения с точки зрения физиологических ограничений для пассажира,
- выбор технических решений для торможения,
- определение безопасных и технологически целесообразных интервалов движения транспортных средств в попутном направлении,
- выбор конструкции «разворотных» устройств на конечных и промежуточных терминалах,
- выбор конструктивных решений для поперечной стабилизации транспортного средства в вакуумной трубе (тоннеле),
- проектирование системы вертикальной стабилизации энергетического клиренса левитационной системы для обеспечения необходимых параметров передачи энергии в системе инфраструктура – транспортная единица,
- технико-экономическая оценка оптимальных габаритов системы «тоннель – транспортная единица» для пассажирского и специального грузового сообщения,
- оценка возможности и целесообразности создания вакуумно-левитационной системы для транспортировки стандартных и специализированных контейнеров.

Алгоритм подготовки концепции проекта создания сверхвысокоскоростной транспортной системы с использованием вакуумно-левитационного поезда (ВЛП)<sup>2</sup> представляет собой системно

---

<sup>2</sup> Термин предложен автором.

выстроенную цепочку организационных шагов, направленных на формирование фундаментальной научной основы для создания высокоскоростного сообщения, обеспечивающего кардинально более высокое качество перевозок на новых физических принципах.

Решение задачи предусматривает формирование в рамках деятельности Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» рабочей группы для изучения вопросов, связанных с перспективой применения вакуумной среды и принципов магнитно(воздушно)-левитационного движения для создания скоростных транспортных систем нового технологического уровня.

### **Алгоритм подготовки концепции создания вакуумно-левитационной транспортной системы**

Работа состоит из ряда организационно-исследовательских этапов (шагов) по формированию перечня научных задач, которые необходимо решить для реализации проекта по следующим направлениям:

#### **1) Определение сферы применения новой транспортной системы на основе определения:**

- ниши в общей системе транспортного рынка, которую должен занять новый транспортный продукт;
- технико-экономических характеристик (габаритов трубы и подвижного состава, скорости, внутреннего пространства подвижного состава и его конфигурации) для обеспечения удобства перевозки пассажиров и грузов.

**2) Определение характеристик (плотности воздушной среды, применения инертных газов и др.) вакуумной среды с учетом экономической эффективности и технических возможностей, а также технических средств (насосов) по созданию разреженного пространства.**

#### **3) Определение принципов движения поезда в трубе:**

- оценка возможностей применения магнитной левитации и альтернативных физических принципов;
- разработка требований к тяге подвижного состава;
- оценка негативного воздействия магнитного излучения и защита пассажиров от него;
- определение требований к плану и профилю системы: инфраструктурное полотно – вакуумный тоннель (труба);
- формирование требований к форме и размерам подвижного состава с учетом требований к аэро- и термодинамическим свойствам и характеристикам

#### **4) Определение задач по подбору и разработке инновационных материалов:**

- сверхпроводников для передачи тока для создания магнитной левитации;
- конструкционных сталей и полимеров для подвижного состава и оболочки вакуумной трубы;
- и т. д.

### **5) Формирование требований к системам обеспечения безопасности.**

Подготовка концептуальных предложений для включения в техническое задание для проектирования системы осуществляется под руководством ведущих ученых – членов Объединенного ученого совета ОАО «РЖД».

При этом реализация программных задач на каждом из «шагов» должна быть обеспечена временными экспертными группами ученых из ведущих академических (РАН) и отраслевых (ОАО «РЖД», университеты путей сообщения) научных коллективов.

По отдельным направлениям исследований создаются секции с привлечением специалистов из специализированных научных областей:

- по вакуумной среде и вакуумным технологиям;
- сверхпроводимости;
- магнитной левитации;
- новых конструкционных материалов;
- проектированию корпусов авиационных транспортных средств;
- аэротермодинамике;
- и др.

В рамках каждого направления требуется проведение детального анализа мирового опыта и фундаментальных заделов отечественной науки. При этом крайне положительными и полезными являются выполненные в Санкт-Петербургском университете путей сообщения исследовательские работы и конструкторские эксперименты по созданию транспортной системы на магнитном подвесе [8].

Для подготовки предложений по финансированию конкретных подпроектов в рамках каждого направления требуется подготовка грантовых тематик, определяющих научные решения базовых, фундаментальных задач.

При формировании научного фундамента этой задачи требуется выполнить математическое моделирование сопротивления движения поезда [9] за счет вариативности плотности воздушной среды в тоннеле или ее химического состава (например, использование гелиевого наполнителя).

Убрать, или, по крайней мере, существенно снизить аэродинамическое сопротивление, которое испытывает транспортное средство, перемещаясь в атмосфере, ученые пытаются достаточно давно.

Еще в 1914 году российским ученым Б. Вайнбергом предложено решить эту задачу путем помещения транспортного средства в трубу с откаченным из нее воздухом (рис. 1).

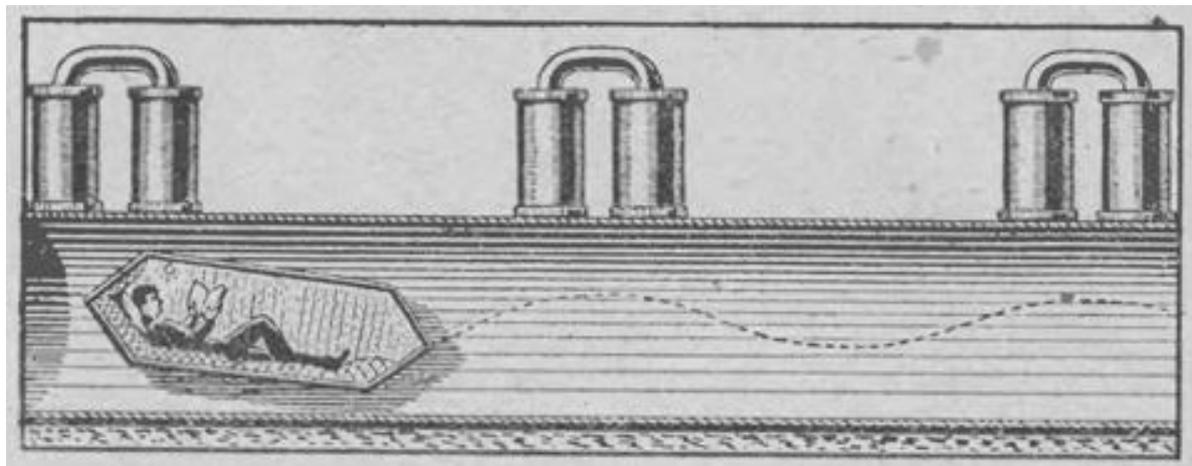


Рис. 1. Вакуумный поезд Вайнберга (эскиз)

Очевидно, что движение со сверхвысокими скоростями будет сопровождаться высоким температурным нагревом элементов подвижного состава и инфраструктуры, следовательно серьезной научной задачей является выбор, а, возможно, и создание соответствующих материалов для создания конструкций.

При этом дополнительным преимуществом вакуумно-левитационной транспортной системы является сниженная потребность в землеотвождении, поскольку инфраструктура системы может быть построена не только в подземном, но и в подводном пространстве (рис. 2). Подобный подход рассматривался на Международном форуме в Республике Корея [10].

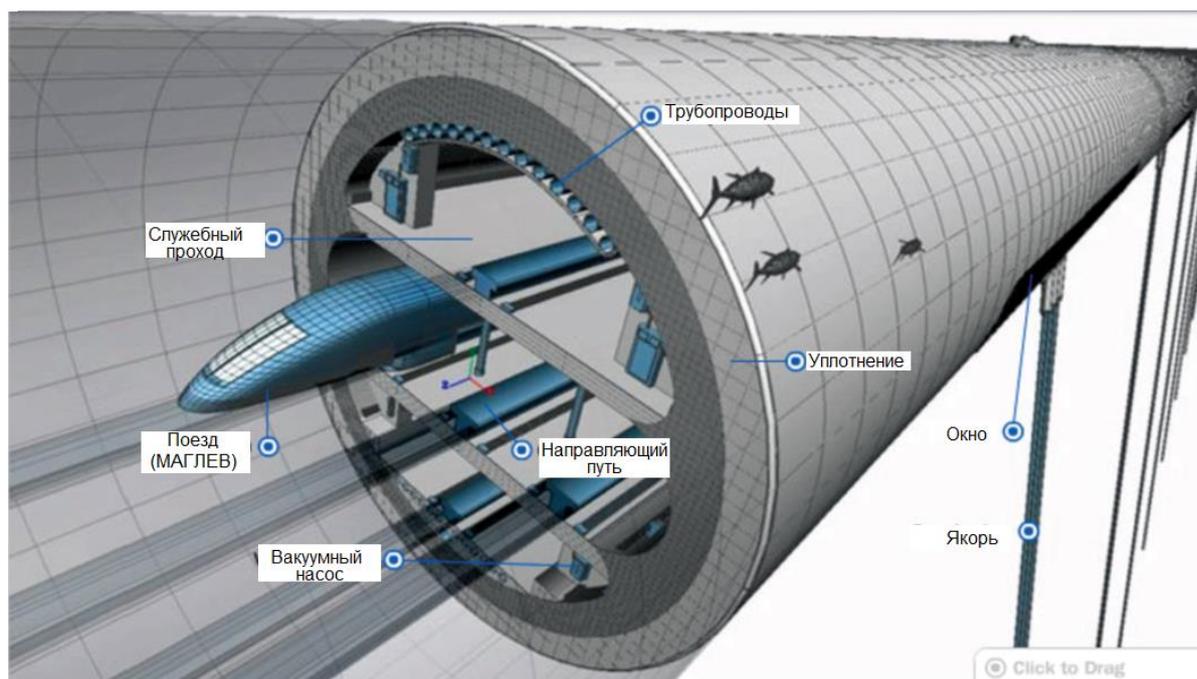


Рис. 2. Вариант подводной ВСМ (вакуумный поезд) [7]

Вопросам строительства подводных и погружных тоннелей уделяется большое внимание в рамках деятельности Международной тоннельной ассоциации (ИТА) [11, 12].

## **Условия трансформации железнодорожной системы**

Системный подход к построению гарантированного успеха в будущем для железнодорожной отрасли открывает очевидность принятия своевременных решений по трансформации железнодорожной системы на основе заимствования конкурентных преимуществ других транспортных отраслей. При органичном подтвержденном временем достоинстве железнодорожных перевозок по таким критериям как непрерывность, массовость, безопасность, номенклатурная диверсифицированность услуг, железные дороги в своем развитии, ориентированном в будущее, должны перенимать у своих конкурентов их главные конкурентные преимущества: от морского транспорта – массовость и низкий уровень себестоимости, от воздушного – скорость, от автомобильного – гибкость услуг и их адресность и т. д.

Эти подходы к развитию железнодорожного транспорта и транспортной системы в целом не новы, у них богатая технологическая история, но все прорывные предложения и проекты в области транспорта преследуют достижения нового уровня услуг именно исходя из таких подходов.

Наибольшая активность на мировом рынке транспортных инноваций проявляется в настоящее время в США, Китае, Японии, Республике Корея. Причем развитие вакуумной магнитно-левитационной транспортной системы по инициативе американского предпринимателя-инноватора Элона Маска осуществляется на открытой конкурсной основе с использованием краудсорсинговых технологий. В объявленном, к примеру, конкурсе на разработку вагона-капсулы для вакуумной системы Hyperloop участвуют десятки студенческих проектных команд, в том числе проектная команда из университета Delft из Голландии, по мнению проектного офиса Hyperloop наиболее продвинувшиеся в проекте.

Этот пример подтверждает одну из главных идей глобализации – всемирное достояние инноваций и открытость знаний в XXI веке. Очевидно, что конкурентное соревнование проектных команд в создании вакуумно-левитационного поезда (транспортной системы) позволит уже в ближайшие годы добиться результата – создания качественно новой системы транспортных услуг, которая в свою очередь окажет решающее значение на трансформацию социально-экономических связей как внутри наших стран, так и в глобальном пространстве.

## **Заключение**

Российская фундаментальная и прикладная наука обладают не только теоретическими знаниями, необходимыми для создания «прорывных» транспортных технологий, но и возможностью нахождения принципиально новых технологических и конструкторских решений для конкуренции с мировыми инновационными лидерами.

Особое значение для России и мирового экономического сообщества может стать разработка принципиально нового вида транспорта – вакуумно-левитационной «контейнерной системы», которая по принципу непрерывного скоростного конвейера смогла бы обеспечить многократный рост конкурентоспособности российской транспортной системы в глобальном товарообмене между странами Европы и Азии.

## **Выводы**

Задачей научного сообщества является формирование объективного информационного поля, поддерживающего нацеленность научных коллективов на создание «подрывных» технологий для выхода российского рынка транспортных услуг на конкурентоспособный мировой уровень, стимулирующего внимание государства и бизнес-сообщества к финансированию проектов и повышающего интерес творческой молодежи к научным исследованиям и проектированию принципиально новых транспортных систем.

В этом смысле, действия Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» по разработке концепции вакуумно-левитационной транспортной системы и накапливаемый научно-экспериментальный опыт научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок ПГУПС по созданию магнитолевитационного подвижного состава [6] являются крайне своевременными.

## **Библиографический список**

1. Declaration from Ministers on Transport for a Changing World / International Transport Forum. OECD. Leipzig, 2014. [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://www.exoclub.ru/upload/blog/ITF14-Declaration.pdf> (дата обращения 21.04.2016 г.).
2. A Global Vision for Railway Development / International Union of Railways (UIC), IRRB, Paris, 2015. [Электронный ресурс]. – Код доступа: [http://www.uic.org/IMG/pdf/global\\_vision\\_for\\_railway\\_development.pdf](http://www.uic.org/IMG/pdf/global_vision_for_railway_development.pdf) (дата обращения 18.04.2016 г.).

3. Клейтон М. Кристенсен. Дилемма инноватора: Как из-за новых технологий погибают сильные компании. Пер. с англ. 4-е изд. – М.: Альпина Паблишер, 2015. – 238 с.
4. Лapidус Б. М., Лapidус Л. В. Железнодорожный транспорт: философия будущего. – М.: Прометей, 2015. – 232 с.
5. Лapidус Б. М., Лapidус Л. В. Социально-экономические предпосылки развития высокоскоростного сообщения в России // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика, 2014. – № 6. – С. 52-63.
6. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В. А. Гапановича. – М.: Физматлит, 2014. – 476 с.
7. Building a Transcontinental Tunnel / Discovery, 2010. [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://www.discovery.com/tv-shows/other-shows/videos/mega-engineering-building-a-transcontinental-tunnel/> (дата обращения 21.04.2016 г.).
8. Зайцев А. А. Отечественная транспортная система на основе магнитной левитации // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», 2015. – № 6 – С. 22-27.
9. Кирякин В. Ю. Применение вакуумной среды для создания скоростных транспортных систем. Математическое моделирование обтекания объектов (метод дискретных вихрей) / В. Ю. Кирякин, В. Ш. Лежава, А. В. Новгородцева // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», 2015. – № 6. – С. 28-36.
10. Лapidус Б. М. Прорывные инновационные задачи железнодорожной науки и предлагаемые решения // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – № 3. – С. 1-11.
11. Innovative Technologies for Railway System: International Forum on Innovative Railway // 2014 International Seminar on Innovations for Future Transportation, 2014. – pp. 41-59.
12. Tunneling and Underground Space Technology. Pergamon Press Ltd., 1997. – vol. 12. – no. 2. – pp. 317-336.

## References

1. *Declaration from Ministers on Transport for a Changing World*. International Transport Forum. OECD. Leipzig, 2014. URL: <http://www.expoclub.ru/upload/blog/ITF14-Declaration.pdf> (21.04.2016).
2. *A Global Vision for Railway Development*. International Union of Railways (UIC), IRRB, Paris, 2015. URL: [http://www.uic.org/IMG/pdf/global\\_vision\\_for\\_railway\\_development.pdf](http://www.uic.org/IMG/pdf/global_vision_for_railway_development.pdf) (18.04.2016).

3. Kleyton M. Kristensen. *Dilemma innovatora: Kak iz-za novykh tekhnologiy pogibayut sil'nye kompanii* [The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail]. Moscow, 2015. 238 p.
4. Lapidus B. M., Lapidus L. V. *Zheleznodorozhnyy transport: filosofiya budushchego* [Railway Transport: the Philosophy of the Future]. Moscow, Prometey, 2015. 232 p.
5. Lapidus B. M. & Lapidus L. V. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6: Ekonomika – The Herald of Moscow State University. Series 6. Economics*, 2014, no. 6, pp. 52–63.
6. Antonov Yu. F. & Zaytsev A. A. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magnetic levitation transport technology]. Moscow, 2014. 476 p.
7. *Building a Transcontinental Tunnel*. Discovery, 2010. URL: <http://www.discovery.com/tv-shows/other-shows/videos/mega-engineering-building-a-transcontinental-tunnel/> (21.04.2016).
8. Zaytsev A. A. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD" – Bulletin of Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways"*, 2015, no. 6, pp. 22–27.
9. Kiryakin V. Yu., Lezhava V. Sh. & Novgorodtseva A. V. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD" – Bulletin of Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways"*, 2015, no. 6, pp. 28–36.
10. Lapidus B. M. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD" – Bulletin of Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways"*, 2014, no. 3, pp. 1–11.
11. Innovative Technologies for Railway System: International Forum on Innovative Railway. 2014 International Seminar on Innovations for Future Transportation, 2014, pp. 41–59.
12. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1997, vol. 12, no. 2, pp. 317–336.

**Сведения об авторе:**

ЛАПИДУС Борис Моисеевич, д.э.н., профессор, председатель Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», председатель Международного совета по железнодорожным исследованиям (IRRB) Международного Союза железных дорог (UIC)  
E-mail: chapaev.yuriy@vniizht.ru

**Information of author:**

Boris M. LAPIDUS, Doctor of Economic Sciences, Professor, Chairman of the Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways", the Chairman of the International Railway Research Board (IRRB) of the International Union of Railways (UIC)  
E-mail: chapaev.yuriy@vniizht.ru

УДК 629.016

**В. М. Фомин<sup>1</sup>, В. И. Звегинцев<sup>1</sup>, Д. Г. Наливайченко<sup>1</sup>, Ю. А. Терентьев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН

<sup>2</sup> Независимый эксперт

## **ВАКУУМНЫЙ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫЙ ТРАНСПОРТ: ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ**

Дата поступления 19.04.2016

Решение о публикации 29.04.2016

Дата публикации 30.09.2016

**Аннотация:** Известная в широком кругу специалистов транспортная концепция «Evacuated Tube Transport Technology» (ЕТЗ) («Вакуумно-Трубопроводной Транспортной Технологии» («ВТЗ»)) [1] являет собой энергоэффективный комплекс магнитолевитационной, вакуумной и сверхпроводниковой технологий для высокоскоростного наземного транспорта. Рассматриваемая концепция представляется как наиболее эффективное решение проблемы кардинального повышения скорости и пропускной способности транспортных систем с приемлемой стоимостью перемещения пассажиров и грузов и невысокими затратами энергии.

Для определения оптимальных диапазонов рабочих параметров рассматриваемой транспортной системы выполнен анализ характеристик разреженной среды. Исходя из соображений баланса энергетических затрат на поддержание вакуума в системе и преодоления аэродинамического сопротивления во всем рассматриваемом диапазоне скоростей транспортного средства (ТС) (500÷6500 км/ч) показано, что нижняя граница оптимальной глубины разрежения вакуумной среды, для ТС с относительно невысокими скоростями, находится в районе 25÷80 Па. Для ТС со скоростям, близкими к максимальной хотелось бы иметь давление от 1Па и менее.

**Ключевые слова:** вакуумный транспорт, магнитолевитационный транспорт, вакуумная система, разреженная среда, аэродинамические характеристики, оптимизация.

**Vasily M. Fomin<sup>1</sup>, Valery I. Zvegintsev<sup>1</sup>, Denis G. Nalivaichenko<sup>1</sup>,  
Yuriy A. Terent'ev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

<sup>2</sup>Independent expert

**VACUUM MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT: DEFINITION OF  
OPTIMAL CHARACTERISTICS**

**Abstract:** Known to a wide circle of specialists of the transport, the concept of "Evacuated Tube Transport Technology" (ET3) [1] is an energy efficient complex magnetic levitation, vacuum and superconducting technology for high-speed ground transportation. The concept is presented as the most effective solution to problem increase the speed and capacity

of the transport system  $c$  is acceptable the cost of moving passengers and cargo, and low cost of energy.

To determine the optimal ranges of working parameters of the considered transportation system the analysis of the characteristics of the rarefied environment. Based on considerations of balance of power the cost of maintaining the vacuum in the system and to overcome aerodynamic drag throughout the speed range of the vehicle (TC) (500÷6500 km/h) it is shown that the lower bound of the optimal depth of vacuum to the vacuum environment, for the vehicle to relatively low speeds, is 25÷80 PA. For vehicles with speeds close to the maximum I would like to have the pressure of 1 PA or less.

**Keywords:** vacuum transport, magnetic levitation transport, vacuum system, sparse environment, aerodynamic characteristics, optimization.

## Введение

Достоинства, недостатки и неоспоримые преимущества высокоскоростных (около 500 км/ч) технологий маглев, реализуемых в естественных условиях окружающей среды, особенно их бóльшая надежность по сравнению с традиционной высокоскоростной рельсовой (ВСР) технологией, достаточно подробно рассмотрены и убедительно обоснованы в работах отечественных и зарубежных исследователей [2, 3].

Но, даже при применении технологии маглев, по мере роста скорости движения ТС квадратично возрастает аэродинамическое сопротивление, и при достигнутых уже сейчас рекордных скоростях движения порядка 617 км/час основная часть возрастающей как куб скорости мощности привода ТС вынужденно затрачивается на его преодоление, также определяя пределы применимости даже и этой более прогрессивной технологии.

Одним из наиболее эффективных решений данной проблемы является использование преимуществ принципиально новой транспортной концепции – «Evacuated tube transport technology» ET3 [1]. Концепт путейпроводов «Evacuated tube transport technology» ET3 или, в переводе, «Вакуумно-трубопроводной транспортной технологии» «ВТЗ» является примером энергоэффективной конвергенции вакуумной и особенно магнитолевитационной и сверхпроводниковой технологий для наземного транспорта, позволяющих ему в потенциале достигать скорости движения ТС более 1000 км/ч, а в перспективе – порядка 6000 км/ч, при высокой пропускной способности магистрального вакуумированного магнитолевитационного путейпровода ET3, приемлемой стоимости перемещения пассажиров и грузов и невысоких затратах энергии в комбинации с новыми перспективными криогенными и низкотемпературными оптоволоконными технологиями.

Основополагающая идея вакуумной транспортной системы указывает на очевидный способ снижения, а в идеале, полного избавления от аэродинамического сопротивления. Теоретически, это дает нам

возможность реализовать, в совокупности с магнитным подвесом ТС, недостижимые до того скорости перемещения наземного транспорта.

Здесь возникает вопрос – насколько глубоким должен быть вакуум в путепроводе? Подавляющее большинство разработчиков проектов вакуумного транспорта рассматривают движение экипажа ТС в путепроводе значительного размера (диаметром более 2,5 м) с глубоким (10 Па и меньше) вакуумом, и с соизмеримыми значительными габаритами ТС. Проблема в таком подходе состоит в том, что на практике все оказывается не так радужно. Считается, что невероятно трудно создать и поддерживать глубокий вакуум в емкостях объемом с комнату, что же можно тогда говорить о трубопроводах длиной сотни и тысячи километров. Транспортный трубопровод будет включать в себя определённую номенклатуру элементов инфраструктуры: множество шлюзов с большим количеством ворот-затворов, определённое количество кранов, фланцев, вспомогательных люков, каналов и т.д.

Кроме того, исследования, проведённые специалистами [1] показали, что кроме пропорционального увеличения потерь энергии на преодоление аэродинамического сопротивления движению ТС, стоимость создания инфраструктуры и самого путепровода также возрастает в третьей степени с ростом его диаметра. Поэтому основным начальным моментом оптимизации вакуумного транспорта является разумная минимизация диаметра самого ТС и вакуумируемого путепровода. По оценке [1] оптимальный диаметр ТС составляет 1300 мм. При значительном отклонении от него «плата», например, за обеспечение повышенного комфорта пассажиров ТС, может стать неоправданно высокой. Поэтому проведенные ниже оценки отнесены к оптимальному диаметру ТС в районе 1300 мм.

Разрабатывая вакуумную транспортную систему чрезвычайно важно на самом начальном этапе определиться с требованиями к необходимой и достаточной степени разрежения в транспортном тоннеле. Основным критерием разумно принять баланс требуемых затрат энергии на создание и поддержание вакуума и энергии на преодоление аэродинамического сопротивления. Кроме того, важно учитывать стоимость оборудования необходимого для создания вакуума требуемой величины и непрерывной компенсации возможного натекания.

### **Затраты энергии на поддержание вакуума в транспортном тоннеле**

Натекание газа через стенки вакуумной системы, сварные швы, уплотнения в местах соединений, а также газоотделение (десорбция) неизбежны и присущи всякой вакуумной системе.

Абсолютная величина натекания  $A$ , установившегося в реальной вакуумной системе, при неизменных заданных параметрах, не зависит от времени. В теории и практике вакуумной техники значение этой величины, обычно, определяют по формуле [4]:

$$A = \frac{dQ}{dt} = V \cdot \frac{\Delta P}{\Delta t} = \text{const},$$

где  $A$  – поток газа, натекающего в систему через неплотности, л·Па/с;  
 $Q$  – количество натекающего газа, л·Па;  
 $V$  – объем вакуумной системы, л;  
 $\Delta P$  – изменение давления в системе за время  $\Delta t$ , Па;  
 $\Delta t$  – длительность натекания, с.

При проектировании вакуумного трубопровода необходимо задаться величиной допустимого натекания воздуха внутрь. Очевидно, что чем выше требования к допустимому уровню натекания, тем выше стоимость системы обеспечения и поддержания вакуума.

Очень сложно спрогнозировать возможный уровень натекания в тоннеле вакуумной транспортной системы, так как аналогов таких вакуумных сооружений (объемом сотни тысяч кубометров) нет. Поэтому на этапе предварительного анализа рабочих параметров вакуумной транспортной системы, в качестве первого приближения, можно обратиться к опыту создания *серийных технологических (не экспериментальных)* вакуумных установок, объем которых обычно не превышает 20 кубометров [4].

На основе практического анализа большого количества реальных вакуумных систем, экстраполяцией, определена область существования значений натекания  $A$ , отражающая действительные возможности обеспечения герметичности вакуумных систем промышленных установок (рис. 1).

На рис.1 представлена область существования величин натекания в зависимости от объема вакуумной системы. Ниже прямой 1 находится область натеканий, обусловленных весьма малыми значениями негерметичности, достижение которых приводит к нерациональному расходу средств и времени. Область, расположенная выше прямой 2 – область значительных натеканий, ведущих к увеличению энергозатрат на поддержание нужного давления в системе и нежелательной неравномерности параметров по объему системы. Вертикальная пунктирная линия соответствует объему вакуумного трубопровода диаметром 2 м и длиной 1000 м ( $V=3141 \text{ м}^3$ ).

На рис. 2 представлена область допустимых величин расходов  $Q$  натекания воздуха в зависимости от объема вакуумной системы. Горизонтальными пунктирными линиями обозначены уровни эквивалентные натеканию через отверстия диаметром 1мм ( $Q=0,184 \text{ гр/с}$ ) и 1,5 мм ( $Q=0,415 \text{ гр/с}$ ).

Опираясь на предложенную экстраполяцию, для участка вакуумного путепровода длиной 1 км и диаметром 2 м, принимаем характерный уровень натекания  $A=16 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ , равный наименьшему  $A_{min}$  для данного объема системы. Такой уровень натекания соответствует расходу воздуха  $Q=0,2 \text{ гр}/\text{с}$ , втекающего через негерметичности, суммарная площадь которых эквивалентна отверстию диаметром 1,05 мм.

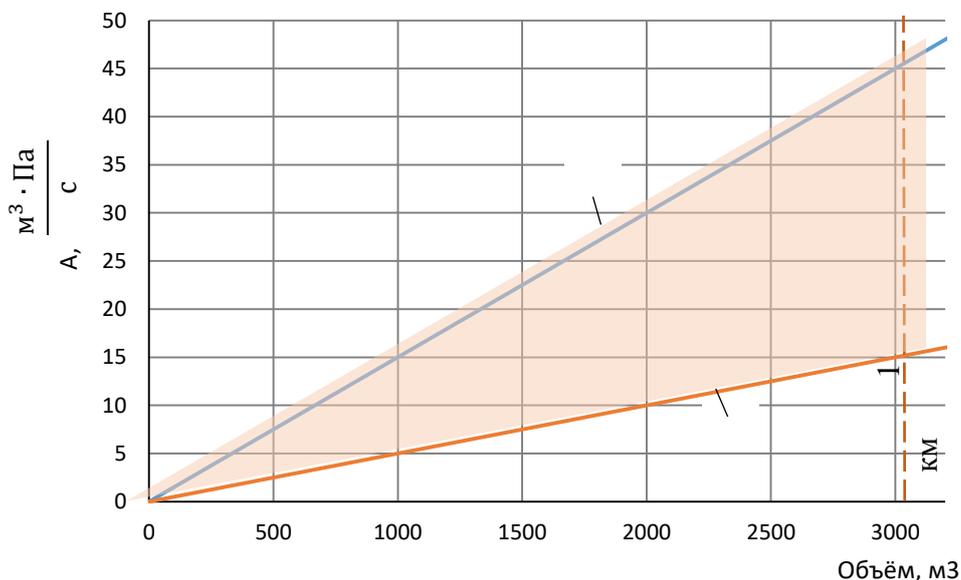


Рис. 1. Поле существования величины натекания.

1 – граница наименьшего натекания; 2 – граница максимального натекания

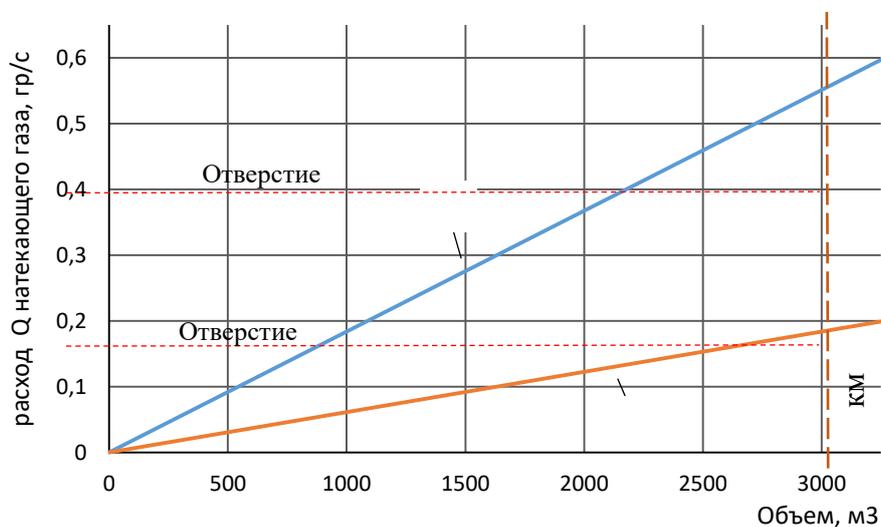


Рис. 2. Поле допустимых расходов натекания воздуха.

1 – граница наименьшего натекания; 2 – граница максимального натекания

На рис. 3 представлено сравнение «производительности» отверстия диаметром 1,05 мм и производительности известных моделей вакуумных установок (2 – насос НВЗ-500, 3 - вакуумная установка УВП 5000/600, 4 – трехступенчатая вакуумная насосная установка ЕТЗS).

Из данного сравнения очевиден вывод – при заданном уровне натекания на **одном километре** вакуумного путепровода:

- один постоянно работающий насос НВЗ-500 может обеспечить вакуум в тоннеле менее 40 Па;
- одна постоянно работающая вакуумная установка УВП 5000/600 может обеспечить вакуум в тоннеле менее 5 Па;
- одна постоянно работающая вакуумная насосная установка ET3S может обеспечить вакуум в тоннеле менее 2 Па.

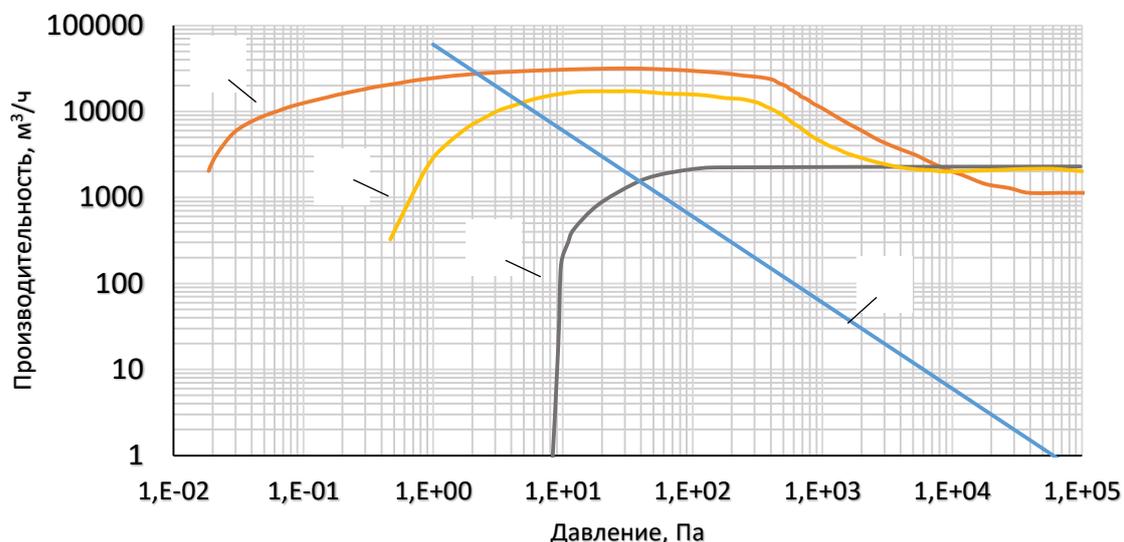


Рис. 3. Сравнение «производительности» отверстия диаметром 1,05 мм и производительности известных моделей вакуумных насосов (1 – отверстие Ø1,05 мм, 2 – насос НВЗ-500, 3 - вакуумная установка УВП 5000/600, 4 – трехступенчатая вакуумная насосная установка ET3S)

В таблице 1 представлена информация о необходимом количестве насосных установок на 1000 км вакуумной трассы для поддержания требуемого давления вакуумирования.

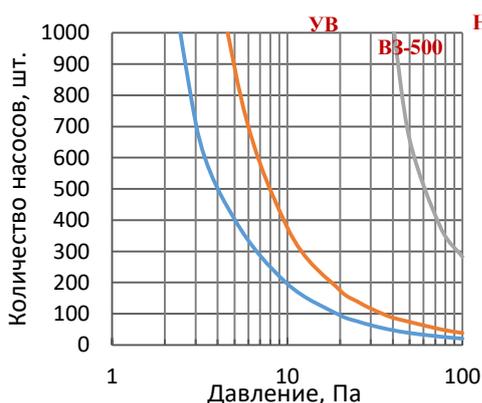


Рис.4. Количество насосов необходимое для поддержания требуемого вакуума в канале (Ø 2м) длиной 1000 км

Таблица 1

Давление, Па,	Количество насосов на 1000 км, шт.		
	ET3S	УВП 5000/600	НВЗ-500
1	2464	19241	-
3	711	1923	-
5	403	890	-
10	196	377	36698
20	95	175	3672
25	76	140	2938
30	63	117	1373
35	54	100	1177
40	47	87	1030
50	38	74	657
100	20	38	283
200	11	21	131

Выполним оценку удельной (на километр путепровода) мощности, требуемой для поддержания заданного уровня давления.

Мощность, потребляемая насосами, затрачивается на преодоление трения в механизме насоса (мощность трения или мощность потерь) и на процесс перемещения и сжатия газа (индикаторная мощность). В области низких давлений (ниже 103 Па) потребляемая насосом мощность практически остается постоянной и не зависит от давления на впуске. Эта постоянная мощность в области низких давлений и является мощностью потерь [5]. Характерные зависимости потребляемой мощности насосами разных типов от давления представлены на рис. 5 - 7.

Для механических плунжерных насосов и двухроторных насосов типа Рутс мощность потерь находится на уровне 10-25% от номинальной мощности привода. Потребляемая мощность винтовых насосов во всем рабочем диапазоне давлений остается постоянной и близка к мощности привода [6]. Опираясь на известные характеристики насосов определимся с необходимыми мощностями вакуумной системы.

На рис. 8 представлены зависимости удельной мощности потребляемой насосными станциями для поддержания требуемого давления в вакуумной системе.

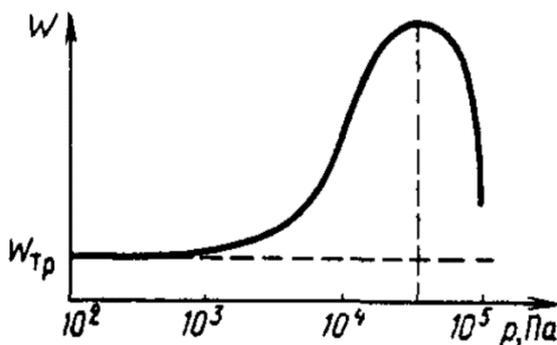
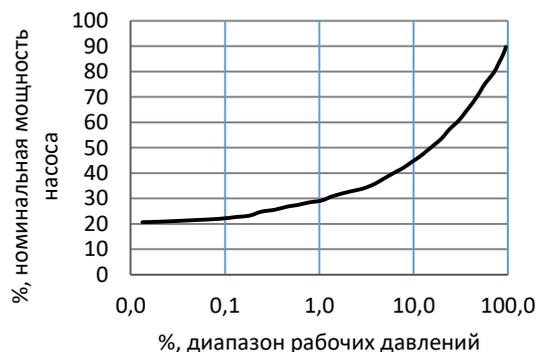


Рис. 5. Типичная зависимость мощности от давления потребляемой плунжерным форвакуумным насосом [5]



б

Рис. 6. Типичная зависимость мощности от давления потребляемой высоковакуумным двухроторным насосом [6]

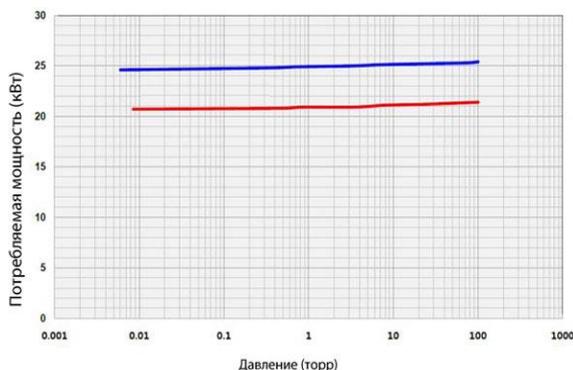


Рис. 7. Типичная зависимость мощности от давления потребляемой винтовым вакуумным насосом [7]

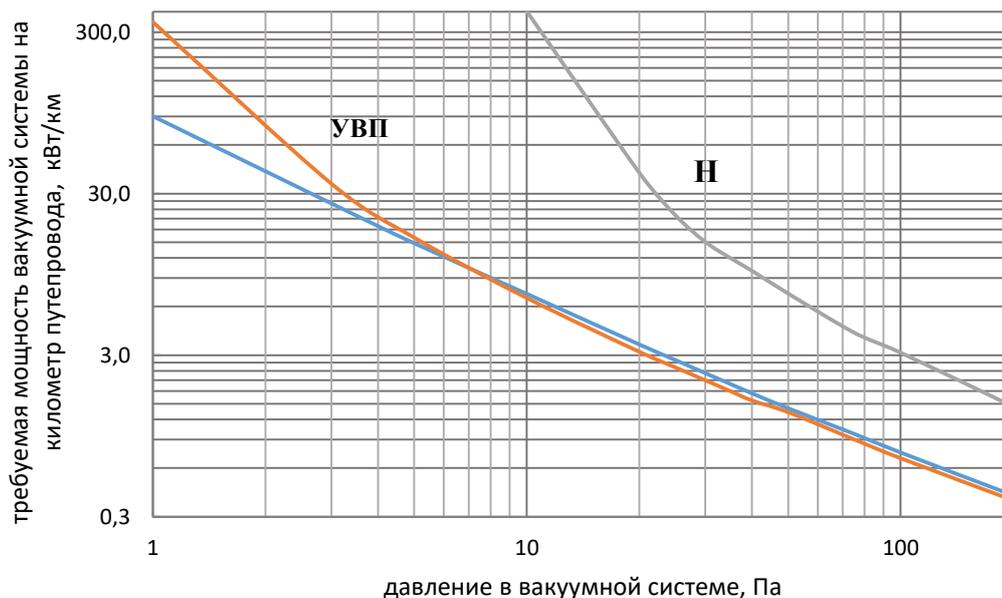


Рис. 8. Мощность, потребляемая насосными станциями для поддержания заданного давления в тоннеле длиной один километр (при натекании через отверстие  $\varnothing 1,05$  мм).

### **Затраты энергии на преодоление аэродинамического сопротивления транспортного средства**

Как должно выглядеть оптимальное транспортное средство для вакуумного транспорта? На данный момент, даже при использовании уже существующих сейчас традиционных технических решений, этот вопрос далек от окончательного ответа. И только по мере постепенного более полного проникновения в суть идеи будут возникать новые эффективные и нетрадиционные технические решения, будет формироваться облик и геометрические размеры ТС ВМЛТ. Формируя внешний вид, а значит и аэродинамические качества ТС, определяющую роль будут играть такие параметры как маршевая скорость транспортного средства, его форма и размеры, степень разреженности и, возможно, состав и способ организации среды, вид и геометрические характеристики подвески (системы левитации) и др.

Так, например, при относительно невысокой скорости ТС. порядка 650 км/час., вклад в суммарные потери кинетической энергии ТС от аэродинамического сопротивления, соизмерим с потерями энергии на разгон и торможение ТС, а при скоростях, близких к верхней границе диапазона, при соответствующем более высоком оптимальном рабочем вакууме и транспортной эффективности порядка  $5 \cdot 10^4$  с, определяющими могут стать уже иные составляющие, например, потери энергии на разгон и торможение ТС [12].

Аэродинамика тела движущегося в потоке воздуха ограниченного стенками канала подобна аэродинамике воздухозаборного устройства проточного двигателя летательного аппарата, захватывающего и пропускающего через себя поток воздуха. По аналогии, необходимо рассматривать тот же комплекс проблем и задач, что возникает при проектировании многорежимного воздухозаборника силовой установки высокоскоростного летательного аппарата во всем диапазоне принятых условий:

- «запуск» проточного тракта между капсулой и стенкой канала, что подразумевает полное перетекание газа из носовой части в кормовую;
- минимизация лобового (волнового) сопротивления;
- снижение сопротивления трения как следствия развитого пограничного слоя на стенках капсулы и его взаимодействия с падающими и отраженными ударными волнами;
- минимизация донного сопротивления;
- минимизация аэродинамического нагрева обтекаемых поверхностей.

К перечисленным задачам можно добавить вопросы:

- изучения динамики движения капсулы (устойчивость, перегрузки при маневрах и др.).
- изучения пассивных (аэродинамические рули, стабилизаторы и др.) и активных (газодинамические рули и др.) методов стабилизации и управления капсулой;

Оценочные расчеты диапазона аэродинамических нагрузок выполнены для упрощенной геометрии капсулы (конус+цилиндр+конус, см. рис. 10).

Исследование аэродинамических характеристик капсулы выбранной геометрии выполнены [11] с помощью коммерческого комплексного программного продукта SolidWorks+ANSYS. Подготовка 3D-модели осуществлялась в программе SolidWorks, затем модель импортировалась в вычислительном модуль ANSYS, где производился газодинамический расчет. Указанный вычислительный пакет при решении задач использует метод конечных объемов и нестационарные уравнения Навье-Стокса. Программа автоматически анализирует геометрию тела и формирует расчетную сетку на поверхности тела и в выделяемой области вычисления. В процессе решения в зонах больших градиентов сетка автоматически оптимизируется. При выполнении расчетов учитываются реальные свойства газа, вязкость, наличие пограничных ламинарного и турбулентного ( $k-\epsilon$  модель) слоев на стенках капсулы и др.

Перед проведением серии численных исследований аэродинамики капсулы выполнено обоснование правомерности расчетов прикладным

пакетом на основе решения системы уравнений Навье-Стокса на предмет сплошности исследуемой среды.

Критерием сплошности (разреженности) газовой среды является Число Кнудсена.

$$K = \frac{l}{d} = \frac{\text{длина среднего свободного пробега}}{\text{параметр, характеризующий размеры тела}}$$

При малых числах Рейнольдса в качестве параметра  $d$ , характеризующего размеры тела, можно взять длину тела  $L$ . В этом случае число Кнудсена рассчитывают на основе данных о длине:

$$K_L = \frac{1,26\sqrt{\gamma}M}{Re} \approx 1,5 M/Re [9].$$

На рис. 9 представлены оценки числа Кнудсена для рассматриваемой геометрии капсулы, в диапазоне скоростей полета  $V=1000 \div 6500$  км/ч, давлений  $P_{\text{вак}}=1 \div 1000$  Па.

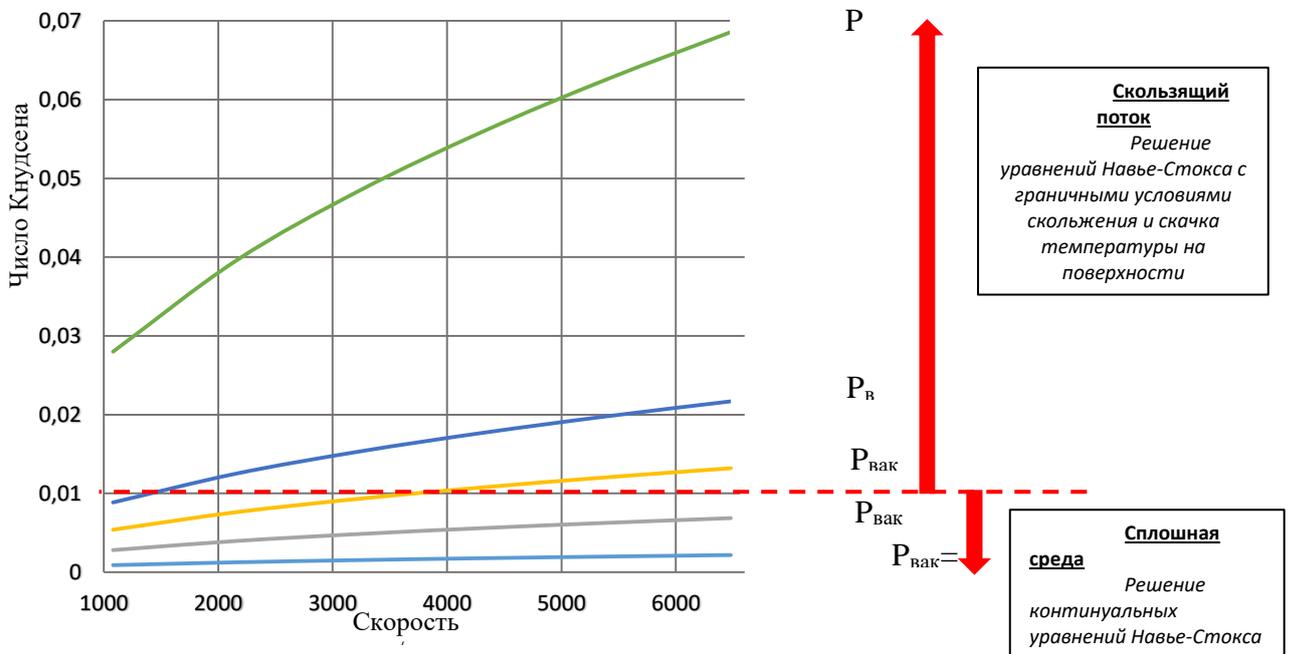


Рис. 9. Числа Кнудсена вычисленные для условий конкретной задачи

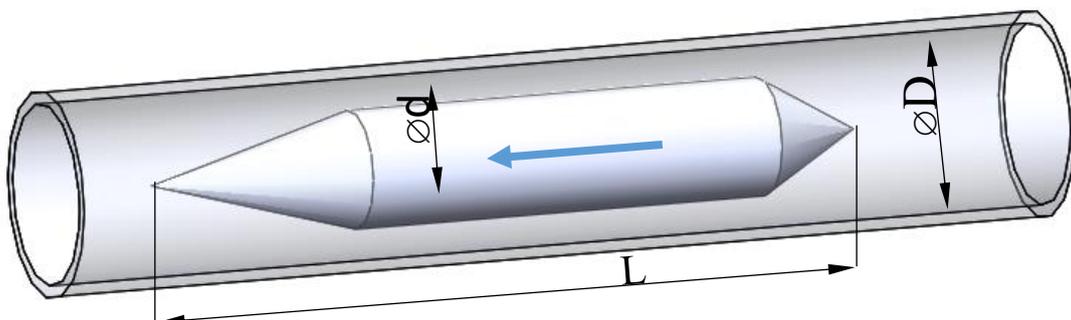


Рис. 10. Геометрия модели капсулы в канале

Изучая аэродинамические характеристики капсулы, нельзя рассматривать её отдельно от канала, игнорируя вопросы интерференции. Полет тела в свободном потоке и в условиях ограниченных стенками канала в общем случае не идентичны. Картина обтекания капсулы в свободном

полете со сверхзвуковой скоростью ( $V=6500$  км/ч, число  $M=5.4$ ,  $P=100$  Па,  $T=300$  К) представлена на рис. 11.

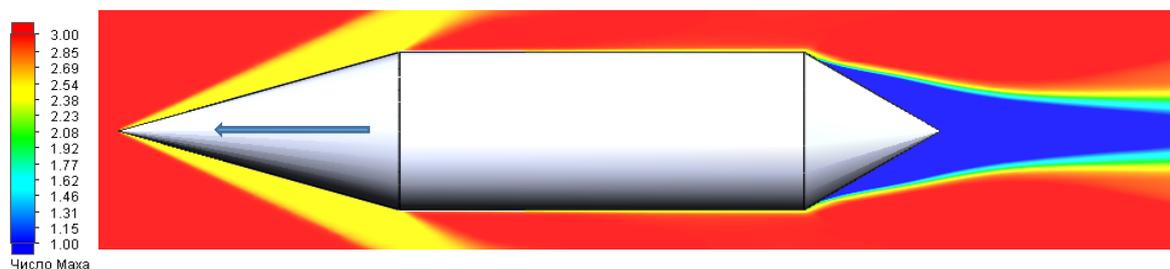


Рис. 11. Полет капсулы в свободном потоке

Основной вклад в сопротивление вносит волновое сопротивление капсулы. Существенно меньший вклад дают донное давление и сопротивление трения на стенках капсулы.

В случае движения капсулы в канале могут реализоваться два принципиально разных варианта газодинамического течения. Здесь важным параметром является соотношение площадей капсулы и канала:  $\theta = \frac{S_D}{S_d}$ , где  $S_D$  – площадь канала,  $S_d$  – площадь капсулы. При некотором  $\theta_{\text{крит}}$  (критическое соотношение площадей) происходит перестройка течения.

В первом, благоприятном случае ( $\theta > \theta_{\text{крит}}$ ), зазора между внутренней стенкой канала и стенкой капсулы достаточно, чтобы «проглотить» весь захватываемый капсулой воздух (рис. 12). В этом случае, общее сопротивление капсулы (см. рис. 14 кривые 2 и 3) может быть даже несколько ниже чем в свободном полете благодаря большему давлению в кормовой части капсулы (результат интерференции капсулы и канала).

Второй вариант реализации течения (рис. 13) неблагоприятен с точки зрения аэротермодинамических характеристик.

Зазор между каналом и капсулой столь узок ( $\theta < \theta_{\text{крит}}$ ), что весь захватываемый газ не «проглатывается». Формируется течение несколько схожее с движением полупроницаемого поршня в трубе. Капсула толкает большую часть газа впереди себя. Формируется ударная волна, распространяющаяся впереди капсулы. Сопротивление тела резко возрастает (см. рис. 14 кривая № 1).

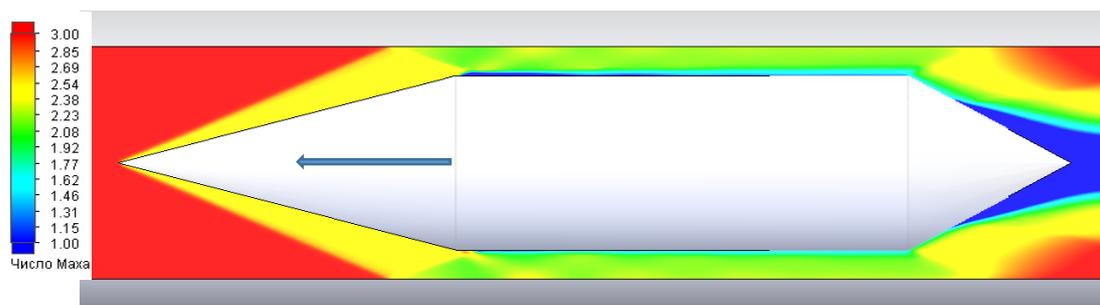


Рис. 12. Оптимальный вариант работы системы «капсула-канал» («расчетный» режим)

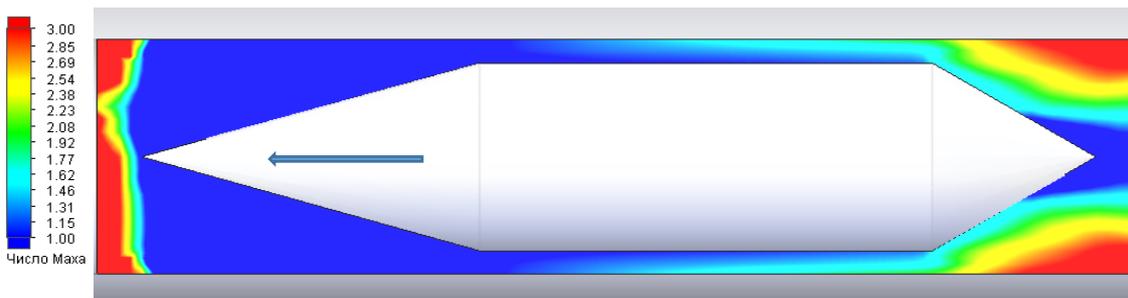


Рис. 13. Неблагоприятная картина течения («нерасчетный» режим)

На рис. 14 представлены результирующие численные исследования графики, характеризующие зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления капсулы выбранной геометрии от скорости движения. При выполнении серии расчетов рассматривались три варианта внутреннего диаметра канала ( $\varnothing = 1500$  мм (1),  $\varnothing = 1750$  мм (2),  $\varnothing = 2000$  мм (3)), наружный диаметр капсулы принят неизменным ( $\varnothing = 1300$  мм).

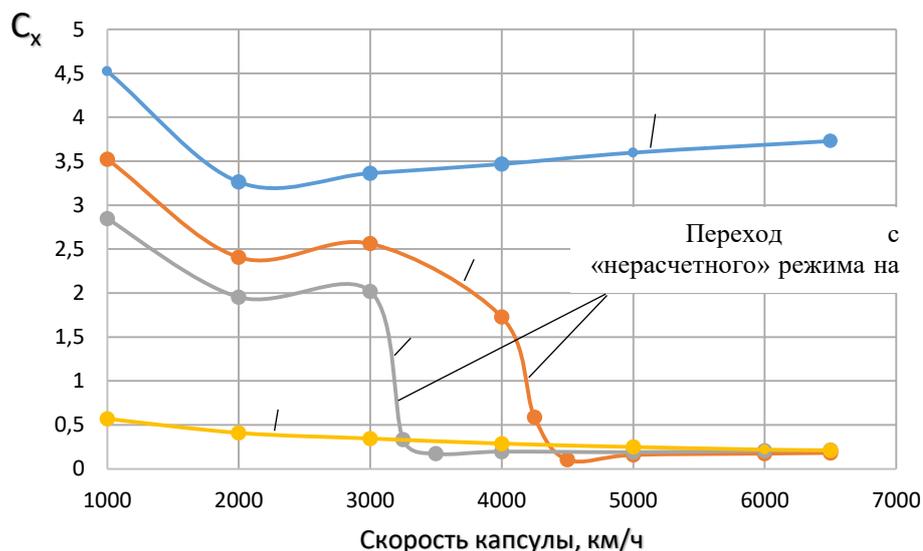


Рис. 14. Коэффициент аэродинамического сопротивления капсулы.

1 – диаметр канала 1500 мм, 2 - диаметр канала 1750 мм,  
3 - диаметр канала 2000 мм, 4 – капсула в свободном полете (диаметр канала =  $\infty$ )

Мощность необходимую на преодоления аэродинамического сопротивления, при использовании существующих традиционных технических решений, вычисляем из условия постоянства скорости движения капсулы на маршевом участке пути. Рассматриваем наиболее благоприятный, для всего диапазона скоростей, случай с минимальными энергозатратами (случай 4 (рис. 14)).

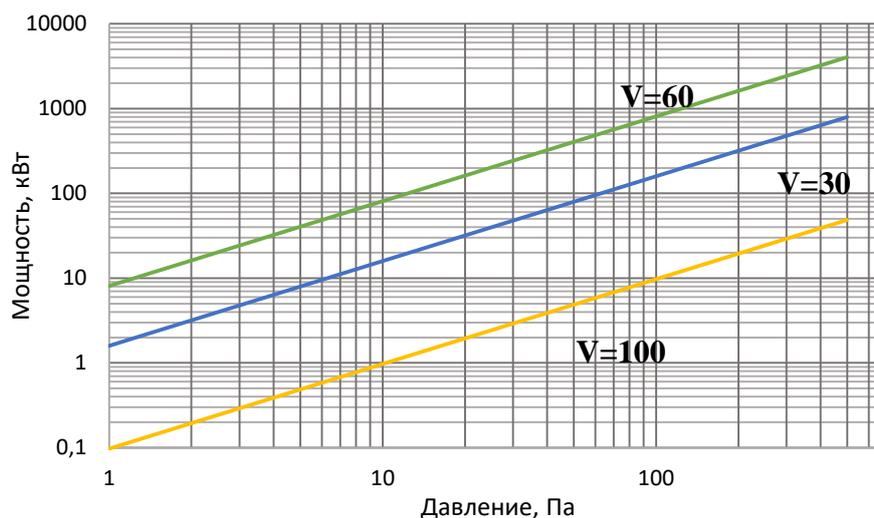


Рис. 15. Мощность, затрачиваемая приводом одной транспортной капсулы на преодоление аэродинамического сопротивления.

На рис. 15, для трех скоростей движения (1000, 3000 и 6000 км/ч), представлены зависимости мощности требуемой для преодоления транспортной капсулой аэродинамического сопротивления от давления в транспортной системе.

Для сопоставления мощности требуемой на преодоление аэродинамического сопротивления и удельной мощности потребляемой насосными станциями для поддержания требуемого давления в вакуумной системе необходимо введение понятия удельной, на километр путепровода, мощности преодоление аэродинамического сопротивления. Определяющим параметром при этом становится отношение всего количества транспортных капсул,двигающихся одновременно в тоннеле, к общей длине путепровода (плотность капсул, «загруженность» вакуумной трассы, штук капсул/км). Другими словами, то количество транспортных капсул которое в рассматриваемый момент времени обслуживает вакуумная система. В пределе, для одной транспортной капсулы нет смысла организовывать сложную и дорогую вакуумную систему, потребляющую много больше энергии, чем затраты на преодоление аэродинамических сил.

На данном этапе развития и степени проработки концепции вакуумного транспорта трудно судить о технических возможностях периодичности и дистанции следования капсул друг за другом по одному путепроводу. Большинство авторов работ о вакуумном транспорте, вполне резонно, этот вопрос не затрагивают. Редкие работы, в которых приводятся предполагаемые пропускные способности системы, как правило, стараясь представить традиционную вакуумную транспортную технологию в крайне выгодном свете демонстрируют существенно завышенные возможности (от 2 до 200 капсул в минуту).

Выполним оценку возможных диапазонов временной периодичности и диапазонов следования капсул, например, традиционных систем, друг за другом исходя из умозрительной экстренной ситуации. Пусть капсула №2 следует за капсулой №1. Представим, что в точке А по пути следования с капсулой №1 случается авария, Определим время и расстояние необходимое для экстремального торможения капсулы №2, прежде чем она окажется в точке А.

В соответствии с указаниями ГОСТ Р 53130-2008 пассажир зафиксированный в кресле способен длительное время (более 5 секунд) выдержать воздействие перегрузки равное  $a = -2g$  (рис. 16).



Рис. 16. Длительность предельно допустимых линейных ускорений  $-a_x(g)$  "дья-спина" для пассажира, зафиксированного в кресле в позе "сидя" (кривые 1, 2) или в позе "лежа" (кривая 3), при единичном воздействии импульса [8]

Опираясь на выражения (2), времени торможения и пути для равнозамедленного движения, выполним оценки минимально возможных значений дистанции в зависимости от маршевой скорости капсулы.

$$\text{Время торможения (с): } t = \frac{v_{\text{марш}}}{a};$$

$$\text{Дистанция торможения (м): } L = \frac{a \cdot t^2}{2}. \quad (2)$$

В таблице 2 представлены результаты расчета минимальных значений периода и дистанции следования транспортных капсул, а также удельное значение количества капсул на 1000 километров пути.

Таблица 2

Маршевая скорость ( $v_{\text{марш}}$ ), км/ч	Время торможения, с	Дистанция торможения, км	Плотность капсул, штук на 1000 км
1000	14,2	2	508
2000	28,3	7,9	127
3000	42,5	17,7	56
4000	56,7	31,5	32
5000	70,9	49	20
6000	85,0	70,9	14

Основываясь на выполненных оценках, можно определить удельные, на километр путепровода, мощности преодоления аэродинамического сопротивления (рис.17) и выполнить сравнение с удельной мощностью потребляемой вакуумными насосными станциями для поддержания требуемого давления в вакуумной системе.

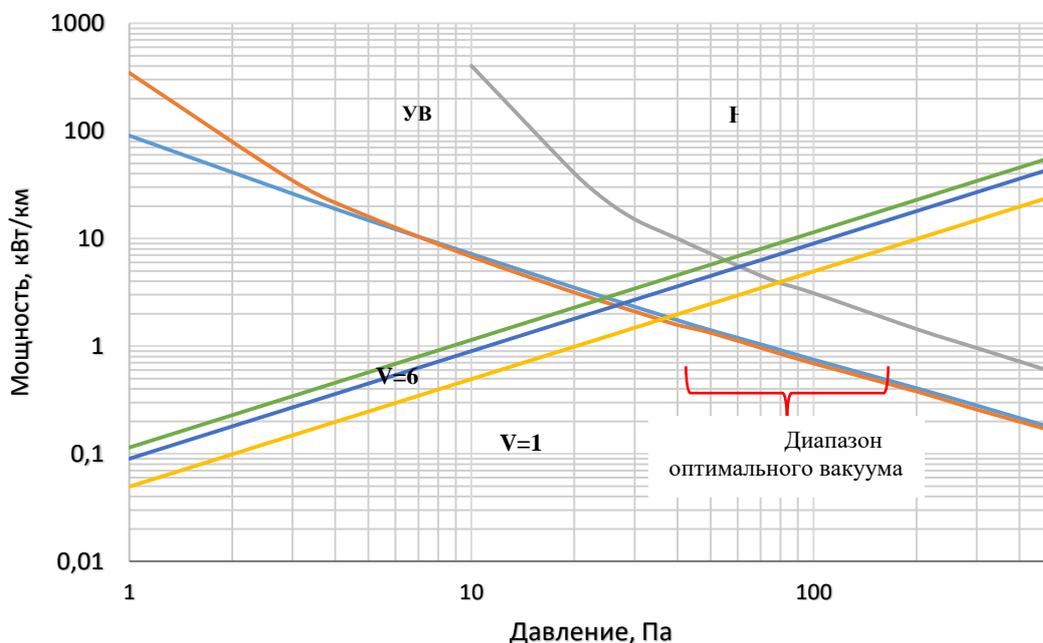


Рис. 17. Сравнение удельных мощностей, затрачиваемых на преодоление аэродинамического сопротивления и поддержания заданного давления в тоннеле.

Область пересечения диаграмм мощностей на рис. 17 указывает нижнюю границу оптимальной глубины разрежения в вакуумной системе при эксплуатации вакуумного транспорта.

Рис. 17 построен для количества капсул, показанных в табл. 2. Уменьшение (увеличение) количества капсул ведёт к уменьшению потребной мощности на преодоление аэродинамического сопротивления и смещает диапазон оптимального вакуума в сторону больших значений давления (и наоборот).

## Выводы

1. Нижняя граница области оптимальных значений эксплуатационных давлений в тоннеле вакуумной транспортной системы, при использовании существующих традиционных технических решений, лежит в диапазоне 25÷80 Па.

2. Плотность капсул в вакуумном тоннеле, при использовании существующих традиционных технических решений, является определяющим параметром, влияющим на величину оптимального давления эксплуатации вакуумного транспорта. Чем больше плотность

капсул, тем ниже граница по давлению. И наоборот, чем меньше транспортных капсул в пути, тем большее давление является энергетически и экономически обоснованным.

3. Для повышения общей транспортной эффективности вакуумного транспорта необходимо проведение комплексной оптимизации её параметров в каждом конкретном случае на основе новых, и нетрадиционных технических решений. Подобная оптимизация может быть успешно проведена при предложенных методических подходах с помощью используемых и описанных в статье программно-технических комплексов.

### **Библиографический список**

1. ET3 online education / The website of the Evacuated Tube Transport Technology. [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://et3.eu/et3-online-education.html> (дата обращения 27.08.2016).

2. Зайцев А. А. Транспорт на магнитном подвесе / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова; под ред. А. А. Зайцева. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 160 с.

3. Technical-economical comparison of Maglev and High Speed Systems / The website of the Transportation and Infrastructure Committee [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://archives.republicans.transportation.house.gov/Media/File/110th/Rail/3-20-07-roundtable-Brady-dornier.pdf> (дата обращения: 27.08.2016).

4. Горлатов А. С. Оценка вакуумных установок на натекание воздуха через неплотности. // Технол. процессы и оборуд. рыбообработывающих предприятий: Сб. науч. тр. КТИРПХ. – Калининград, 1982. – Вып. 98. – С. 44-51.

5. Розанов Л. Н. Вакуумная техника: Учеб. для вузов по спец. «Вакуумная техника». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 320 с.

6. Стенд для снятия характеристик вакуумных насосов / Сайт ООО НПП "СПЛАВ" [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://vacuumsplav.ru/> (дата обращения 31.08.2016).

7. Винтовые вакуумные насосы SVC / Сайт ООО «Вактрон» [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://techeiscatel.ru/> (дата обращения 31.08.2016).

8. ГОСТ Р 53130-2008. «Безопасность аттракционов. Общие требования», – Москва : Стандартинформ, 2009. – 131 с.

9. Справочник по системотехнике / под ред. Р. Макола, перевод с английского под ред. А. В. Шилейко. – М: Советское радио, 1970. – 688 с.

10. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. – М., Транспорт. 1987. – 479 с.

11. Терентьев Ю. А. К вопросу выбора диапазона рабочих параметров вакуумного магнитолевитационного транспорта / Ю. А. Терентьев, В. М. Фомин, Д. Г. Наливайченко // XI международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, КВЦ «Сокольники», 12-14 апреля, 2016.

12. Терентьев Ю. А. Вакуумный магнитолевитационный транспорт по технологии ET3 «Evacuated Tube Transport Technologies» - новые горизонты транспортной эффективности. // Сб. докладов Международной научно-практической конференции «Транспортные системы: тенденции развития», Москва, МИИТ, 26 - 27 сентября, 2016. (в печати)

## References

1. ET3 online education. URL: <http://et3.eu/et3-online-education.html> (27.08.2016).

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

3. *Technical-economical comparison of Maglev and High Speed Systems* URL: <http://archives.republicans.transportation.house.gov/Media/File/110th/Rail/3-20-07-roundtable-Brady-dornier.pdf> (27.08.2016).

4. Gorlatov A. S. *Tehnol. processy i oborud. ryboobrabatyvajushhih predpriyatij: Sb. nauch. tr. KTIRPH – Technological processes and equipment, processing facilities: Collection of scientific papers KTI*, Kaliningrad, 1982, vol. 98, pp. 44–51.

5. Rozanov L. N. *Vakuumnaja tehnika: Ucheb. dlja vuzov po spec. "Vakuumnaja tehnika"* [Vacuum Technology: Proc. for by special institutions. "Vacuum Technology"]. Moscow, 1990. 320 p.

6. *Stand dlja snjatija harakteristik vakuumnyh nasosov* (Stand for the characterization of vacuum pumps). URL: <http://vacuumsplav.ru/> (31.08.2016).

7. *Vintovye vakuumnye nasosy SVC* [Screw vacuum pumps SVC]. URL: <http://techeiscatel.ru/> (31.08.2016).

8. GOST R 53130-2008. Safety of attractions.

9. Mac'ol R. *Spravochnik po sistemotehnike* [Handbook of systems engineering]. Moscow, 1970. 688 p.

10. Schahunjanz G. M. *Zheleznodorozhnyj put'* [Railway track]. Moscow, 1987. 479 p.

11. Fomin V. M., Zvegintsev V. I., Nalivaichenko D. G. & Terent'ev Y. A. K voprosu vybora diapazona rabochih parametrov vakuumnogo magnitolevitacionnogo transporta [To the question of the choice of range of operating parameters of the vacuum magnetic levitation transport] *XI mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "Vakuumnaja tehnika,*

*materialy i tehnologija*” (XI international scientific and technical conference "Vacuum equipment, materials and technology"). Moscow, 2016.

12. Terent'ev Y. A. Vakuumnyj magnitolevitacionnyj transport po tehnologii ET3 “Evacuated Tube Transport Technologies” - novye gorizonty transportnoj jeffektivnosti [Vacuum magnetic levitation transport technology ET3 "Evacuated Tube Transport Technologies - new horizons of transport efficiency] *Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija “Transportnye sistemy: tendencii razvitija”* (International scientific-practical conference "the Transport system: development trends"). Moscow, 2016.

**Сведения об авторах:**

ФОМИН Василий Михайлович, доктор физико-математических наук, академик РАН, научный консультант Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

E-mail: fomin@itam.nsc.ru

ЗВЕГИНЦЕВ Валерий Иванович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

E-mail: zvegin@itam.nsc.ru

НАЛИВАЙЧЕНКО Денис Геннадьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

E-mail: denis@itam.nsc.ru

ТЕРЕНТЬЕВ Юрий Алексеевич, независимый эксперт, официальный представитель «Evacuated tube transport technology» (ET3) в России

E-mail: teren\_y@mail.ru

**Information about authors:**

Vasily M. FOMIN, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Member of the Russian Academy of Science, scientific consultant of the Institute, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

E-mail: fomin@itam.nsc.ru

Valery I. ZVEGINTSEV, Doctor of Engineering Sciences, chief scientific officer, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

E-mail: zvegin@itam.nsc.ru

Denis G. NALIVAICHENKO, Candidate of Engineering Sciences, researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

E-mail: denis@itam.nsc.ru

Yuriy A. TERENCEV, Independent expert, official representative of the “Evacuated tube transport technology” (ET3) in Russia

E-mail: teren\_y@mail.ru

УДК 338.47

**Е. А. Котова**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **НАПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Дата поступления: 31.07.2016

Решение о публикации: 30.08.2016

Дата публикации: 30. 09.2016

**Аннотация: Введение.** Проводимые в настоящее время структурные преобразования железнодорожного транспорта коренным образом меняют механизмы управления процессами его функционирования. Осуществляемая в настоящее время в ОАО «РЖД» структурная реформа затрагивает все уровни управления и все сферы её деятельности. Ключевым методом реализации реформы при этом является создание конкуренции в секторе железнодорожных перевозок.

**Цель.** Цель статьи – оценить возможности создания конкурентных преимуществ железнодорожного транспорта в результате внедрения концепции стратегических инноваций. В статье рассмотрены: 1) особенности инновационного развития железнодорожного транспорта; 2) концепция стратегических инноваций как ресурс ускорения роста корпораций и снижения конкуренции за счет новых бизнес-моделей; 3) направления и объемы финансирования инновационного процесса ОАО «РЖД»; 4) технологическое обеспечение реализации инновационной программы холдинга.

**Методология.** Для достижения поставленной цели использовались такие общенаучные методы, как анализ и синтез, обобщение, аналогия, сравнение, системный подход.

**Результаты.** В статье обозначены основные направления развития железнодорожного транспорта в соответствии с инновационной стратегией ОАО «РЖД». Альтернативой является реализация концепции стратегических инноваций.

**Практическая значимость.** Описанная в статье концепция стратегических инноваций может получить практическое применение при изменении стратегических целей и приоритетов развития холдинга.

**Заключение.** Предприятия и компании вынуждены в условиях современного рынка искать новые подходы к управлению, способные обеспечить им конкурентные преимущества. Стратегия развития железнодорожного транспорта помимо строительства новых железнодорожных линий и модернизации инфраструктуры предполагает также качественное обновление подвижного состава, повышение качества перевозочных услуг, их эффективности и безопасности. Для ОАО «РЖД» в этом контексте перспективными являются развитие кадрового потенциала, переход на инновационное развитие. И одной из методик повышения конкурентоспособности и эффективности деятельности компании, имеющих перспективу практического применения, является концепция управления стратегическими инновациями.

**Ключевые слова:** инновации, инновационный менеджмент, стратегия, стратегическая инновация, конкуренция, железнодорожный транспорт.

**Evgeniia A. Kotova**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

## DIRECTIONS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF RAILWAY TRANSPORT

**Abstract: Introduction.** The reform of railway transport radically changes forms and methods of business process management. This reform of JSC "Russian Railways" affects all levels of management and all types of activity. The key method of reform realization is competition development in the sector of railway transportation.

**Purpose.** The purpose of the article is to identify possibilities of railway transport competitive advantages development as a result of strategic innovations conception applying. In the paper are considered: features of railway transport innovative development; strategic innovations conception as a base of corporation growth and decline of competition level as a result of new business models; directions and volume of financing of innovative process in JSC "Russian Railways"; technological providing of company's innovative strategy realization.

**Methodology.** For achievement of the research purpose general scientific methods were applied, such as: system approach, analysis and synthesis, comparison.

**Results.** In the article main directions of railway transport development according to innovative strategy of JSC "Russian Railways" are considered. The alternative way is realization of strategic innovations conception.

**Practical importance.** Strategic innovations conception which described in the article may be used in JSC "Russian Railways" when changing of strategic aims and priorities of company development.

**Conclusion.** In the conditions of modern market enterprises and companies have to search new management forms and methods to provide their competitive advantages. Railway transport development strategy supposes rolling stock updating, rising of transportation services quality, efficiency and safety, building of new railway lines and transport infrastructure modernization. For JSC "Russian Railways" in this context the main perspectives are development of human resources potential, assing to innovative development. Strategic innovations conception is one of the ways of company's competitiveness and efficiency increasing, having a perspective of practical application.

**Keywords:** innovation, innovation management, strategy, strategic innovations, competition, railway transport

### Введение

Железнодорожный транспорт в Российской Федерации имеет исключительное значение в жизнеобеспечении многоотраслевой экономики и реализации социально-значимых услуг по перевозке пассажиров и грузов. В силу природно-климатических и политико-экономических условий нашей страны, ее огромных сухопутных пространств он несет основную нагрузку по перевозкам.

Компания ОАО «РЖД» является крупнейшим системообразующим элементом российской экономики, важнейшим звеном транспортной системы страны, осуществляющим более 40% грузооборота и свыше 35% пассажирооборота транспорта общего пользования в России. Таким

образом, можно констатировать ключевую роль ОАО «РЖД» в обеспечении транспортного сообщения страны, а также ее безопасности, обеспечение единства социально-экономического пространства страны в силу стягивания территории.

Миссия компании заключается в удовлетворении рыночного спроса на железнодорожные перевозки, а также в повышении эффективности деятельности, качества услуг и глубокой интеграции в евроазиатскую транспортную систему. Главная цель общества – обеспечение потребностей в железнодорожных перевозках и получение прибыли – достигается путем функционирования общества в следующих сферах:

- пассажирские перевозки (в дальнем и пригородном сообщении),
- грузовые перевозки,
- строительство инфраструктурных объектов,
- ремонт подвижного состава,
- предоставление услуг частным перевозочным компаниям: услуги инфраструктуры, услуги локомотивной тяги и др.
- НИОКР,
- услуги социальной сферы.

Такие масштабные изменения затрагивают всю систему базисных принципов транспортного комплекса России и требуют определения новых целей, задач, новой стратегии функционирования в современных условиях [11] и построения адекватной эффективной системы управления компанией.

## **1. Особенности инновационного развития железнодорожного транспорта**

Инновационное развитие ОАО «РЖД» осуществляется в соответствии с задачами, которые определены стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года.

Для разработки программы инновационного развития требуется адекватная оценка существующего технологического уровня компании в сравнении с конкурентами в России и за рубежом. Рекомендации по разработке программ инновационного развития, утверждённые решением правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям, предусматривают проведение независимого комплексного и документированного анализа, включая оценку относительно доступных лучших аналогов.

ОАО «РЖД» при формировании программы инновационного развития будет стремиться максимально использовать все созданные к настоящему времени научно-технические достижения и имеющийся научно-технический и интеллектуальный потенциал. При этом программа инновационного развития должна быть интегрирована в бизнес-стратегию развития компании [4].

Одной из развивающихся и активно применяемых концепций, связанных с проведением комплексных организационных инноваций, является концепция стратегических инноваций. Основатели данной концепции, М. Меллер, К. Столла, А. Дужак и др. [16], связывают ее со стратегическим и инновационным поведением компании. Другой особенностью стратегических инноваций является их сквозной общеорганизационный характер. В то время как обычные инновации направлены на создание новых товаров, новых бизнес-процессов, новых технологий управления по отдельности, новых рынков, стратегические инновации предполагают изменения сразу во всех этих компонентах и требуют системного подхода к выбору вариантов развития компании [14].

Цели инвестиционной деятельности ОАО «РЖД», были уже отмечены ранее. Задачи на краткосрочную перспективу определены инвестиционной программой ОАО «РЖД» и включают:

- количественное и качественное обновление подвижного состава ОАО «РЖД», инвестиционная стратегия источник инвестор
- повышение качества обеспечивающей инфраструктуры железных дорог за счет внедрение в ее систему ее эксплуатации возможностей для пропуска высокоскоростных пассажирских и тяжеловесных грузовых поездов, а также поездов с новыми габаритами,
- ликвидация «узких мест» по основным перевозочным направлениям за счет строительства параллельных линий, развития системы станций, модернизации обеспечивающей перевозки инфраструктуры,
- обеспечение надежности и безопасности процесса перевозок в ходе эксплуатации железнодорожной инфраструктуры за счет снижения износа основных средств, повышения надежности работы оборудования различных типов, используемого в перевозочном процессе и приведение их в соответствие современным требованиям.

## **2. Направления финансирования инновационного процесса ОАО «РЖД»**

Программа инновационного развития реализует следующие стратегические направления инновационного развития компании:

- система управления перевозочным процессом и транспортная логистика;
- инфраструктура;
- подвижной состав;
- система управления и обеспечения безопасности движения поездов, снижение рисков чрезвычайных ситуаций;
- повышение надежности работы и увеличение эксплуатационного ресурса технических средств;
- высокоскоростное движение и инфраструктура;

- корпоративная система управления качеством;
- повышение экономической эффективности основной деятельности;
- повышение энергетической эффективности основной деятельности;
- система технического регулирования;
- охрана окружающей среды;
- внедрение инновационных спутниковых и геоинформационных технологий.

Таблица 1. Объем финансирования основных направлений инновационного развития ОАО «РЖД» 2013-2015гг.

Основное направление	Объем финансирования направления, млн. руб.		
	2013	2014	2015
Система управления перевозочным процессом и транспортная логистика	1878,1	777,4	831,9
Инфраструктура	17762,3	13893,5	14087,2
Подвижной состав	97826,0	69908,1	64828,4
Система управления и обеспечения безопасности движения поездов, снижение рисков чрезвычайных ситуаций	1597,9	1213,9	1820,3
Повышение надежности работы и увеличение эксплуатационного ресурса технических средств	204,2	130,9	85,3
Высокоскоростное движение и инфраструктура	21,2	8012,9	6355,5
Корпоративная система управления качеством	1,9	-	-
Повышение экономической эффективности основной деятельности	14136,4	17155,4	18259,9
Повышение энергетической эффективности основной деятельности	711,2	774,6	364,7
Охрана окружающей среды	668,1	561,7	361,4
Система технического регулирования	59,6	-	4,5
Внедрение инновационных спутниковых и геоинформационных технологий	1051,4	1414,7	4947,0
<b>ИТОГО по основным направлениям</b>	<b>135918,3</b>	<b>113843,0</b>	<b>111946,3</b>



Рис. 1. Основные направления финансирования инновационного процесса ОАО «РЖД», млн. руб.

В общем объёме финансирования основных направлений инновационного развития большая часть средств вкладывается в развитие инфраструктуры, приобретение и модернизацию подвижного состава, а также на повышение экономической эффективности основной деятельности. Большое внимание уделяется развитию высокоскоростного железнодорожного транспорта, что определено стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года и указом Президента Российской Федерации от 16 марта 2010 г. №321. С 2013г. до 2015 основная часть средств идет на приобретение подвижного состава, с каждым годом объём финансирования уменьшается и в 2015г. он составил 64828,4 млн. руб., что на 33 млрд. руб. меньше чем в 2013г. В области внедрения инновационных спутников и геоинформационных технологий с каждым годом увеличиваются вложения, так, в 2015г. они составляют 4947 млрд. руб., что на 4 млрд. руб. больше, чем в 2013г.

Не менее важным направлением инновационной деятельности компании является энергосбережение и повышение энергоэффективности.

Энергоэффективность является одним из главных факторов развития холдинга «РЖД», в том числе в обеспечении его конкурентных преимуществ на транспортном рынке. В этих целях в компании разработана

«Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на период до 2015 г. и на перспективу до 2030 г.».

Реализация направлений Энергетической стратегии ОАО «РЖД» позволит обеспечить решение задачи по снижению энергоемкости валового внутреннего продукта в 2007-2020 годах на 40% и формирование в России энергоэффективного общества.

В связи с этим, приоритетными задачами Энергетической стратегии определены:

- надежное энергетическое обеспечение всех сфер деятельности компании;
- значительное снижение энергоемкости перевозочного процесса;
- оптимизация энергетических затрат в стационарной энергетике;
- снижение рисков в энергообеспечении железнодорожного транспорта;
- минимизация техногенного воздействия железнодорожной энергетики на окружающую среду.

Компания при осуществлении своей деятельности несет ответственность также и за экологическую безопасность [7], здоровье человека и благополучие окружающей среды. В ОАО «РЖД» принята и реализуется «Экологическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2015 г. и на перспективу до 2030 г.», в которой предусматриваются следующие стратегические ориентиры в области экологии:

- снижение негативного воздействия на окружающую среду на 35% к 2015 году и на 70% к 2030 году;
- внедрение эффективных ресурсосберегающих природоохранных технологий и экологически чистых материалов, рациональное использование природных ресурсов;
- повышение экологической безопасности и социальной ответственности деятельности компании.

В настоящее время обеспечение экологической безопасности ОАО "РЖД" характеризуется устойчивой динамикой снижения негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду, в первую очередь, за счет реализации экологических программ, инвестиционных проектов и технического перевооружения, а также совершенствования действующей системы управления природоохранной деятельностью.

### **3. Технологическое обеспечение реализации инновационной программы**

Инструментом реализации указанных государственных приоритетов призвана стать технологическая платформа (рис. 2), инициированная ОАО «РЖД» и являющаяся составной частью программы инновационного развития компании.

Программа содержит перечень основных групп технологий, которые предполагается развивать в рамках технологической платформы, перечень секторов экономики, на которые предполагается воздействие этих технологий, приведены стратегические направления исследований и разработок с описанием основных мероприятий по созданию и обеспечению деятельности технологической платформы.



Рис. 2. Основные задачи программы, решаемые в рамках технологической платформы.

## Заключение

Предприятия и компании вынуждены в условиях современного рынка постоянно искать новые подходы к управлению, способные обеспечить им конкурентные преимущества. Одной из концепций, направленных на повышение эффективности управления инновациями и создание стратегических конкурентных преимуществ, является концепция стратегических инноваций.

Основным направлением деятельности ОАО «РЖД» является предоставление услуг инфраструктуры и локомотивной тяги, а также аренды подвижного состава. Стратегия развития железнодорожного транспорта помимо строительства новых железнодорожных линий и модернизации инфраструктуры предполагает также количественное и качественное обновление подвижного состава, повышение качества перевозочных услуг, их эффективности и безопасности. Реализация стратегии должна обеспечить повышение эффективности железнодорожного транспорта, интеграцию российской сети железных дорог в евроазиатскую сеть, повышение конкурентоспособности российской экономики, а также привлекательность железнодорожной отрасли для вложения частных инвестиций.

Для ОАО «РЖД» в этом контексте перспективными являются следующие направления внедрения инноваций: развитие кадрового потенциала, формирование источников развития холдинга «РЖД» для обеспечения потребностей в перевозках, переход на инновационное развитие, укрепление рыночных позиций. И одной из методик повышения конкурентоспособности и эффективности деятельности компании, имеющих перспективу практического применения, является концепция управления стратегическими инновациями.

## Библиографический список

1. Белозеров В. Л. Экономика транспорта: управление в рыночных условиях: монография / В. Л. Белозеров, А. Н. Ефанов, А. А. Зайцев и др. // под ред. О. В. Белого // – СПб.: Изд-во «Наука», 2014. – 204 с.
2. Волкова Е. М. Формирование системы взаимодействия железнодорожной компании с субъектами рынка пригородных пассажирских перевозок: автореферат дисс. на соискание ученой степени к.э.н. – СПб: ПГУПС, 2013. – 24 с.
3. Журавлева Н. А. Развитие рынка услуг железнодорожного транспорта в контексте экономической безопасности России // Экономические науки, 2015. – № 132. – С. 15-19.
4. Журавлева Н. А. Системный подход к формированию эффективной модели железнодорожной отрасли / Н. А. Журавлева, В. Г. Карчик // Экономика железных дорог, 2014. – № 5. – С. 11-27.

5. Зайцев А. А. Механизм формирования высокоэффективных услуг на транспортном рынке России / А. А. Зайцев, А. Н. Ефанов // Известия ПГУПС, 2013. – № 3. – С. 5-17.
6. Красковский А. Е. Постановка экономически обоснованных целей по безопасности движения / А. Е. Красковский, П. А. Плеханов, С. А. Вырков // Экономика железных дорог, 2013. – № 2. – С. 42-48.
7. Лизунова Ю. А. Проблемы управления стратегическими инновациями / Ю. А. Лизунова // Новая наука: Опыт, традиции, инновации, 2015. – № 6. – С. 234-236.
8. Паздерина В. А. Стратегическое управление инновациями / В. А. Паздерина, Т. А. Катаева // Экономика и бизнес: теория и практика, 2015. – № 10. – С. 108-112.
9. Красковский А. Е. Перспективная экономическая стратегия обеспечения безопасности движения в ОАО «РЖД» / А. Е. Красковский, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов, Д. Ю. Барканова // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2011. – № 3 (28). – С. 248-256.
10. Плеханов П. А. Проблема формирования требований к качеству и безопасности перевозочных услуг железнодорожного транспорта / П. А. Плеханов // Экономика железных дорог, 2015. – № 10 – С. 20-27.
11. Соколова Я. В. Проектное управление инновационным развитием транспортной компании / Я. В. Соколова // Транспортное дело России, 2014. – № 5. – С. 50-52.
12. Соколова Я. В. Теоретические и практические аспекты управления инновационными процессами в транспортной компании / Я. В. Соколова // Журнал ун-та водн. коммуникаций. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013.
13. Суетин С. Н. Современные тенденции развития корпораций / С. Н. Суетин, Л. П. Обьедкова, В. А. Матосян, А. Н. Суетин, С. Ю. Ильин // Современные проблемы науки и образования, 2015. – № 1-2. – С. 6.
14. Титов С. А. Стратегические инновации: комплексный подход к созданию конкурентных преимуществ путем инноваций в бизнес-модели компании / С. А. Титов, Н. В. Титова, В. П. Чернышев, Р. Б. Титаренко // Фундаментальные исследования, 2015. – № 10. – С. 193-196.
15. D’Aveni R. A. Hypercompetition: Managing the Dynamics of Strategic maneuvering. New York, Free Press, 1994.
16. Moeller M., Stolla C. & Doujak A. Strategic Innovation: Building New Growth Business. Wien, Beratergruppe Neuwaldegg, Goldegg Verlag, 2008.

## References

1. Belozеров V. L., Yefanov A. N., Zaytsev A. A. & Belyi O. V. *Ekonomika transporta: upravlenye v rinochnikh usloviyah* [Transportation Economy: Management under Conditions of Market]. St. Petersburg, 2014. 204 p.
2. Volkova E. M. *Formirovanie sistemy vzaimodeystviya zheleznodozhnoy kompanii s subjektami rynka prigorodnykh passagirskikh perevozok* [Forming of

Transaction System between Railway Company and Regional Passenger Transportation Market Subjects]. St. Petersburg, 2013. 24 p.

3. Zhuravleva N. A. *Ekonomicheskiye nauki – Economic sciences*, 2015, no. 132, pp. 15–19.

4. Zhuravleva N. A. & Karchik V. G. *Ekonomika zheleznnykh dorog – Economy railways*, 2014, no. 5, pp. 11–27.

5. Zaytsev A. A. & Yefanov A. N. *Izvestiya PGUPS – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2013, no. 3, pp. 5–17.

6. Kraskovskiy A. E. *Ekonomika zheleznnykh dorog – Economy railways*, 2013, no. 2, pp. 42–48.

7. Livanova J. *Novaya nauka: opyt, tradicii, innovacii – New science: experience, traditione, innovation*, 2015, no. 6, pp. 234–236.

8. Pazderina V. A., Kataeva T. A. *Ekonomika i business: teorija i praktika – Economy and business: theory and practice*, 2015, no. 10, pp. 108–112.

9. Kraskovskiy A. E., Plekhanov P. A., Ivanov V. G. & Barkanova D. J. *Izvestiya PGUPS – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2011, no. 3, pp. 248–256.

10. Plekhanov P. A. *Ekonomika zheleznnykh dorog – Economy railways*, 2015, no. 10, pp. 20–27.

11. Sokolova J. V. *Transportnoe delo Rossii – Russian transport business*, 2014, no. 5, pp. 50–52.

12. Sokolova J. V. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij – Water Communications University Journal*, 2013.

13. Sujetin S. N., Objedkova L. P., Matosjan V. A., Sujetin A. N., Iljin S. J. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija – Modern problems of science and education*, 2015, no. 1–2, pp. 6

14. Titov S. A., Titova N. V., Chernyshev V. P. & Titarenko R. B. *Fundamentalnye issledovanija – Fundamental research*, 2015, no. 10, pp. 193–196.

15. D’Aveni R. A. *Hypercompetition: Managing the Dynamics of Strategic maneuvering*. New York, Free Press, 1994.

16. Moeller M., Stolla C. & Doujak A. *Strategic Innovation: Building New Growth Business*. Wien, Beratergruppe Neuwaldegg, Goldegg Verlag, 2008.

**Сведения об авторе:**

КОТОВА Евгения Алексеевна, старший преподаватель кафедры «Экономика транспорта» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
E-mail: kotobuki@bk.ru

**Information about author:**

Evgeniia A. KOTOVA, senior teacher, Department of Transportation Economy, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
E-mail: kotobuki@bk.ru

УДК 656.222

**Г. М. Грошев, А. В. Сугоровский, Ан. В. Сугоровский**  
Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПРИЁМА «ИЗМЕНЕНИЕ ПУНКТОВ СКРЕЩЕНИЯ ИЛИ ОБГОНА ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ УЧАСТКЕ»**

Дата поступления 01.09.2016

Решение о публикации 01.09.2016

Дата публикации 30.09.2016

**Аннотация: Введение.** Важное место в оперативном управлении перевозками на основе плана формирования, графика движения поездов, технических норм использования перевозочных средств и инфраструктуры железных дорог занимает оперативное диспетчерское регулирование эксплуатационной работы.

К настоящему времени недостаточно исследований, которые в полной мере позволяли бы оценить эффективность применяемых диспетчерских регулировочных приёмов на участках, в узлах и сортировочных станциях с учетом специфики их работы и развитости инфраструктуры.

**Цель** обосновать эффективность реализации диспетчерского приёма «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке».

**Метод.** Использован метод имитационного моделирования.

**Результаты.** Установлено, что благодаря применению диспетчерского воздействия «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке» суммарные задержки в ожидании обслуживания меньше в среднем на 60% чем без его использования.

**Практическая значимость.** Результаты исследования будут способствовать повышению эффективности диспетчерского регулирования эксплуатационной работы на участках.

**Ключевые слова:** диспетчерское регулирование, эффективность, имитационное моделирование.

**Gennady M. Groshev, Artyom V. Sugorovsky, Anton V. Sugorovsky**  
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
THE EFFICIENCY OF THE CONTROL METHOD OF “CHANGING THE  
POINTS OF CROSSING OR OVERTAKING OF FREIGHT TRAINS ON THE  
RAILWAY SECTION”

**Abstract:** An important place in the operational management of traffic on the basis of plan formation, train schedule, technical regulations on the use of vehicles and railway infrastructure is operational control operational regulation.

To date, not enough research which would allow to evaluate the effectiveness of dispatch adjustment techniques in areas in the nodes and marshalling yards, given the nature of their work and infrastructure development.

**Goal:** to prove the effectiveness of the control method of "Changing the points of crossing or overtaking of freight trains in the area".

**Method:** simulation.

Since the simulation of station processes enables a comparison of idle time between operations on options: using the adjustment of intake and without its application, we investigated the feasibility and practical significance of its application, based on the goal of reducing the magnitude of the idle time between operations.

**Results:** it was found that the application of the dispatch of the impact of the Change points of crossing or overtaking of freight trains in the area," the total delay in waiting for service is less than an average of 60% than without using it.

**Practical significance of the research:** the research results will contribute to improving the efficiency of the dispatching regulation and maintenance in the areas.

Research and define the operational and economic efficiency of application of the adjusting dispatching of methods in areas at the nodes and marshalling yards will increase the effectiveness of Supervisory regulation, as a result, each of the independent participants will receive a specific economic benefit.

**Keywords:** supervisory control, efficiency, simulation.

## **Введение**

Важное место в оперативном управлении перевозками на основе плана формирования, графика движения поездов и технических норм использования перевозочных средств и инфраструктуры железных дорог занимает оперативное диспетчерское регулирование эксплуатационной работы [1,2,3].

К настоящему времени недостаточно исследований, которые в полной мере позволяли бы оценить эффективность применяемых диспетчерских регулировочных приёмов на участках и в узлах с учетом специфики их работы и развитости инфраструктуры [4,5].

В данной статье методом имитационного моделирования обоснована эффективность реализации диспетчерского приёма «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке» на однопутном участке. При моделировании учтена неравномерность поступления поездов с внешней сети, для чего используются методы теории вероятностей [6,7].

### **1. Описание реализации приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке»**

На железнодорожных участках при решении вопроса о том, какой из двух приближающихся к станциям поездов задержать, а какой пропустить без остановки, как и при выборе станции скрещения или обгона, диспетчер

должен не только обеспечить минимум задержки поездов, но и сопоставить ожидаемый от применения регулировочных мер результат с действующим графиком и сменным планом, не допустить срыва поездов с графика по проследованию. При этом необходимо запланировать рациональное использование имеющихся регулировочных резервов для повышения участковой скорости.

На рисунке 1 представлен пример изменение схемы и пунктов скрещения [1].

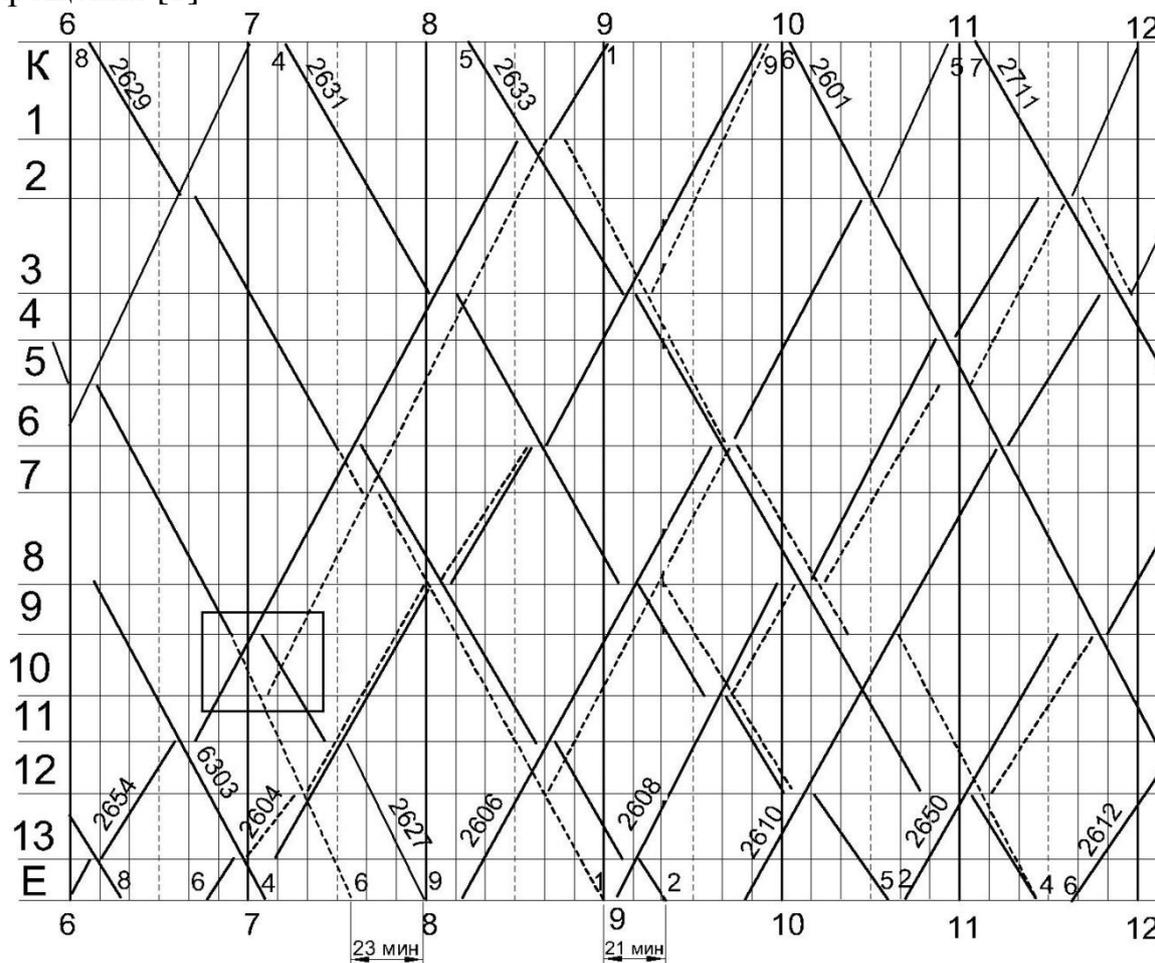


Рис. 1. Фрагмент графика движения поездов

На рисунке штриховыми линиями изображен план пропуска поездов на участке при переносе скрещения поездов № 2627 и 2654 со станции 9 на станцию 10. Изменение решения данной частной конфликтной ситуации позволяет диспетчеру в зоне двух перегонов выиграть всего 1 мин; изменение решения следующей конфликтной ситуации – скрещения поездов № 2627 и 2604 на станции 11 с его переносом на станцию 12 – увеличивает выигрыш до 23 мин; а изменения в пропуске поездов 2629, 2604 и 2606 между станциями 5—E позволяют выиграть еще 21 мин за счет ускорения продвижения поезда № 2629. В результате общий выигрыш увеличился с 1 до 44 мин.

Этот пример показывает эффективность данного регулировочного мероприятия.

Алгоритм реализации приёма «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке» представлен на рисунке 2.

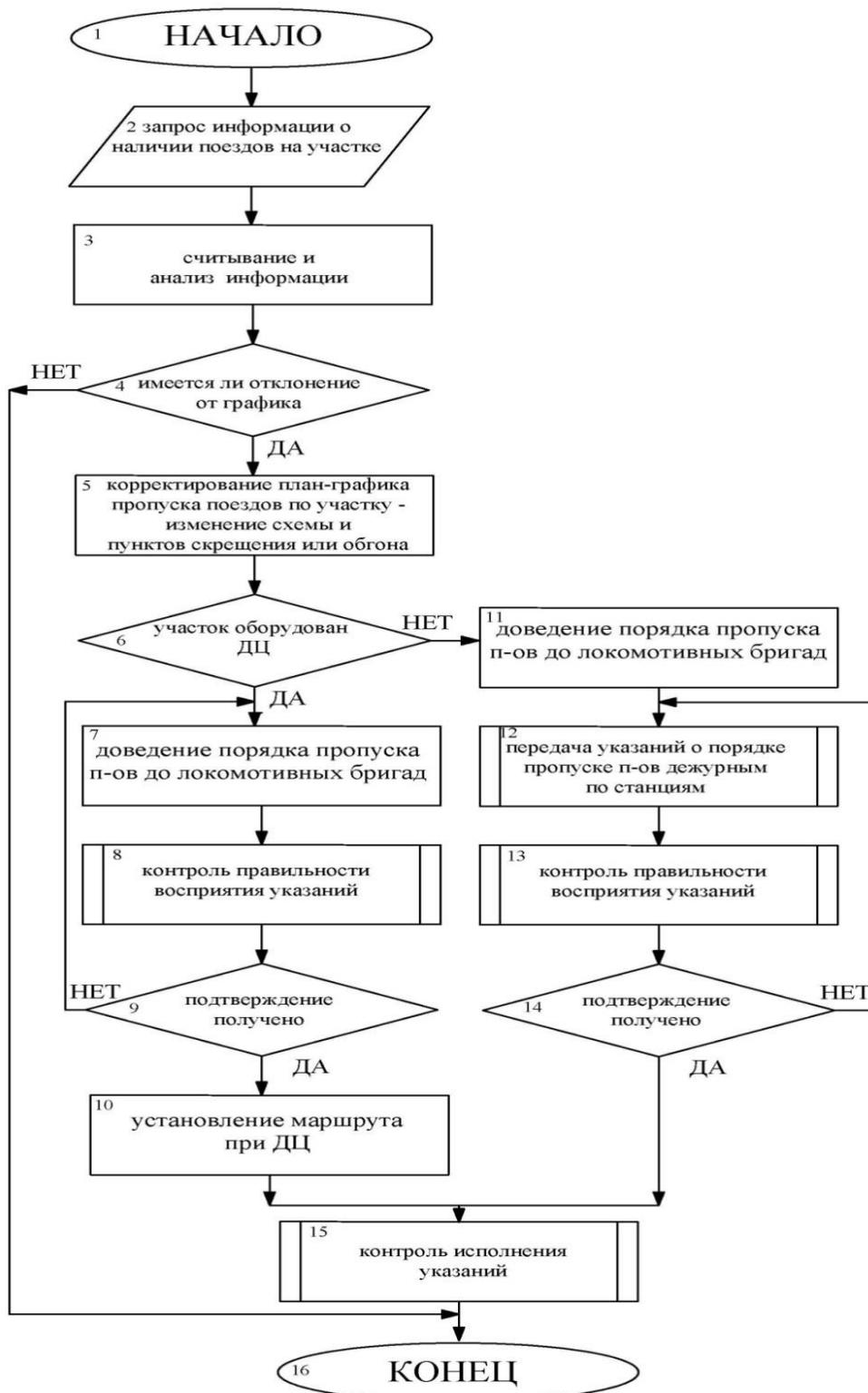


Рис. 2. Алгоритм реализации приёма «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке»

## **2. Имитационное моделирование реализации приема диспетчерского регулирования «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке»**

Имитационное моделирование выполнено с использованием специализированного программного комплекса «Моделирование работы транспортных систем» (АwгогаW), разработанного в ПАО «Ленгипротранс» для определения количественных параметров основных устройств (числа путей, парков, параллельных ходов в горловинах, бригад, обслуживающих поезда, локомотивов, грузовых фронтов и др.), а также для определения пропускной и перерабатывающей способности станционных комплексов с возможностью выявления узких мест, вызывающих задержки и снижающих скорость продвижения транзитных вагонопотоков.

Основным принципом работы программы имитационного моделирования является последовательное составление графика занятия основных элементов транспортной системы в режиме реального времени с интервалом, равным 1 минуте, на 30 смежных суток, отличающихся друг от друга только временем поступления поездов с внешней сети. За каждые расчетные сутки определяется суммарное время задержек поездов перед каждым обслуживающим устройством и в целом по рассматриваемой транспортной системе.

Во-первых, в программе создаётся модель транспортной системы с соответствующим её техническим состоянием (количество сортировочных систем, число путей в парках и т.п.) и технологическим обеспечением (число бригад осмотрщиков вагонов, количество локомотивов и т.п.). Далее в созданной модели транспортной системы посредством логических цепочек описывается технология работы, базирующаяся на типовом технологическом процессе её работы [8,9,10,11,12].

В объектную модель включены следующие

- устройства: главный путь, чётный/нечётный перегон, боковые пути;
- и категории: грузовые поезда чётного и нечётного направлений.

Графики занятия основных элементов разъезда (типичные сутки) без применения приёма и с его использованием приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

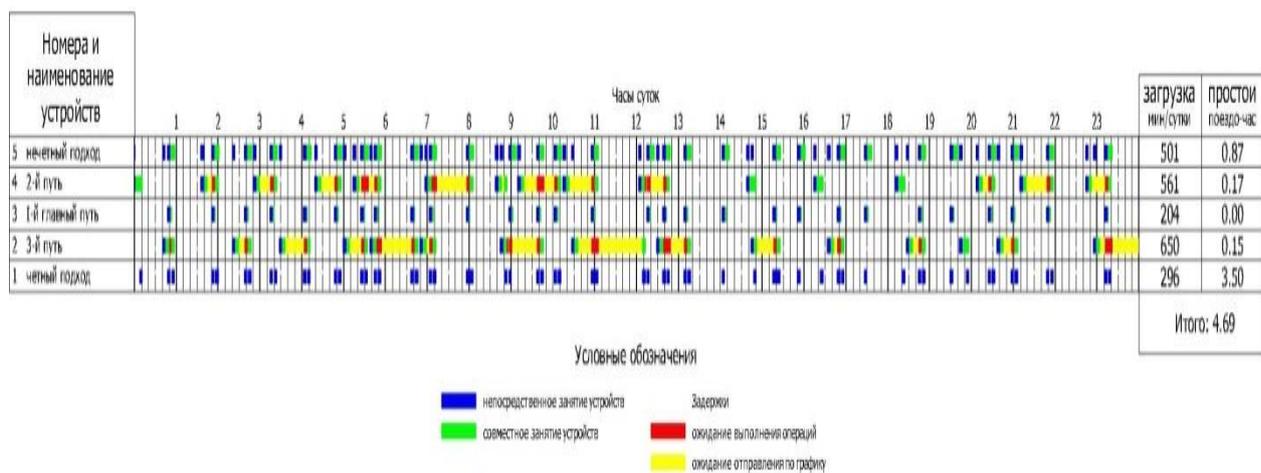


Рис. 3. График занятия основных элементов разъезда (типичные сутки) без применения приёма «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке»

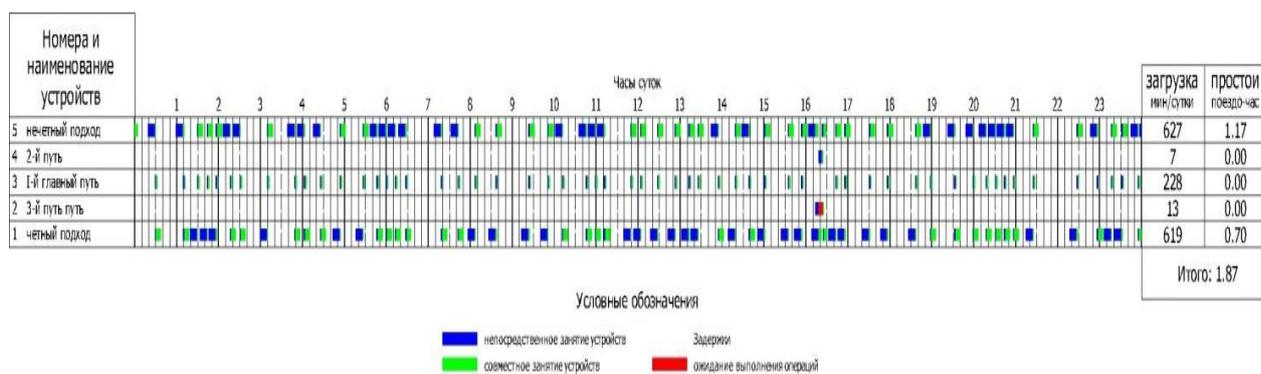


Рис. 4. График занятия основных элементов разъезда (типичные сутки) с применением приёма «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке»

В результате экспериментов с моделью определены суммарные задержки в ожидании обслуживания за каждые сутки в течение года без применения приёма «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке» и с его использованием. На рисунке 5 представлены графики изменения этих задержек.

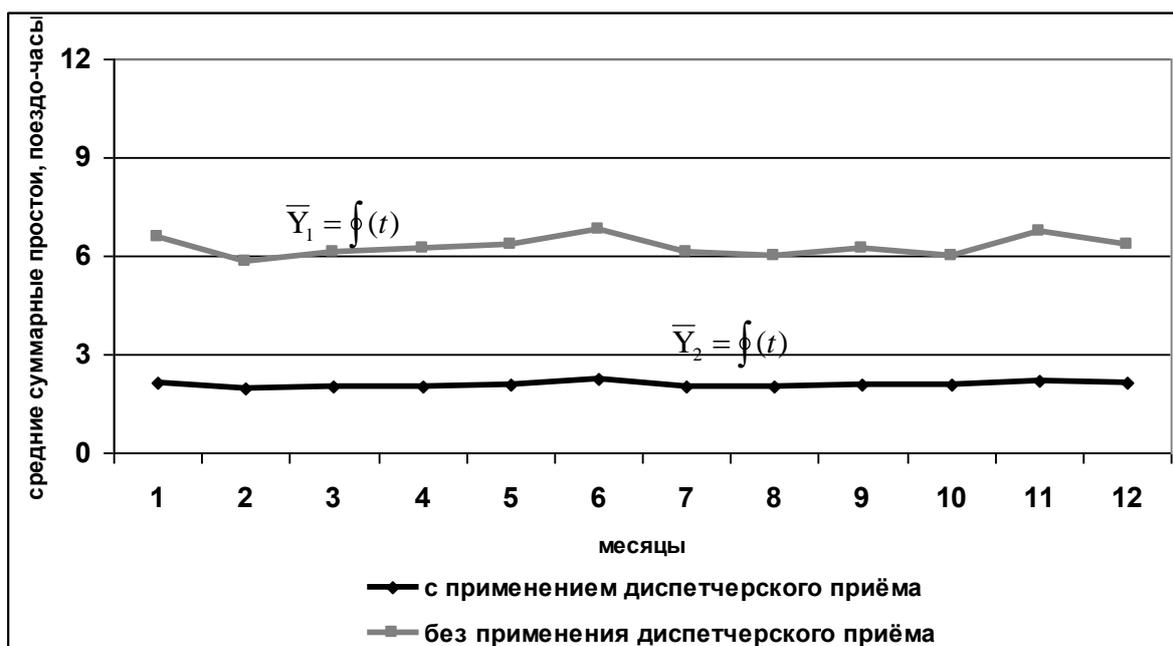


Рис. 5. Графики изменения средних суммарных задержек в ожидании обслуживания в течение года без применения приёма «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке» и с его использованием

Из рисунка 5 видно, что благодаря применению диспетчерского приёма суммарные задержки в ожидании обслуживания меньше в среднем на 60% чем без его использования.

## Заключение

В настоящей статье обоснована эффективность реализации диспетчерского приёма «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке», с использованием имитационного моделирования.

В результате экспериментов с моделью установлено, что благодаря применению диспетчерского воздействия «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» суммарные задержки в ожидании обслуживания меньше в среднем на 60% чем без его использования.

## Библиографический список

1. Грошев Г. М. Пособие поездному диспетчеру и дежурному по отделению / Г. М. Грошев, В. А. Кудрявцев, Г. А. Платонов, А. Д. Чернюгов. – М.: Транспорт, 1992. – 368 с.
2. Ефименко Ю. И. Железнодорожные станции и узлы. Дополнительные разделы / Ю. И. Ефименко, С. И. Логинов, П. К. Рыбин,

М. В. Стрелков, А. В. Суторовский; под ред. Ю. И. Ефименко. – Спб.: ПГУПС, 2014. – 144 с.

3. Campagna A. 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 IIIС Project Port-Net, 2006. – p.78-86.

4. Суторовский Ан. В. Обоснование целесообразности применения методов и приёмов организации работы с вагонопотоком на сортировочной станции // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2013. – Вып. 2 (35). – С. 74-81.

5. Суторовский А. В. Развитие информационных технологий для повышения эффективности регулирования вагонопотоком // Транспортные системы и технологии, 2015. – № 2 (2). – С. 26-37.

6. Galvez-Fernandez C. 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.

7. Грошев Г. М. Имитационное моделирование оперативного регулирования на сортировочной станции / Г. М. Грошев, А. В. Суторовский // Вестник транспорта Поволжья, 2013. – № 6 (42). – С. 10-15.

8. Суторовский А. В. Подготовка исходных данных для ввода в имитационную модель функционирования пассажирской технической станции // Известия петербургского университета путей сообщения, 2010. – № 1. – С. 11-21.

9. Суторовский А. В. Методы рационализации работы с вагонопотоком на сортировочной станции // Вестник транспорта Поволжья, 2013. – №3 (39). – С. 44-53.

10. Ioannou Petros A. Intelligent freight transportation / Petros A. Ioannou // CRC Press Publ., 2008. – 342 p. ISBN: 13:978-0-8493-0770-6.

11. Multimodal network design and assessment / Brands T. // 11th TRAIL Congress research, November, 2010. – pp. 1-5.

12. Грошев Г. М. Диспетчерское регулирование на сортировочной станции / Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, Ан. В. Суторовский, М. М. Магомедов // Железнодорожный транспорт, 2016. – №2. – С. 47-54.

## References

1. Groshev G. M., Kudryavtsev V. A., Platonov G. A. & Chernigov A. D. Manual train dispatcher and duty officer Department. Moscow, 1992. 368 p.

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

3. 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.

4. Sugorovsky An. V. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya – Proceedings of the St. Petersburg University of Railways*, 2013, vol. 2 (35), pp. 74–81.

5. Sugorovsky Anton V. *Transportnye sistemy i tekhnologii – Transportation systems and technology*, 2015, no. 2 (2), pp. 26–37. URL: <http://www.transstyst.ru/2razdel-1-3-Sugorovskiy.html.html> (11/05/2016).

6. 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*

7. Groshev G. M. & Sugorovsky A. V. *Vestnik transporta Povolzh'ya – Volga transport Herald*, 2013, vol. 6 (42), pp.10–15.

8. Sugorovsky A. V. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya – Proceedings of the St. Petersburg University of Railways*, 2010, no. 1, pp. 11–21.

9. Sugorovsky A. V. *Vestnik transporta Povolzh'ya – Volga transport Herald*, 2013, no. 3 (39), pp. 44–53

10. Ioannou Petros A. *Intelligent freight transportation*, CRC Press Publ., 2008. 342 p.

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

12. Groshev G.M., Kotenko A.G., Suvorovskiy A.V. & Magomedov M.M. *ZHeleznodorozhnyj transport – Railway transport*, 2016, no. 2, pp. 47–54.

#### **Сведения об авторах:**

ГРОШЕВ Геннадий Максимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, e-mail: [spbgroshev@gmail.com](mailto:spbgroshev@gmail.com)

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

СУГОРОВСКИЙ Антон Васильевич, ассистент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
E-mail: [gthdsq555@yandex.ru](mailto:gthdsq555@yandex.ru)

**Information about author:**

Gennady M. GROSHEV, Doctor of technical Sciences, Professor, Professor of the Department «Management of operational work», the Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

E-mail: [spbgroshev@gmail.com](mailto:spbgroshev@gmail.com)

Artyom V. SUGOROVSKY, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department «Railway stations and units», the Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

E-mail: [c123945@yandex.ru](mailto:c123945@yandex.ru)

Anton V. SUGOROVSKY, Assistant of the Department «Management of operational work», the Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

E-mail: [gthdsq555@yandex.ru](mailto:gthdsq555@yandex.ru)

**Е. М. Волкова**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **ВЫБОР МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ПРИГОРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ МИРОВОГО ОПЫТА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК**

Дата поступления: 18.07.2016

Решение о публикации: 30.08.2016

Дата публикации: 30.09.2016

**Аннотация: Введение.** Процесс реформирования железнодорожного транспорта привел к выделению пригородных пассажирских перевозок и обособлению данного вида деятельности в рамках пригородных пассажирских компаний (ППК). В своей деятельности ППК сталкиваются с целым рядом проблем, одной из которых является недофинансирование со стороны субъектов РФ.

**Цель.** Цель статьи – выявление общих тенденций и отличительных особенностей развития региональных пассажирских перевозок в различных странах по итогам обзора мирового опыта, в том числе особенностей взаимодействия региональных перевозчиков с органами государственной власти. Обзор проводится по следующим основным аспектам: 1) наличие или отсутствие конкуренции на рынке пригородных перевозок; 2) формы собственности на инфраструктуру и подвижной состав; 3) принадлежность самих перевозчиков государству или частным собственникам; 4) модели финансирования пригородных компаний; 5) возможности повышения их доходности.

**Методология.** Для достижения поставленной цели использовались такие общенаучные методы, как анализ и синтез, обобщение, аналогия, сравнение, индукция, системный подход.

**Результаты.** В статье выделены и проанализированы основные формы конкуренции на региональных рынках пассажирских перевозок, определены их достоинства и недостатки. Выделены две основные модели развития региональных пассажирских перевозок в мире – конкурентная и государственная.

**Практическая значимость.** Результаты обзора могут быть использованы федеральными и региональными органами власти при выработке регулирующих мероприятий по отношению к железнодорожному пригородному комплексу, разработке нормативно-правовой базы его реформирования и дальнейшего развития.

**Заключение.** Обзор мирового опыта развития региональных пассажирских перевозок следует учитывать при осуществлении преобразований железнодорожного пассажирского комплекса в нашей стране, при этом следует иметь в виду условия функционирования ППК в отдельных регионах России, высокую социальную значимость и исторические аспекты развития пригородных перевозок.

**Ключевые слова:** региональные пассажирские перевозки, пассажирская компания, регионализация, конкуренция, рынок пригородных пассажирских перевозок.

**Elena M. Volkova**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
CHOICE OF REGIONAL PASSENGER TRANSPORTATION  
DEVELOPMENT MODEL BASED ON WORLD-WIDE SURVEY

**Abstract: Introduction.** Regional passenger companies (RPCs) split-off was a result of Russian railways restructuring. Now RPCs have some problems of development, one of them is insufficient funding from regional authorities.

**Purpose.** The purpose of the research is identification of regional passenger transportation general tendencies and features in various countries on the base of international experience survey, including forms of interaction between RPCs and regional authorities. The research is focusing on the following aspects: 1) competition forms at suburban and regional passenger transportation markets; 2) railway infrastructure and vehicles ownership; 3) state or private ownership on regional passenger companies; 4) regional passenger transportation financing schemes; 5) possibilities of regional passenger transportation performance increasing.

**Methodology.** For achievement of the research purpose general scientific methods were applied, such as: analysis and synthesis, generalization, analogy, comparison, induction, system approach.

**Results.** The article has the analysis of competition forms at regional passenger transportation markets. Models of regional passenger transportation development in the world are classified into competition model and regulatory model.

**Practical importance.** Results of the research can be used by regional authorities in case of transportation policy development, transport reforming and further regional passenger transportation improvement.

**Conclusion.** The survey of regional passenger companies development should be considered in case of suburban railway passenger transportation reforming in our country. It must be kept in mind RPCs operating conditions in certain regions of Russia, the high level of social importance and historical aspects of suburban transportations development.

**Keywords:** regional passenger traffic, passenger company, regionalization, competition, regional passenger transportation market.

## **Введение**

В настоящий период в нашей стране происходит формирование новой модели рынка транспортных услуг, частью которого является рынок пригородных пассажирских перевозок. Логика реструктуризации железнодорожной отрасли заключалась в создании условий для развития конкуренции в тех сегментах рынка, где она эффективна и целесообразна. Одним из таких сегментов был признан рынок пригородных перевозок. В настоящий период «блок услуг по пассажирским перевозкам на железных дорогах состоялся как отдельный бизнес» [9], однако по-прежнему деятельность пригородных пассажирских компаний сопряжена с рядом проблем. Вопросам реформирования железнодорожной отрасли и развития рынка транспортных услуг посвящен целый ряд исследований и публикаций отечественных ученых-экономистов и специалистов в области транспорта: М. П. Акулова [1], В. Л. Белозерова [2], Г. В. Верховых [3], А. Н. Ефанова

[8], Н. А. Журавлевой [6], [7], А. А. Зайцева [8], [9], В. Г. Карчика [7], Е. А. Проскураковой [12], [13], М. А. Шнейдера [15], однако недостаточно исследованы возможности адаптации мирового опыта развития региональных пассажирских перевозок к реформированию пригородного транспортного комплекса в нашей стране.

В статье проводится обзор мирового опыта реформирования и функционирования региональных пассажирских перевозок с целью выделения моделей их развития. В основу выделения моделей развития положены такие признаки, как форма собственности на железнодорожную инфраструктуру и подвижной состав, используемый для перевозок пассажиров, формы и методы государственного регулирования и государственной поддержки региональных пассажирских перевозок.

## **1. Формы внутривидовой конкуренции на региональных рынках железнодорожных пассажирских перевозок**

В России к пригородным перевозкам условно относят перевозки любым видом общественного транспорта в пределах 200 км от городской черты. В европейских странах определения «пригородные» перевозки не существует, они носят название «городские» или «региональные» в зависимости от средней дальности поездки. Пригородные (региональные) перевозки осуществляются в основном железнодорожным, автомобильным и в отдельных регионах – внутренним водным транспортом.

В 1991 г. была принята Директива ЕС № 91/440 «О развитии железнодорожного транспорта в Европейском сообществе». Основная идея директивы заключается в том, что транспортную инфраструктуру развивает государство, а операционную деятельность ведет частный капитал. Фактически железные и автомобильные дороги были поставлены в одинаковые конкурентные условия. В нашей стране создание равных условий конкуренции между видами транспорта произошло только в 2012 г. с введением «инфраструктурной субсидии» пригородным пассажирским компаниям, однако данная мера является временной, и 99%-ная скидка на оплату услуг инфраструктуры в ближайшие годы может быть пересмотрена в сторону уменьшения.

Что касается пригородных перевозок, в Европе была осуществлена и продолжается их **регионализация**.

Под регионализацией понимается передача организующих и регулирующих функций в сфере пригородных перевозок местным администрациям. [3] Суть ее заключается в том, что региональные и муниципальные власти обеспечивают операционную деятельность региональных перевозчиков. Развитие, содержание инфраструктуры, инфраструктурные расходы осуществляет государство. Сами перевозчики получают доходы от коммерческой деятельности по перевозкам

пассажирам, от развитой системы услуг в поездах, на станциях, вокзалах, вокзальных гостиницах и другой коммерческой деятельности.

Являясь организатором пассажирских перевозок, местные власти взаимодействуют с транспортными компаниями. Как правило, механизм взаимодействия закреплён законодательно, и существует определённая форма договора между регионом и перевозчиком, который предусматривает права, обязанности и ответственность каждой из сторон. Местные власти обязуются компенсировать убытки перевозчиков, возникающие вследствие регулирования тарифов на проезд. В контрактах предъявляются требования к объёму и качеству предоставляемых услуг, техническому состоянию и обслуживанию подвижного состава.

При договорной форме взаимоотношений между заказчиком транспортных услуг и перевозчиком важным аспектом является соблюдение условий контракта. Таким образом, регионализация создаёт условия для развития внутривидовой конкуренции пассажирских перевозчиков. В России также существует практика договорных взаимоотношений между субъектами РФ и пригородными пассажирскими компаниями, однако нормативно-правовой механизм заключения таких контрактов проработан не полностью, следствием чего является недофинансирование выпадающих доходов ППК, возникающих в результате тарифного регулирования пригородных перевозок. Внутривидовая конкуренция на рынках региональных пассажирских перевозок может развиваться в двух формах: «на маршруте» и «за маршрут». Каждая форма имеет достоинства и недостатки. Сравнение названных форм конкуренции приведено ниже в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика форм внутривидовой конкуренции на рынке пригородных железнодорожных перевозок [4]

	<b>Достоинства</b>	<b>Недостатки</b>
Конкуренция «на маршруте»	1. Оптимальна для потребителя, т.к. предоставляет ему широкие возможности выбора; 2. Способствует развитию ценовых и неценовых форм конкуренции между ППК. 3. Способствует развитию дифференциации услуги по перевозке и оптимизации затрат ППК.	1. В соответствии с требованием недискриминационного доступа к инфраструктуре для нескольких перевозчиков может создавать трудности при составлении графика движения поездов, особенно на грузонапряжённых участках. 2. Создаёт риск снижения безопасности движения поездов.
Конкуренция «за маршрут»	1. Обеспечивает стабильность тарифов на пригородные перевозки; 2. Способствует удовлетворению спроса на перевозки в регионе.	1. Создает риск злоупотребления ППК доминирующим положением на региональном рынке.

	3. Конкуренция за франшизу побуждает ППК снижать затраты и повышать качество услуг.	2. Создаёт угрозу массового банкротства пригородных компаний.
--	---	---

Обзор мирового опыта показывает, что внутривидовая конкуренция между региональными железнодорожными перевозчиками в основном реализуется в форме конкуренции «за маршрут». Она основана на проведении открытых конкурсов региональными властями для выбора компаний-перевозчиков. Местные органы государственной власти осуществляют свой выбор, сопоставляя компании по стоимости услуг, концепции их оказания, качеству, финансовому положению. Это стимулирует развитие конкуренции как в пределах отдельной страны, так и между национальными и зарубежными перевозчиками. Например, конкурентными являются рынки региональных перевозок западноевропейских стран: Германии, Великобритании и других. Однако в целом ряде стран на рынках региональных пассажирских перевозок конкуренция отсутствует.

Далее рассмотрим более подробно деятельность региональных пассажирских компаний в отдельных странах.

## **2. Реформирование и особенности развития региональных пассажирских перевозок в отдельных странах мира**

Процесс реформирования железнодорожной отрасли **Германии** начался в 1994 г. с создания государством акционерного общества «Немецкие железные дороги». [14] В ходе национальной реформы были выработаны следующие основные положения по организации региональных пассажирских перевозок: недискриминационный доступ перевозчиков к инфраструктуре, размещение заказов региональных властей на перевозки и конкурсные процедуры отбора перевозчиков. Финансирование перевозчиков осуществляется федеральными землями, которые получают на эти цели средства из федерального бюджета страны.

Таким образом, в результате реформы вместо централизованного управления по всей сети железных дорог управление пригородным комплексом было делегировано местным администрациям.

В итоге в 16 землях Германии созданы и действуют 33 организации-заказчика, которые занимаются организацией железнодорожных пассажирских перевозок в пригородном сообщении и представляют интересы местных потребителей услуг. [14] Пассажирские перевозки в пригородном сообщении дотируются государством, дотации распределяются из федерального бюджета по землям согласно заявленной потребности в перевозках.

Основной железнодорожной компанией в пригородных перевозках Германии является DB Regio AG. [14] Кроме того, имеются и другие железнодорожные компании, в том числе частные перевозчики из других европейских стран: Франции, Италии. Часть компаний принадлежит местным администрациям.

Подвижной состав для оказания услуг по пассажирским перевозкам в Германии принадлежит самим перевозчикам (при этом используется лизинг или приобретение с использованием заемных средств) или местным администрациям, которые предоставляют его в аренду перевозчикам, выбранным по конкурсу.

Во **Франции** реформа пассажирского железнодорожного транспорта привела к разделению сфер ответственности государства и перевозчика в организации перевозочного процесса, перенесла обязательства по регулированию местных перевозок на руководство регионов, оставив за государством контроль, финансирование транспортной инфраструктуры и компенсацию убытков перевозчиков. Все региональные пассажирские компании в этой стране принадлежат государству. После принятия соответствующего закона ответственность за организацию региональных пассажирских перевозок возложена на региональные органы власти.

В **Великобритании** все пассажирские компании частные. Они приобретают подвижной состав в лизинг у специализированных компаний. На рынке региональных пассажирских перевозок имеется внутривидовая конкуренция в форме «за маршрут».

Иногда организацию перевозок осуществляет Департамент транспорта. Кроме того, он финансирует выпадающие доходы перевозчиков, с которыми заключены договоры на оказание услуг. Интересно, что на маршрутах с интенсивным пассажиропотоком перевозчик обязан передавать часть заработанных доходов Департаменту. В рамках договорных отношений между органами государственной власти и перевозчиками разработана система по соблюдению стандартов качества. В соответствии с этой системой при определенных условиях перевозчики могут получить дополнительное финансирование.

Интересы пассажиров представляет компания RTE, которая финансируется Департаментом транспорта. Она организует функционирование системы общественного транспорта в крупных городах и устанавливает стоимость проездных документов. [14]

Таким образом, региональные перевозки получают государственную поддержку в следующих формах: вознаграждение перевозчикам по заказам и финансирование инфраструктурной компании National Rail. Одно из подразделений этой компании утверждает размер платы за использование инфраструктуры на 5 лет, которая выплачивается перевозчиками. [14]

Пассажирский подвижной состав арендуется перевозчиками у специализированных компаний, в том числе лизинговых. Некоторые

пассажиры перевозчики имеют собственный подвижной состав, но он, как правило, не соответствует современным требованиям к технологии перевозочного процесса.

**В Японии** в процессе реформирования железнодорожной отрасли начиная с 1987 г. национальная железнодорожная компания была разделена на семь отдельных структур: шесть пассажирских и одну грузовую, которые образовали группу компаний «JR Group». [14] Разделение на несколько пассажирских компаний инициаторы реформы считали необходимым для развития конкуренции.

Реформирование железнодорожных перевозок сопровождалось преобразованием нормативно-правовой базы. Во время приватизации железных дорог для компенсации убытков социально значимых пассажирских компаний, расположенных на малонаселенных островах, создан Фонд стабилизации управления. Также созданы частные компании, называемые «третий сектор». Они финансируются из местных бюджетов.

К положительным итогам реформирования железных дорог в Японии можно отнести: сокращение субсидирования железных дорог государством, их переход на самоокупаемость, стабильный уровень тарифов, привлечение рыночных инвестиционных ресурсов в железнодорожные компании, увеличение пассажирооборота. Из отрицательных результатов следует отметить увеличение задолженности, полученной компаниями при разделении единой компании, тяжелое финансово-экономическое положение социально значимых железнодорожных компаний малонаселенных островов. В целом реформа не привела к уменьшению контроля государства над деятельностью железнодорожных компаний. Статус трех основных компаний, часть акций которых была продана на бирже, не отличается от статуса частных железнодорожных компаний. Контроль государства над ними сохраняется. [5]

Одним из эффективных инструментов роста доходности региональных перевозчиков в Японии является диверсификация их деятельности. [4] Наиболее популярными среди побочных видов деятельности частных железнодорожных компаний являются организация автобусных перевозок, туризм и гостиницы, оптовая торговля (поставка товаров универсамам и супермаркетам), недвижимость (сдача жилья и служебных помещений в аренду), строительство. Усиливается интерес к информационным сетям и кабельному телевидению.

К другим факторам успешного управления можно отнести такие, как эффективная организация управления, большой район обслуживания с высокой плотностью населения и переполнение подвижного состава в часы «пик».

**В Бразилии** региональные пассажирские перевозки осуществляются государственными компаниями. Государственное регулирование пассажирских перевозок в городских агломерациях осуществляют

региональные агентства, отдельные маршруты регулирует федеральный орган исполнительной власти. Управление транспортом в регионах осуществляют коллегиальные органы, в состав которых входят представители государства и бизнеса. Финансирование региональных пассажирских перевозок осуществляется региональными или местными органами государственной власти, которые компенсируют недополученные доходы перевозчиков и участвуют в их инвестиционных программах. Железнодорожная инфраструктура в Бразилии принадлежит государству, а подвижной состав – пригородным перевозчикам.

**В Китае** приоритетное направление развития пассажирских перевозок – высокоскоростное сообщение (Шанхайский маглев), региональным перевозкам уделяется меньшее внимание со стороны государства. Тем не менее, государство субсидирует региональные перевозки в большинстве провинций. Развита диверсификация деятельности региональных перевозчиков, как и в Японии, в форме розничной торговли и рекламы. Железнодорожная инфраструктура принадлежит государству в лице Министерства железных дорог. Региональные перевозки осуществляются на специальных выделенных линиях, конкуренция между перевозчиками отсутствует. Подвижной состав принадлежит государству, которое также отвечает за регистрацию транспортных средств. Инвестиции в подвижной состав также осуществляет государство.

**В Канаде** существует всего три компании – региональных пассажирских перевозчика. Они находятся в ведении местных органов государственной власти. В пригородном сообщении перевозится подавляющая часть пассажиров (более 90%). Финансирование региональных пассажирских перевозок осуществляется государством в форме субсидирования недополученных доходов перевозчиков на уровне регионов и муниципалитетов. Средства, используемые для этого, поступают в основном от акцизов на топливо или бензин.

Железнодорожная инфраструктура по большей части принадлежит грузовым железнодорожным компаниям. Пригородные компании владеют незначительной частью инфраструктуры, поэтому в большинстве случаев платят за её использование. Государственное регулирование доступа к инфраструктуре пассажирских перевозчиков отсутствует. Таким образом, пригородные перевозчики зависят от грузовых компаний, устанавливающих цены на предоставление услуг инфраструктуры. Плата за использование инфраструктуры для пассажирских перевозчиков в сравнении с грузовыми перевозчиками невысока, однако грузовым поездам отдается предпочтение, что негативно сказывается на соблюдении расписания пассажирских поездов.

В Канаде подвижной состав принадлежит транспортным администрациям провинций.

Таким образом, региональные пассажирские перевозки могут развиваться как в условиях внутривидовой конкуренции, так и в ее отсутствие. Существенной особенностью, общей для всех рассмотренных моделей их развития в разных странах, является наличие государственной поддержки в различных формах. В этом отношении показательным исключением является опыт США: «Не совсем удачным можно признать только опыт государственного оператора пассажирских перевозок Amtrak, положение которого усугубилось из-за отсутствия своевременного правительственного субсидирования, что сказалось на его глубокой рецессии в 1990-х годах» [11]. Это говорит о необходимости государственного финансирования развития региональных пассажирских перевозок.

### **3. Модели развития региональных пассажирских перевозок**

Опираясь на представленный в п. 2 обзор мирового опыта, можно выделить две **основных модели развития региональных пассажирских перевозок. Первая модель (конкурентная)** предполагает частную или смешанную государственно-частную формы собственности компаний – региональных перевозчиков, смешанную и частную собственность на подвижной состав с использованием различных форм его аренды (в т.ч. лизинг), развитие конкуренции перевозчиков «за маршрут» по итогам проведения местными администрациями конкурсных процедур. Как правило, данная модель характеризуется чётко закрепленным нормативно-правовым механизмом государственного финансирования перевозчиков. Ответственность за организацию перевозок несут регионы, которым выделяются для этой цели средства из федерального бюджета. При этом разделяется финансирование развития инфраструктуры и компенсации выпадающих доходов перевозчиков.

**Вторая модель (государственная)** основана на государственной собственности как самих компаний-перевозчиков, так и подвижного состава. Она предполагает разделение сфер ответственности региональных перевозчиков по административному принципу и отсутствие внутривидовой конкуренции между ними, т.е. рынка региональных пассажирских перевозок. Региональные перевозчики, как и в первой модели, поддерживаются государством, однако не в результате исполнения контракта, а в форме прямого субсидирования, в том числе оплаты услуг инфраструктуры, если перевозчики и инфраструктура организационно обособлены.

Схематично модели развития региональных пассажирских перевозок представлены на рисунке 1.

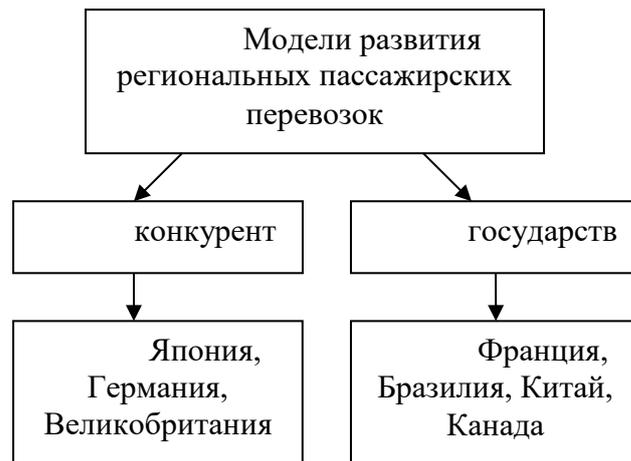


Рис. 1. Модели развития региональных пассажирских перевозок

Выбор модели в основном определяется общей направленностью транспортной политики в той или иной стране, логикой отраслевых реформ, особенностями исторического развития. Так или иначе, критерием успешности модели должна выступать максимизация эффективности функционирования регионального транспортного комплекса. Если говорить о модели развития пригородных пассажирских перевозок в России, в настоящий период ей присущи некоторые черты конкурентной модели, несмотря на отсутствие внутривидовой конкуренции. Так, ответственность за организацию пригородных перевозок возложена на региональные органы власти; пригородные пассажирские компании работают по договорам с субъектами РФ; Концепцией развития пригородных пассажирских перевозок железнодорожным транспортом (утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 мая 2014 г. N 857-р) предполагается появление частной собственности на подвижной состав; в структуре уставного капитала отдельных ППК присутствует частный инвестор. Однако отсутствует разработанная нормативно-правовая база, четко закрепляющая обязанность субъектов РФ компенсировать убытки ППК [6], что сдерживает возможности развития конкуренции между ними. Как отмечается в [10], «при действующем механизме субсидирования возникает постоянный дефицит субсидий, выделяемых государством на возмещение потерь от регулирования тарифов по перевозкам в регулируемом сегменте, что ограничивает применение рыночных инструментов для развития маркетинговых взаимоотношений с клиентами».

## Заключение

По итогам проведенного обзора мирового опыта развития региональных пассажирских компаний можно сделать следующие выводы.

Поскольку страны имеют разный уровень развития транспортных сетей, различную численность, плотность и структуру населения, единой модели развития региональных пассажирских перевозок не существует. Можно условно выделить две основные модели – конкурентную и государственную.

Модель развития региональных перевозок формируется в каждой стране с учетом перечисленных выше факторов, а также особенностей исторического развития. Тем не менее, во всем мире региональные пассажирские перевозки выполняют социальные функции и имеют большое значение для развития регионов. В связи с этим они полностью или частично финансируются государством. Компании – перевозчики в региональных транспортных системах используют диверсификацию для повышения доходности и перераспределения рисков.

Мировой опыт организации пригородных перевозок должен учитываться при реорганизации пригородного транспортного комплекса в нашей стране. В настоящий период модель развития пригородных перевозок имеет некоторые черты конкурентной, хотя внутривидовая конкуренция между ППК пока отсутствует. Представляется, что дальнейшее развитие пригородного транспортного комплекса в России должно учитывать обе выделенные модели развития. Исходя из значительных различий в уровне развития регионов, мобильности населения и перспективах ее роста, условия для развития рынка пригородных железнодорожных перевозок имеются только на определенных территориях. К ним можно отнести пригородные зоны городских агломераций, в первую очередь Московской и Санкт-Петербургской. В остальных регионах следует выбрать государственную модель и выстраивать комплексные схемы транспортного обслуживания населения всеми видами транспорта.

### **Библиографический список**

1. Акулов М. П. Актуальные вопросы взаимодействия пассажирской железнодорожной компании с органами власти и субъектами рынка транспортных услуг // Транспортное дело России, 2014. – № 5. – С. 53-55.

2. Белозеров В. Л. Экономика транспорта: управление в рыночных условиях: монография / В. Л. Белозеров, А. Н. Ефанов, А. А. Зайцев и др.; под ред. О. В. Белого. – СПб.: Изд-во «Наука», 2014. – 204 с.

3. Верховых Г. В. Железнодорожные пассажирские перевозки: монография / Г. В. Верховых, А. А. Зайцев, А. Г. Котенко и др.; под ред. Г. В. Верховых. – СПб.: Северо-Западный региональный центр «РУСИЧ», «Паллада-медиа», 2012. – 520 с.

4. Волкова Е. М. Формирование системы взаимодействия железнодорожной компании с субъектами рынка пригородных пассажирских

перевозок: автореферат дисс. на соискание ученой степени к.э.н. – СПб: ПГУПС, 2013. – 24 с.

5. Дюбанов М. А. Реформирование естественных монополий: проблемы, состояние, перспективы развития (на примере реформы железнодорожного транспорта за рубежом) // Бизнес в законе. Экономико-юридический журнал, 2009. – № 2. – С. 339-345.

6. Журавлева Н. А. Развитие рынка услуг железнодорожного транспорта в контексте экономической безопасности России // Экономические науки, 2015. – № 132. – С. 15-19.

7. Журавлева Н. А. Системный подход к формированию эффективной модели железнодорожной отрасли / Н. А. Журавлева, В. Г. Карчик // Экономика железных дорог, 2014. – № 5. – С. 11-27.

8. Зайцев А. А. Механизм формирования высокоэффективных услуг на транспортном рынке России / А. А. Зайцев, А. Н. Ефанов // Известия ПГУПС, 2013. – № 3. – С. 5-17.

9. Зайцев А. А. Настоящее и будущее пригородных перевозок // Железнодорожный транспорт, 2012. – № 6. – С. 42-44.

10. Казанская Л. Ф. Направления повышения эффективности железнодорожных пассажирских перевозок // Научное обозрение. Серия 1: Экономика и право, 2015. – № 4. – С. 47-55.

11. Панова Ю. Н. Опыт дерегулирования железнодорожных перевозок / Ю. Н. Панова, Е. К. Коровяковский, Милла Лайси, Олли-Пекка Хилмола // Железнодорожный транспорт, 2013. – № 6. – С. 74-77.

12. Проскурякова Е. А. Развитие конкуренции в сфере пригородных пассажирских перевозок // Экономика железных дорог, 2014. – № 11. – С. 11-17.

13. Проскурякова Е. А. Развитие рынка пассажирских перевозок // Экономика железных дорог, 2015. – № 7. – С. 92-98.

14. Рузавин Л. Мировой опыт организации пригородного пассажирского комплекса / Сайт Института проблем естественных монополий [Электронный ресурс]. Код доступа: <http://ipem.ru/news/publications/551.html> (дата обращения 14.05.2016).

15. Шнейдер М. А. Рынок пригородных железнодорожных перевозок: управление и экономика: монография / М. А. Шнейдер, Е. А. Проскурякова. – СПб.: Издательство ООО «Типография НП-Принт», 2012. – 288 с.

## References

1. Akulov M. P. *Transportnoye delo Rossiy – Transport Business in Russia*, 2014, no. 5, pp. 53–55.

2. Belozarov V. L., Yefanov A. N., Zaytsev A. A. & Belyi O. V. *Ekonomika transporta: upravlenye v rinochnikh usloviyah* [Transportation Economy: Management under Conditions of Market]. St. Petersburg, 2014. 204 p.

3. Verkhovyyh G. V., Zaytsev A. A. & Kotenko A. G. *Zheleznodorozhnye passazhirskiye perezovki* [Railway Passenger Transportation]. St. Petersburg, 2012. 520 p.
4. Volkova E. M. *Formirovaniye sistemy vzaimodeystviya zheleznodorozhnoy kompanii s subjektami rynka prigorodnykh passagirskikh perezovok* [Forming of Transaction System between Railway Company and Regional Passenger Transportation Market Subjects]. St. Petersburg, 2013. 24 p.
5. Dyubanov M. A. *Biznes v zakone. Ekonomiko-yuridicheskiy zhurnal – Business in Law. Economic and Justice Magazine*, 2009, no. 2, pp. 339–345.
6. Zhuravleva N. A. *Ekonomicheskiye nauki – Economical Sciences*, 2015, no. 132, pp. 15–19.
7. Zhuravleva N. A. & Karchik V. G. *Ekonomika zheleznykh dorog – Railway Transportation Economy*, 2014, no. 5, pp. 11–27.
8. Zaytsev A. A. & Efanov A. N. *Izvestiya PGUPS – Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2013, no. 3, pp. 5–17.
9. Zaytsev A. A. *Zheleznodorozhniy transport – Railway Transport*, 2012, no. 6, pp. 42–44.
10. Kazanskaya L. F. *Nauchnoye obozreniye. Seriya 1: Ekonomika I pravo – Scientific Survey. Series 1: Economics and Justice*, 2015, no. 4, pp. 47–55.
11. Panova J. N., Korovyakovskiy E. K., Milla Laisi & Olli-Pekka Hilmola. *Zheleznodorozhniy transport – Railway Transport*, 2013, no. 6, pp. 74–77.
12. Proskuryakova E. A. *Ekonomika zheleznykh dorog – Railway Transportation Economy*, 2014, no. 11, pp. 11–17.
13. Proskuryakova E. A. *Ekonomika zheleznykh dorog – Railway Transportation Economy*, 2015, no. 7, pp. 92–98.
14. Ruzavin L. *Mirovoy opit organizatsii prigorodnogo passagirskogo kompleksa: Institut problem estestvennykh monopoliy* (World-wide survey of suburban passenger transportation: Web-site of Institute of Natural Monopolies Problems), URL: <http://ipem.ru/news/publications/551.html> (14/05/2016).
15. Shneyder M. A. & Proskuryakova E. A. *Pynok prigorodnykh zheleznodorozhnykh perezovok: upravleniye I ekonomika* [Regional Passenger Railway Transportation Market: Management and Economy]. St. Petersburg, 2012. 288 p.

**Сведения об авторе:**

ВОЛКОВА Елена Михайловна, к.э.н., доцент кафедры «Экономика транспорта» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
E-mail: Moonlight34@ya.ru

**Information about author:**

Elena M. VOLKOVA, Candidate of economic sciences, assistant professor, Department of Transportation Economy, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
E-mail: Moonlight34@ya.ru

## Раздел 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 621.3.031:629.3.06

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

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

Дата поступления: 27.08.2016

Решение о публикации: 30.08.2016

Дата публикации: 30.09.2016

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Введение

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

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

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

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

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

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

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

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

## 1. Линейные генераторы

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

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

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

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

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

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

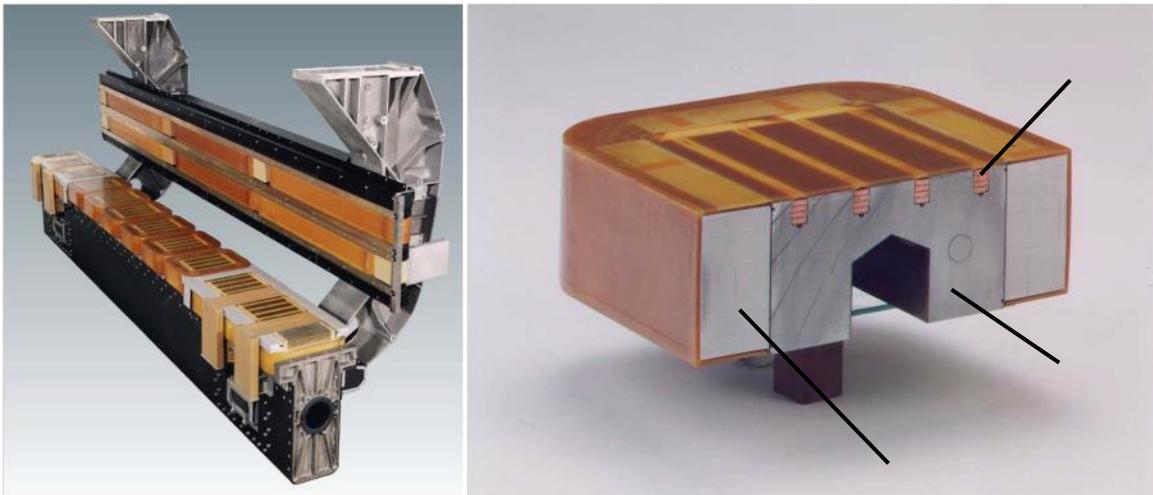


Рис. 1. Электромагнитный модуль TRANSRAPID (слева) и электромагнит в разрезе (справа).

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

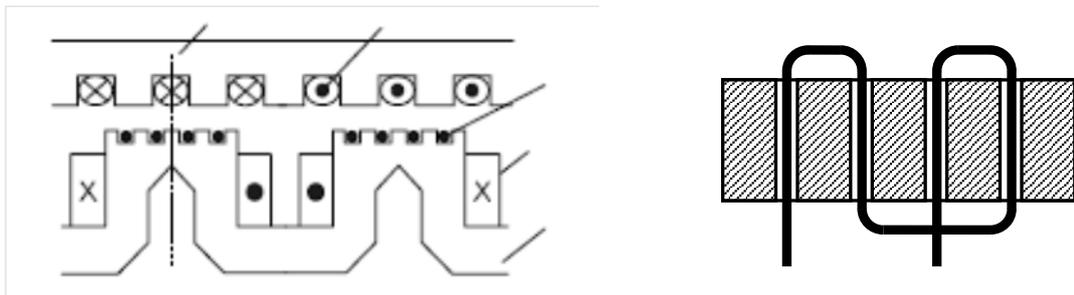


Рис. 2. Схема [10] линейного индукторного генератора TRANSRAPID (слева) и порядок укладки проводников обмотки генератора в полюсном наконечнике электромагнита (справа).

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

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

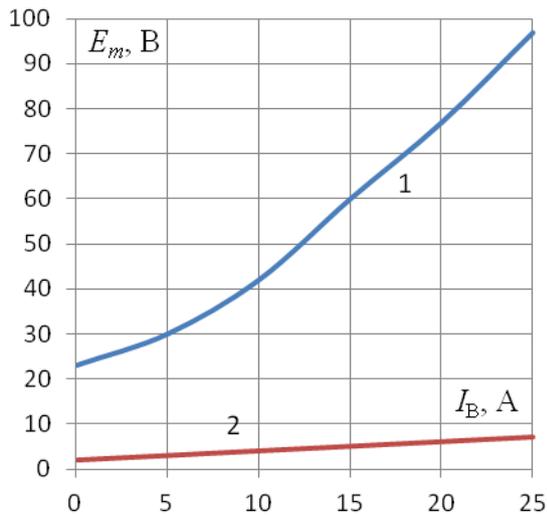


Рис. 3. Зависимость амплитуды ЭДС ЛГ от тока возбуждения ЛСД. 1 – основная гармоника, 2 – вторая гармоника.

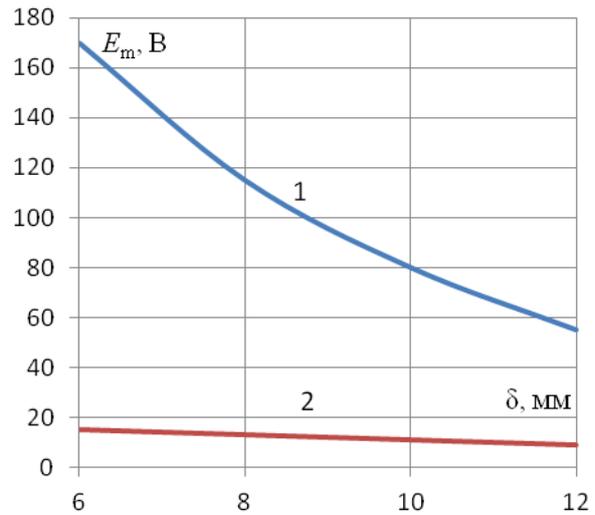


Рис. 4. Зависимость амплитуды ЭДС ЛГ от воздушного зазора в системе подвеса. 1 – основная гармоника, 2 – вторая гармоника.

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

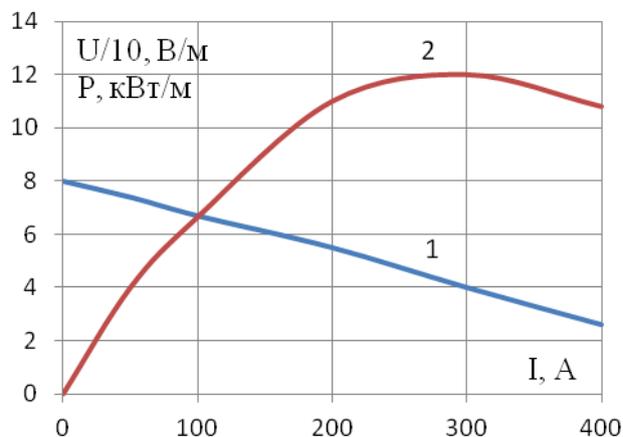


Рис. 5. Зависимости удельного напряжения (1) и удельной мощности (2) ЛГ TRANSRAPID от тока нагрузки.

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

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

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

путевой структуре размещены дискретные левитационные катушки, катушки ЛГ на экипаже пронизываются магнитным полем, содержащим переменную составляющую [11, 12]. Эта переменная составляющая магнитного поля наводит в катушках ЛГ ЭДС, которая через

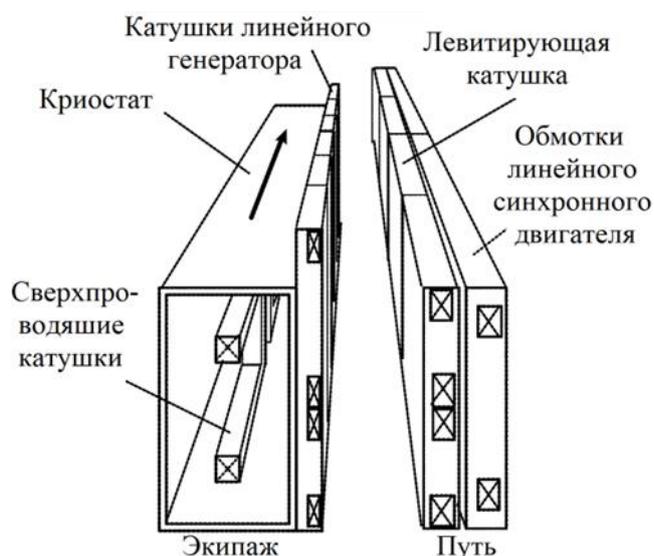


Рис. 6. Конструкция ЛГ системы MLX.

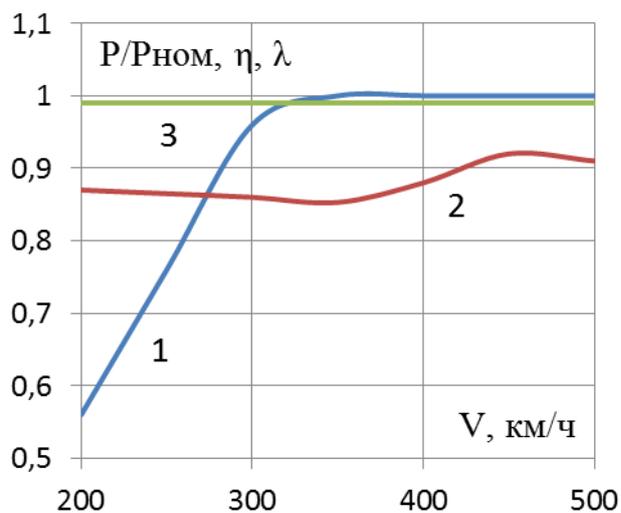


Рис. 7. Зависимости относительной мощности (1), КПД  $\eta$  (2) и коэффициента мощности  $\lambda$  (3) ЛГ MLX от скорости движения экипажа.

ШИМ-преобразователь, выполненный по трехфазной мостовой схеме, питает бортовую сеть ПСН постоянным напряжением 600 В. В системе MLX ЛГ в совокупности с преобразователем выполняет двоякую функцию: вырабатывает трехфазную систему ЭДС, весьма близкую к симметричной (несимметрия не более 4%, несинусоидальность не более 5%), и позволяет демпфировать колебания экипажа, возникающие за счет дискретной структуры левитационных катушек. ШИМ-преобразователь контролирует амплитуду и фазовый угол токов, индуцируемых в обмотках ЛГ: если фазовый угол отличен от нуля, то в системе взаимодействующих магнитов возникает вертикальная сила, создаваемая наведенными токами в обмотках ЛГ. ШИМ-преобразователь дает возможность управлять дополнительной вертикальной силой путем управления фазовым углом индуцированных токов и демпфировать вибрации экипажа, которые отслеживаются по сигналам датчика виброускорений, установленного на тележке. Данная система гашения колебаний обладает более высоким быстродействием, чем традиционные гидравлические или пневматические системы.

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

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

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

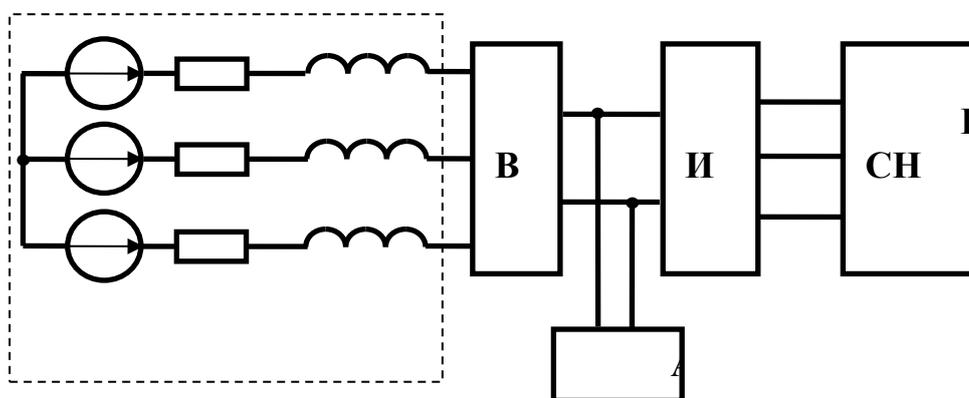


Рис. 8. Принципиальная схема системы электроснабжения потребителей собственных нужд вагона MLX. ЛГ – линейный генератор, В – выпрямитель, И – инвертор, АКБ – аккумуляторная батарея, ПСН – потребители собственных нужд.

## 2. Линейный трансформатор TRANSRAPID

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

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

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

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

где  $f_1$  – частота тока первичной части;

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

$I_1$  – ток первичной части.

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

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

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

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

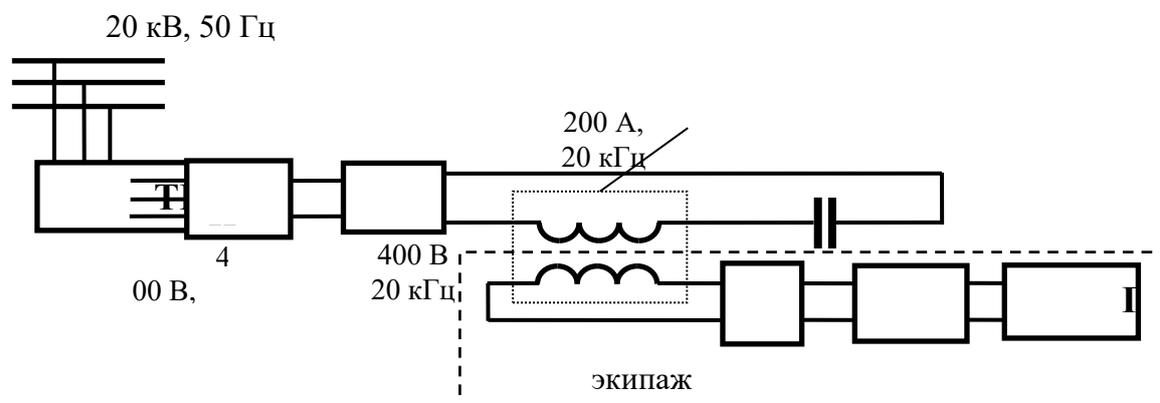


Рис. 9. Система электроснабжения собственных нужд вагона TRANSRAPID с линейным трансформатором. ТР – трансформатор, ПЧ – преобразователь частоты, ИТ – источник тока, ЛТ – линейный трансформатор, В – выпрямитель, ИП – импульсный преобразователь повышающего типа, ПСН – потребители собственных нужд.

## Заключение

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

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

## Библиографический список

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

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

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

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

## References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Сведения об авторах:**

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

E-mail: pgups.emks@mail.ru

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

E-mail: victor-nikitin@nm.ru

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

E-mail: gennady.sereda@mail.ru

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

E-mail: g-pereda@mail.ru

**Information about authors:**

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

E-mail: pgups.emks@mail.ru

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

E-mail: victor-nikitin@nm.ru

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

E-mail: gennady.sereda@mail.ru

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

E-mail: g-pereda@mail.ru

**Е. С. Люминарская**

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛАБОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ В УСЛОВИЯХ ЗАПЫЛЕННОСТИ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Дата поступления: 31.07.2016

Решение о публикации: 01.09.2016

Дата публикации: 30.09.2016

**Аннотация: Введение.** В настоящее время на транспорте, в автомобильной, авиационной, космической, бытовой и иной технике широко применяются миниатюрные механически управляемые переключатели. К их преимуществам относятся небольшой вес и малые габариты. Однако плохое контактное соединение может привести к выходу из строя приборов, от которых зависит работа всей сложной техники. В бытовой технике это не приведет к серьезным проблемам, но для транспорта сбой контактной системы может привести к катастрофическим последствиям. Важнейшим показателем надежности микропереключателей является безотказность работы. Отказы микропереключателей возникают из-за тепловых, электрических, механических и химических явлений в переходной зоне электрических контактов. В настоящее время большое распространение получили слаботочные контакты. Отказы и сбои в таких контактах появляются в основном из-за попадания в межконтактное пространство пыли и других загрязнений, образования пленок, не разрушающихся при замыкании контактов, внезапного изменения силы прижатия контактов, из-за поломки упругого элемента или распорной пружины.

В статье представлена математическая модель контактных систем при сбое на примере современных электронных микропереключателей стержневого типа.

**Цель.** Создание математической модели контактных систем при сбое на примере современных электронных микропереключателей стержневого типа, исследование работы микропереключателей в реальных условиях эксплуатации.

**Методология.** Для достижения поставленной цели применялись теоретические методы исследования с использованием ПЭВМ. Были использованы теория контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, теория электрических контактов, методы линейной алгебры и др. Использовались программные комплексы Mathcad, ANSYS. При экспериментальных исследованиях применялись методы математической статистики.

**Результаты.** В статье предложена методика определения переходного сопротивления слаботочных электрических контактов, учитывающая возможную запыленность контактных поверхностей, образование пленок на поверхностях контактов и изменение параметров шероховатости контактных поверхностей в результате пластических деформаций. Для исследуемых контактов получена зависимость вероятности сбоя от концентрации частиц пыли.

**Практическая значимость.** Описанная в статье методика позволяет определить переходное сопротивление электрических контактов как при нормальной работе, так и при сбое.

**Заключение.** Разработка математических моделей контактов при сбое дает возможность оценивать надежность соединений в реальных условиях работы, выбирать основные параметры коммутационных элементов с учетом возможных загрязнений, а также разрабатывать новые и уточнять имеющиеся методики обнаружения сбоев.

**Ключевые слова:** электрический контакт, переходная зона, переходное сопротивление, микропереключатель, коммутация.

**Ekaterina S. Lyuminarskaja**

Bauman Moscow State Technical University

DETERMINATION OF TRANSIENT RESISTANCE LOW-CURRENT ELEKTRIC CONTACTS IN DUSTY CONDITIONS THE CONTACT SURFACES

**Abstract: Introduction.** Now on transport, in automotive, aviation, space, household and other vehicles the tiny mechanically managed switches are widely used. The small weight and small dimensions belong to their benefits. However bad contact connection can lead to failure of devices on which work of all difficult technique depends. In household appliances it will not lead to serious problems, but for transport failure of contact system can lead to catastrophic consequences. The most important indicator of reliability of microswitches is non-failure operation of work. Failures of microswitches arise because of the thermal, electric, mechanical and chemical phenomena in a transitional zone of electric contacts. Now big distribution was gained by low-current contacts. Refusals and failures in such contacts appear generally because of hit in intercontact space of dust and other pollution, formation of the films which are not collapsing in case of short circuit of contacts, sudden change of force of pressing of contacts because of breakdown of an elastic element or an expansion spring.

In article the mathematical model of contact systems in case of failure on the example of modern electronic microswitches of rod type is provided.

**Purpose.** Creation of mathematical model of contact systems at failure on the example of modern electronic microswitches of rod type, research of operation of microswitches in actual practice operation.

**Methodology.** Theoretical methods of research with use of personal electronic computer were applied to achievement of an effective objective. The theory of contact interaction of rough surfaces, the theory of electric contacts, methods of linear algebra, etc. have been used. The program complexes Mathcad, ANSYS were used. In case of pilot studies methods of mathematical statistics were applied.

**Results.** In article the technique of determination of transitional resistance of low-current electric contacts considering possible dust content of contact surfaces, formation of films on surfaces of contacts and change of parameters of a roughness of contact surfaces as a result of plastic deformations is offered. For the studied contacts dependence of probability of failure on concentration of particles of dust is received.

**Practical importance.** The technique described in article allows to determine the transitional resistance of electric contacts both during the normal work, and at failure.

**Conclusion.** Development of mathematical models of contacts at failure gives the chance to estimate reliability of connections in actual practice of work, to choose key parameters of switching elements taking into account possible pollution, and also to develop new and to specify the available techniques of detection of failures.

**Keywords:** electrical contact, the transition zone, transition resistance, microswitch, switchin.

## Введение

Необходимость повышения надежности работы транспортных средств требует применения новых подходов к выявлению и предотвращению отказов технических систем. Для чего рядом специалистов предлагается повышать оперативность управления технологической сетью связи и моделировать работы по устранению неисправностей с целью выработки необходимых команд [4-17].

Другим способом повышения надежности является своевременное обнаружение сбоев и их источников в работе электронной аппаратуры. Одним из важнейших источников сбоев является электрический контакт. Сбои в работе электрических контактов трудно предсказывать, т.к. они происходят из-за случайных явлений. Плохое контактное соединение может привести к выходу из строя приборов, от которых зависит работа всей сложной техники. В бытовой технике это не приведет к серьезным проблемам, но для транспорта и космических аппаратов сбой контактной системы может привести к катастрофическим последствиям.

Основным показателем надежности микропереключателей является безотказность работы. Отказы микропереключателей возникают из-за тепловых, электрических, механических и химических явлений в переходной зоне электрических контактов. В настоящее время большое распространение получили слаботочные контакты, т.е. контакты, в которых протекают токи менее 0,1 А и напряжение не выше 5В. Отказы и сбои в таких контактах появляются в основном из-за попадания в межконтактное пространство пыли и других загрязнений, образования пленок, не разрушающихся при замыкании контактов, и внезапного изменения силы прижатия контактов.

В статье представлена математическая модель контактных систем при сбое на примере современных электронных микропереключателей стержневого типа. Отметим, что создание подобных моделей дает возможность оценивать надежность соединений в реальных условиях эксплуатации, выбирать основные параметры коммутационных элементов с учетом возможных загрязнений, а также разрабатывать новые и уточнять имеющиеся методики обнаружения сбоев.

### 1. Математическая модель шероховатой поверхности

Переходная зона электрических контактов обычно представляется в виде контакта шероховатых поверхностей, которые взаимодействуют отдельными микровыступами [1,2]. При моделировании шероховатые поверхности заменяются эквивалентными поверхностями, которые представляют собой набор упругих сегментов, случайным образом расположенных на упругом основании (рис. 1). Высота сферических

выступов определяется случайной величиной  $\xi_i$ , закон распределения которой

$$F(\xi) = \xi^{\nu-1},$$

где  $\xi = p/R_p$ ;  $R_p$  – высота сглаживания [2].

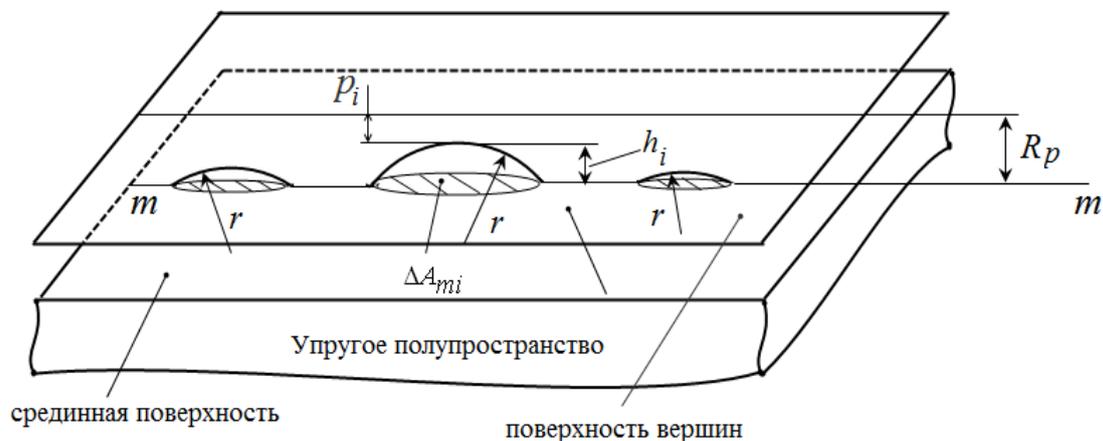


Рис.1. Эквивалентная заменяющая поверхность

Количество микровыступов выбирается из условия равенства площадей сечений выступов на средних линиях эквивалентной и реальной поверхностей по формуле

$$n = \frac{A_n \cdot t_m \cdot \nu}{2\pi \cdot R_p \cdot r},$$

где  $A_n$  - номинальная площадь касания;  $t_m, \nu$  - параметры опорной кривой шероховатой поверхности [2].

Радиусы всех сферических выступов считаются одинаковыми и вычисляются по формуле

$$r = \sqrt{r_n \cdot r_{n\text{прод}}},$$

где  $r_{n\text{прод}}$ ,  $r_n$  - значения радиусов кривизны вершин неровностей в продольном и поперечном профилях.

В отличие от ранее предложенных методик данная методика учитывает:

- возможность упругой, упругопластической и пластической деформаций отдельных выступов контактных поверхностей в зависимости от нагрузки на них;
- упругую деформацию основания, на котором располагаются сферические выступы, моделирующие шероховатые поверхности;
- изменение характеристик выступов при повторной нагрузке из-за пластических деформаций отдельных выступов;
- возможность попадания пыли на контактные поверхности.

## 2. Взаимодействие двух выступов

При расчете все выступы разделяются на три группы. К первой группе относятся взаимодействующие между собой выступы, ко второй группе – невзаимодействующие выступы. К третьей группе относятся выступы, между которыми расположены частицы пыли.

Схема взаимодействия выступов первой группы представлена на рис.2.

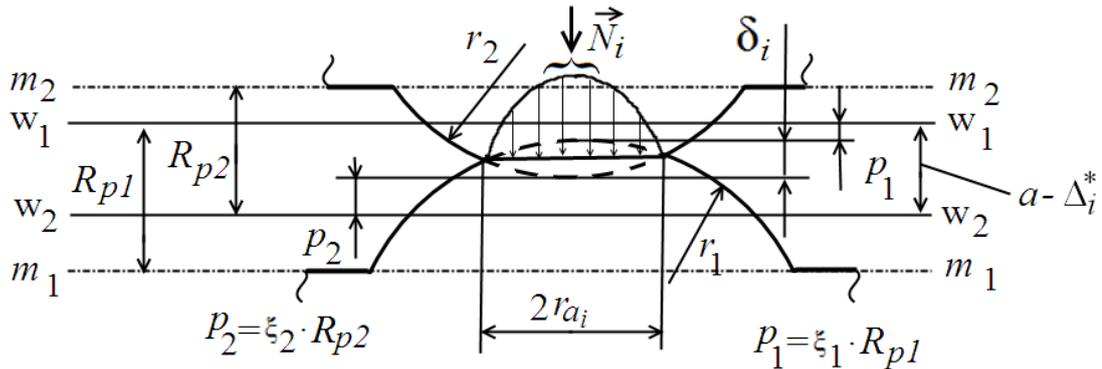


Рис. 2. Схема взаимодействия выступов первой группы

Сила взаимодействия двух выступов определяется через их сближение  $\delta_i$  по формуле

$$\delta_i = a - \Delta_{oi} - \delta_{1i}^{очн} - \delta_{2i}^{очн}, \quad (1)$$

где  $\Delta_{oi}$  - начальный зазор между выступами;  $\delta_{1i}^{очн}$ ,  $\delta_{2i}^{очн}$  - перемещения взаимодействующих выступов как жестких целых из-за деформации упругих оснований;  $a$  - сближение поверхностей вершин.

Если относительное сближение двух взаимодействующих выступов  $\delta_i^* = \delta_i \cdot \frac{E_{np}^2}{\sigma_T^2 \cdot r_{np}} < 6.7$ , то сила взаимодействия  $N$  и радиус пятна контакта  $r_a$  определяются по формулам Герца, которые в относительной форме имеют следующий вид

$$N^* = \frac{4}{3} (\delta^*)^{3/2}, \quad r_a^* = \sqrt{\delta^*}, \quad (2)$$

где  $N^* = \frac{E_{np}^2}{\sigma_T^2 \cdot r_{np}^2} \cdot N$ ,  $r_a^* = \frac{E_{np}}{\sigma_T \cdot r_{np}} \cdot r_a$  – относительные величины силы

взаимодействий двух выступов и радиуса пятна контакта;  $E_{np}, r_{np}$  – приведенный модуль упругости и приведенный радиус выступов;  $\sigma_T$  – предел упругости материалов контактов.

Для расчетов в упругой и упругопластической областях применяются выражения, предложенные в работе [3]. Проведенные по указанным формулам вычисления позволяют получить следующие зависимости:

для упругопластической области  $6.717 < \delta^* < 747.2$

$$N^* \approx 23.2 \cdot \left[ 1 + 0.42 \cdot \left( \frac{\delta^*}{6.717} - 1 \right) + 2.12 \cdot \left( \frac{\delta^*}{6.717} - 1 \right)^{1.128} \right],$$

$$r_a^* \approx 0.742 + 0.345 \cdot \sqrt{N^*} + 0.00022 \cdot N^*; \quad (3)$$

для пластической области  $\delta^* \geq 747.2$

$$N^* = 3\pi r_a^{*2}, \quad r_a^* = 1.25 \cdot \sqrt{\delta^*} \quad (4)$$

Перемещения выступов из-за деформации упругого основания  $\delta_{1i}^{очн}$ ,  $\delta_{2i}^{очн}$  определяются по формулам, используемым для расчета деформации упругого полупространства при воздействии нормального давления. При этом предполагается, что давление на основание распределено равномерно.

3. Схема взаимодействия выступов третьей группы представлена на рис.

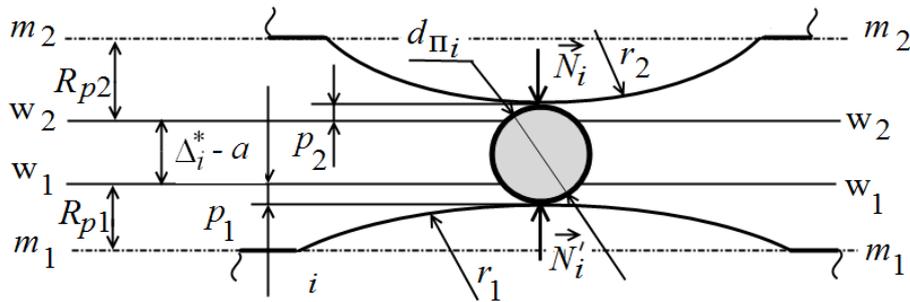


Рис. 3. Схема взаимодействия выступов с частицей пыли

Частицы пыли неправильной формы заменяются эквивалентными шарами, диаметр которых определяется по формуле:

$$d = \sqrt{L \cdot B},$$

где  $L, B$  – два наименьших размера во взаимно перпендикулярных направлениях.

Диаметр частиц пыли считается случайной величиной, имеющей закон распределения Рэля. Координаты выступов являются независимыми случайными величинами с равномерным законом распределения.

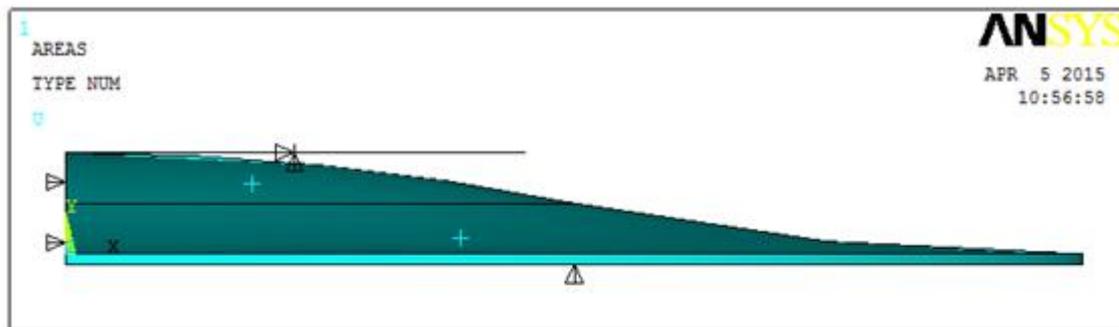
В математической модели предполагается, что взаимодействие двух выступов с частицей пыли носит упругий характер. Силы взаимодействия в этом случае определяются по формуле Герца. Если при взаимодействии растягивающие напряжения в центре пылинки окажутся больше предела прочности материала пылинки, то пылинка разрушается и не влияет на расчет.

Вычисления выполняются в следующей последовательности: задается сближение контактных поверхностей  $a$ ; по формуле (1) определяются значения сближений микронеровностей  $\delta_i$ ; по формулам (2)-(4) вычисляются силы взаимодействия микронеровностей  $N_i$  и радиусы пятен контакта  $r_{ai}$ . Вычисления выполняются методом итераций. На первой итерации силы взаимодействия  $N_i$  принимаются равными нулю.

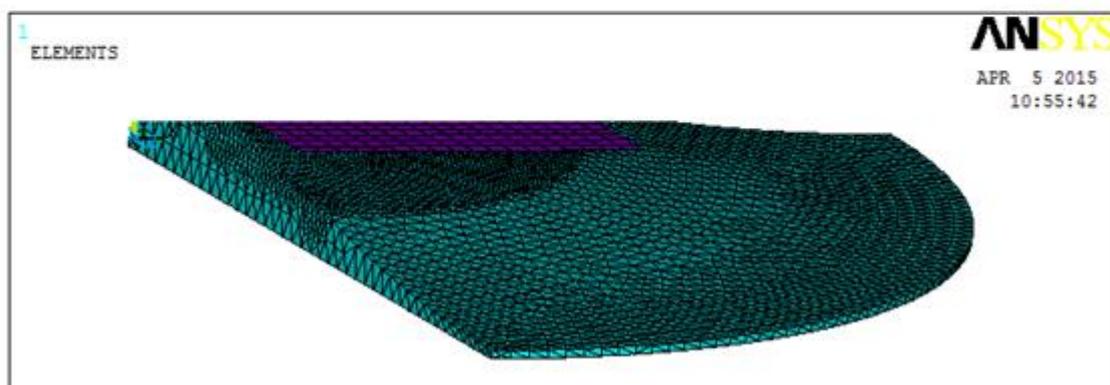
### **3. Изменение характеристик выступов при пластической деформации**

При взаимодействии контактных поверхностей одни выступы могут деформироваться упруго, другие могут иметь пластические деформации. Контакт шероховатых поверхностей будет полностью упругим только в случае, когда взаимодействующие поверхности имеют очень высокую поверхностную твердость (более 6 ГПа). Расчетные исследования показывают, что выступы поверхностей электрических контактов имеют в основном развитую пластическую или упругопластическую деформации. При снятии нагрузки после первого нагружения упругие деформации исчезают, а пластические остаются. Поэтому после первого взаимодействия микропрофили контактирующих поверхностей изменяют свои характеристики. Высоты отдельных выступов уменьшаются, а радиусы вершин увеличиваются. При определении характеристик переходной зоны разрывных электрических контактов необходимо учитывать эти изменения.

Для определения остаточных деформаций выступов, были проведены расчетные исследования методом конечных элементов в системе ANSYS. Задача взаимодействия двух одинаковых выступов одинакового радиуса является симметричной, поэтому рассматривалось взаимодействие четверти выступа с жесткой плоскостью. На рис. 4 показано закрепление поверхностей микровыступа и его разбивка на конечные элементы.



а) закрепление выступа



б) разбивка на конечные элементы

Рис. 4. Моделирование выступа в ANSYS

По результатам моделирования были получены зависимости относительной величины пластического уменьшения высоты выступа  $w_0^{*ост} = \frac{E_{np}^2}{\sigma_T^2 \cdot r_{np}} \cdot w_0^{ост}$  и коэффициента увеличения радиуса вершины выступа  $k_r = \frac{r^{ост}}{r}$  от относительного сближения  $\delta^*$ . Здесь  $w_0^{ост}$  – остаточное уменьшение высоты выступа,  $r$  – радиус неровности до деформации, и  $r^{ост}$  – радиус неровности после пластической деформации и снятия нагрузки. При расчете использовался материал с идеальной упругопластической характеристикой, имеющей следующие параметры: модуль упругости I рода  $E = 1.2 \text{ МПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\mu = 0.3$ ; предел текучести  $\sigma_T = 300 \text{ МПа}$ . Методом наименьших квадратов были получены следующие аналитические зависимости

$$w_0^{*ост} = \frac{\delta^*}{2} - 20 \operatorname{atan}(0.02 \cdot \delta^*),$$

$$k_r = 1 + 0.0002(\delta^* - 6.72)^{1.5}.$$

#### 4. Сопротивление переходной зоны

Сопротивление переходной зоны представляется в виде параллельного соединения сопротивлений отдельных микровыступов.

Поверхности микровыступов покрыты пленками. Если среднее контактное давление двух микровыступов больше предела прочности пленки, то сопротивление контактирующих микровыступов обуславливается только стягиванием линий тока к площадке пятна контакта [1,3] и определяется по формуле:

$$R_{\text{ш}} = \gamma \cdot (\rho_1 + \rho_2) / (4 \cdot r_{\text{ai}}),$$

где  $\rho_1, \rho_2$  – удельные сопротивления материалов контактов;  $r_{\text{ai}}$  – радиус пятна контакта двух выступов.

Сопротивление двух выступов с частично разрушенными пленками превышает их сопротивление без поверхностных пленок, при расчете это учитывается коэффициентом  $\gamma$ .

Если под действием контактной силы поверхностные пленки не разрушены, то сопротивление контактирующих выступов складывается из сопротивления стягивания и поверхностного сопротивления пленок и определяется по формуле:

$$R_{\text{ш}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4 \cdot r_{\text{ai}}} + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\pi \cdot r_{\text{ai}}^2},$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – удельные сопротивления поверхностных пленок.

Для теоретического исследования были выбраны медные контакты со сферическими поверхностями с радиусами 3мм и следующими параметрами микронеровностей: средний шаг неровностей профиля  $S_{m1} = S_{m2} = 30\text{мкм}$ ; радиус сферических выступов, моделирующих шероховатые поверхности,  $r = 50\text{мкм}$ ; высота сглаживания профиля  $R_{p1} = R_{p2} = 0.9\text{мкм}$ ; параметры опорной кривой  $v_1 = v_2 = 3$ ,  $t_{m1} = t_{m2} = 0.5$ . Номинальная сила взаимодействия контактов  $F_{\text{ном}} = 0.7H$ .

Расчетные исследования коммутации микропереключателей показывают, что при дребезге контактов максимальная сила взаимодействия контактов превышает номинальное значение почти в 10 раз. Такая большая сила действует короткое время (~5мкс). Этот короткий импульс может разрушить частицы пыли, расположенные на контактных поверхностях. Поэтому на первом этапе расчета контакты нагружались силой, превышающей номинальное значение в 10 раз, и определялось количество разрушенных частиц пыли. На втором этапе контакты нагружались номинальной силой, и определялось электрическое сопротивление.

По предложенной методике была получена зависимость вероятности сбоя  $P$  от концентрации частиц пыли на контактных поверхностях  $v_c$

(количества частиц пыли на  $1 \text{ мм}^2$  контактной поверхности). Сбой фиксировался по величине переходного сопротивления. Если переходное сопротивление превышало номинальное значение в два и более раз, то условно фиксировался сбой. Расчеты выполнялись методом статистических испытаний. При этом случайными величинами принимались диаметры частиц пыли, координаты расположения пылинок и высоты микровыступов. Результаты расчета приведены на рис.5.

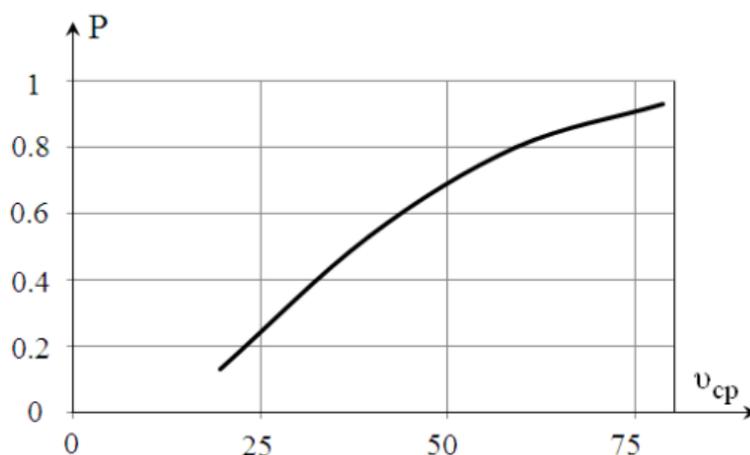


Рис. 5. Зависимость вероятности сбоя от концентрации частиц пыли на контактных поверхностях.

## Заключение

1. Предложена математическая модель механического взаимодействия электрических контактов, в которой впервые учитывается: возможность упругой, упругопластической и пластической деформаций отдельных выступов контактных поверхностей в зависимости от нагрузки на них; упругая деформация основания, на котором располагаются сферические выступы, моделирующие шероховатые поверхности; изменение характеристик выступов при повторной нагрузке; возможность попадания пыли на контактные поверхности.

2. Предложена методика определения переходного сопротивления, учитывающая возможную запыленность контактных поверхностей и образование пленок (оксидных, сульфидных и др.) на поверхностях контактов.

3. Получены расчетные зависимости, позволяющие определить высоту и радиус единичной сферической неровности после снятия нагрузки при пластической деформации.

4. Расчетным путем показано, что при запыленности контактных поверхностей 20 частиц на  $\text{мм}^2$  вероятность сбоя достигает 15%.

## Библиографический список

1. Holm R. Electrical Contacts. – New York: Springer. – 1979.
2. Демкин Н. Б. Контактное покрытие шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
3. Измайлов В. В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В. В. Измайлов, М. В. Новоселова. – Тверь: ТГТУ, 2010. – 112 с.
4. Белозеров В. Л. Экономика транспорта: управление в рыночных условиях: монография / В. Л. Белозеров, А. Н. Ефанов, А. А. Зайцев и др.; под ред. О. В. Белого. – СПб.: Изд-во «Наука», 2014. – 204 с.
5. Зайцев А. А. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны: монография / А. А. Зайцев, Е. И. Морозова, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова. – СПб.: Изд-во ООО «Типография «НП-Принт», 2015. – 140 с.
6. Соколова Я. В. Теоретические и практические аспекты управления инновационными процессами в транспортной компании / Я. В. Соколова // Журнал университета водных коммуникаций. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013.
7. Соколова Я. В. Проектное управление инновационным развитием транспортной компании / Я. В. Соколова // Транспортное дело России, 2014. – № 5. – С. 50-52.
8. Плеханов П. А. Проблема формирования требований к качеству и безопасности перевозочных услуг железнодорожного транспорта / П. А. Плеханов // Экономика железных дорог, 2015. – № 10 – С. 20-27.
9. Зайцев А. А. Механизм формирования высокоэффективных услуг на транспортном рынке России / А. А. Зайцев, А. Н. Ефанов // Известия ПГУПС, 2013. – № 3. – С. 5-17.
10. Волкова Е. М. Формирование системы взаимодействия железнодорожной компании с субъектами рынка пригородных пассажирских перевозок: автореферат дисс. на соискание ученой степени к.э.н. – СПб: ПГУПС, 2013. – 24 с.
11. Журавлева Н. А. Развитие рынка услуг железнодорожного транспорта в контексте экономической безопасности России // Экономические науки, 2015. – № 132. – С. 15-19.
12. Журавлева Н. А. Системный подход к формированию эффективной модели железнодорожной отрасли / Н. А. Журавлева, В. Г. Карчик // Экономика железных дорог, 2014. – № 5. – С. 11-27.
13. Красковский А. Е. Постановка экономически обоснованных целей по безопасности движения / А. Е. Красковский, П. А. Плеханов, С. А. Вырков // Экономика железных дорог, 2013. – № 2. – С. 42-48.
14. Красковский А. Е. Перспективная экономическая стратегия обеспечения безопасности движения в ОАО «РЖД» / А. Е. Красковский,

П. А. Плеханов, В. Г. Иванов, Д. Ю. Барканова // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2011. – № 3 (28). – С. 248-256.

15. Лизунова Ю. А. Проблемы управления стратегическими инновациями / Ю. А. Лизунова // Новая наука: Опыт, традиции, инновации, 2015. – № 6. – С. 234-236.

16. Паздерина В. А. Стратегическое управление инновациями / В. А. Паздерина, Т. А. Катаева // Экономика и бизнес: теория и практика, 2015. – № 10. – С. 108-112.

17. Титов С. А. Стратегические инновации: комплексный подход к созданию конкурентных преимуществ путем инноваций в бизнес-модели компании / С. А. Титов, Н. В. Титова, В. П. Чернышев, Р. Б. Титаренко // Фундаментальные исследования, 2015. – № 10. – С. 193-196.

## References

1. Holm R. Electrical contacts. NY, 1979. 464 p.
2. Demkin N.B. Kontaktirovanie sherohovatykh poverhnostej [Contacting rough surfaces]. Moscow, 1970. 227 p.
3. Izmaylov V. V. & Novoselova M. V. Kontakt tverdykh tel i ego provodimost' [Contact solids and conductivity]. Tver', 2010. 112 p.
4. Belozеров V. L., Yefanov A. N., Zaytsev A. A. & Belyi O. V. Ekonomika transporta: upravlenye v rinochnikh usloviyakh [Transportation Economy: Management under Conditions of Market]. St.Petersburg, 2014. 204 p.
5. Zaysev A. A., Morozov E. I., Talashkin G. N. & Sokolova J. V. Magnitolevitacionnyj transport v edinoj transportnoj sisteme strany [Magnetogravitational transport in uniform transport system of the country]. St. Petersburg, 2015. 140 p.
6. Sokolova J. V. Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij – *Journal of University of water communications*, 2013.
7. Sokolova J. V. *Transportnoe delo Rossii – The transport business of Russia*, 2014, no. 5, pp. 50–52.
8. Plekhanov P. A. *Ekonomika zheleznnykh dorog – Economy of Railways*, 2015, no. 10, pp. 20–27.
9. Zaytsev A. A. & Yefanov A. N. *Izvestiya PGUPS – Proceedings of Petersburg transport University*, 2013, no. 3, pp. 5–17.
10. Volkova E. M. Formirovanie sistemy vzaimodeystviya zheleznodozhnoy kompanii s subjektami rynka prigorodnykh passagirskikh perevozok [Forming of Transaction System between Railway Company and Regional Passenger Transportation Market Subjects]. St. Petersburg, 2013. 24 p.
11. Zhuravleva N. A. *Ekonomicheskiye nauki – Economic science*, 2015, no. 132, pp. 15–19.
12. Zhuravleva N. A. & Karchik V. G. *Ekonomika zheleznnykh dorog – Economy of Railways*, 2014, no. 5, pp. 11–27.

13. Kraskovskiy A. E., Plekhanov P. A. & Vyrkov S. A. *Ekonomika zheleznykh dorog – Economy of Railways*, 2013, no. 2, pp. 42–48.

14. Kraskovskiy A. E., Plekhanov P. A., Ivanov V. G. & Barkanova D. J. *Izvestiya PGUPS – Proceedings of Petersburg transport University*, 2011, no. 3, pp. 248–256.

15. Lizunova J. A. *Novaja nauka: opyt, tradicii, innovacii – A new science: the Experience, tradition, innovation*, 2015, no. 6, pp. 234–236.

16. Pazderina V. A. & Kataeva T.A. *Ekonomika i bisness: teorija i praktika – Economics and business: theory and practice*, 2015, no. 10, pp. 108–112.

17. Titov S. A., Titova N. V., Chernyshev V. P. & Titarenko R. B. *Fundamentalnye issledovanija – Fundamental research*, 2015, no. 10, pp. 193–196.

**Сведения об авторе:**

ЛЮМИНАРСКАЯ Екатерина Станиславовна, к.т.н., доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
E-mail: lyuminarskaja.caterina@yandex.ru

**Information of author:**

Ekaterina S. LYUMINARSKAJA,  
E-mail: lyuminarskaja.caterina@yandex.ru

УДК: 621.313

**В. Е. Вавилов**

Уфимский государственный авиационный технический университет

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ ЭНЕРГОВЫРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Дата поступления: 30.08.2016

Решение о публикации: 01.09.2016

Дата публикации: 30.09.2016

**Аннотация. Введение.** Обычно при разработке математических моделей магнитолевитационных систем (магнитных подшипников, электростатических подшипниковых опор, гибридных магнитных подшипников (ГМП и т.д.), рассматривается непосредственно сама подшипниковая опора, как отдельная, изолированная электромеханическая система. Данный подход позволяет довольно точно исследовать процессы в магнитолевитационных системах, но практически не позволяет оценивать процессы, происходящие в системе магнитная опора–объект установки. Для решения данной проблемы автором предлагается иной подход к анализу процессов в магнитолевитационных системах в целом, и в ГМП в частности– рассмотрение системы магнитная опора–объект установки, как единого комплекса.

**Цель.** Работа направлена создание обобщенной аналитической модели высокооборотных ЭМПЭ с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ) на упругих подшипниковых опорах, учитывающей взаимовлияние процессов в ЭМПЭ и подшипниковых опорах. Данная задача является новой и актуальной и имеет важное значение для современного энергомашиностроения. Для решения данной задачи в статье разрабатывается обобщенная математическая модель роторной системы на гибридном магнитном подвесе. Оценивается влияние гибридных магнитных подшипников на общее поведение роторной системы. Производится анализ процессов в электромеханическом преобразователе энергии и механических процессов, протекающих в роторной системе.

**Метод и методология.** Методология исследования основана на совместном решении уравнений Максвелла и уравнений, описывающих механические процессы роторной системы с пятью степенями свободы.

**Заключение.** Разработана обобщенная математическая модель высокооборотного ЭМПЭ с ВПМ на бесконтактных подшипниковых опорах и проведены ее исследования. На основе исследований разработанной математической модели, авторами был разработан оригинальный алгоритм управления положением ротора в гибридных магнитных подшипниках который позволяет при проектировании высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ отказаться от датчиков положения ротора. Кроме этого, на основе результатов расчетов была разработана способ диагностики эксцентриситета ротора высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ, а также новые методы расчета высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ, прошедшие экспериментальную верификацию.

**Ключевые слова:** гибридные магнитные системы левитации, электромеханические преобразователи энергии

**V. E. Vavilov**

Ufa State Aviation Technical University

## MATHEMATICAL MODEL OF THE HYBRID SYSTEM OF MAGNETIC LEVITATION ENERGY PRODUCTION EQUIPMENT AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

**Abstract: Introduction.** Typically, when developing mathematical models magnetocavitation systems (magnetic bearings, electrostatic bearings, hybrid magnetic bearings (GMP, etc.) is considered just the very bearing as a separate, isolated Electromechanical system. This approach allows us to accurately explore the process magnetocavitation systems, but practically does not allow to evaluate the processes occurring in the system of magnetic bearing–object position. To solve this problem, the author proposes a different approach to the analysis of the processes in magnetocavitation systems in General and GPC in particular considering the magnetic bearing–object position, as a single complex.

**Goal.** The work aimed the creation of a generalized analytical model of high-speed, AMPE with coercivity permanent magnet (VPM) on an elastic bearing supports, taking into account the mutual influence of processes in AMPA and bearing supports. This task is new and relevant and is essential to modern engineering. To solve this problem this paper developed a generalized mathematical model of the rotor system on a hybrid magnetic suspension. Evaluate the impact of hybrid magnetic bearings on the overall behavior of the rotor system. Performed analysis of processes in Electromechanical energy converters and mechanical processes occurring in the rotary system.

**Method and methodology.** The research methodology is based on the joint solution of Maxwell equations and equations describing the mechanical processes of a rotor system with five degrees of freedom.

**Conclusion.** The generalized mathematical model of high-speed, AMPE with VPM on a non-contact bearing supports and conducted her research. Based on research of the developed mathematical model, the authors developed an original control algorithm for the rotor position in a hybrid magnetic bearings, which allows for the design of high-speed, AMPE with VPM to abandon the position sensors of the rotor. In addition, on the basis of the results of calculations, a method was developed for diagnostics of eccentricity of rotor are high-speed, AMPE with VPM, as well as new methods of calculation of high-speed, AMPE with VPM, past experimental verification.

**Key words:** hybrid magnetic levitation system, Electromechanical converters of energy

### Введение

Развитие авиакосмической и машиностроительной отрасли, робототехники и автономной энергетики ставит перед мировым электромашиностроением задачи по созданию высокооборотных электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ЭМПЭ с ВПМ) мощностью от 10 до 700 кВт, с частотами вращения ротора до 200 000 об/мин и сверхвысокооборотных

ЭМПЭ мощностью до 1 кВт и частотами вращения до 1 000 000 об/мин [1, 2].

Применение данных ЭМПЭ с ВПМ является одним из перспективных направлений, которое позволяет значительно расширить функциональные возможности объектов, в которых они установлены, а также минимизировать массогабаритные показатели этих объектов и повысить их вырабатываемую мощность. Поэтому различными производственными компаниями и корпорациями ведутся исследования, разработки и производство подобных ЭМПЭ [3–9].

Так компанией Calnetix разрабатываются высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ мощностью от 3 до 700 кВт для авиационной промышленности, кораблестроения, нефтяной и газовой промышленности. В ЭМПЭ с ВПМ компанией Calnetix для минимизации потерь на трение, обусловленных высокой частотой вращения ротора ЭМПЭ используются магнитные подшипники.

Компанией Capstone Turbine Corporation серийно выпускается несколько типоразмеров микротурбинных установок в которых используются высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ (частоты вращения от 60000 до 96000 об/мин, мощности от 35 до 1200 кВт). Для минимизации потерь на трение в ЭМПЭ с ВПМ компании Capstone используются аэродинамические подшипниковые опоры.

NASA (Glenn Research Center, Cleveland, Ohio) работает над созданием высокооборотного ЭМПЭ с ВПМ для малых космических аппаратов. Мощность данного ЭМПЭ будет составлять 7 кВт, частота вращения ротора 50000 об/мин. Для снижения потерь на трение применяются электромагнитные подшипники и магнитные подшипники на постоянных магнитах [3].

Аналогичные работы ведутся ABB, ETH Zurich, Cryostar Group, E+A Elektromaschinen und Antriebe AG и другими компаниями [3–7].

Из анализа промышленно производимых высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ [3-7], большинство данных ЭМПЭ, с целью повышения их эффективности и минимизации потерь выполняются на бесконтактных подшипниковых опорах (БПО, аэродинамических или магнитных подшипниковых опорах) или упругих подшипниковых опорах (например гидродинамических подшипниках).

Использование БПО приводит к значительному усложнению конструктивной схем высокооборотного ЭМПЭ с ВПМ, а также к усложнению процесса его проектирования, так при это требуется учет не только электромеханических, электромагнитных и тепловых процессов в ЭМПЭ, но и процессов в БПО, а также их взаимовлияния. Поэтому для обеспечения точности процесса проектирования высокооборотных ЭМПЭ на БПО требуется, помимо прочего, создание новых математических

инструментов для их разработки, которые позволили бы учесть взаимовлияния БПО и ЭМПЭ с ВПМ в процессе эксплуатации.

### **Постановка задач исследования**

В работе [9] представлена математическая модель ЭМПЭ с ВПМ, а также разработана ее программная реализация в Matlab Simulink. В данной модели рассмотрены только электромагнитные процессы в высокооборотных ЭМПЭ. В [10] произведен многодисциплинарный анализ тепловых и механических процессов в высокооборотных ЭМПЭ с помощью программного комплекса Ansys. В [11] также с помощью программного комплекса Ansys решена задача многодисциплинарных исследований сверхвысокооборотных ЭМПЭ. В [12] разработана математическая модель для беспазовых ЭМПЭ в которой учитываются только электромагнитные процессы в высокооборотных ЭМПЭ. В [13] решается многодисциплинарная задача оценки теплового состояния высокооборотных ЭМПЭ. В [14] приведены совместные исследования тепловых и электромагнитных процессов в ЭМПЭ. В [15] разработана математическая модель магнитных подшипников, но при этом не рассматривается их влияние на высокооборотный ЭМПЭ. Таким образом, математических моделей и междисциплинарных исследований высокооборотных отдельно ЭМПЭ с ВПМ и отдельно БПО в литературе представлено значительное множество, а многодисциплинарных исследований системы высокооборотный ЭМПЭ – бесконтактные подшипниковые опоры, с учетом их взаимовлияний в литературе не представлено. Хотя данная задача является весьма актуальной, как для фундаментальной науки (на ее основе может сформулирована обобщенная целевая функция для оптимизации высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ), так и для прикладных задач (решение данной задачи позволит значительно повысить точность проектирования высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ, по результатам решения данной задачи могут быть сформулированы новые алгоритмы управления положением ротора высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ).

Поэтому данная работа направлена создание обобщенной аналитической модели высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ на упругих подшипниковых опорах, учитывающей взаимовлияние процессов в ЭМПЭ и БПО. Данная задача, как видно из представленного обзора, является новой и актуальной и имеет важное значение для современного энергомашиностроения. При аналитическое решение данной задачи будет иметь общий, масштабный характер, в отличие от решения данной задачи методами компьютерного моделирования (Femm, Ansys).

## Обобщенная математическая модель высокооборотного ЭМПЭ на упругих подшипниковых опорах

При разработке обобщенной математической модели, описывающей высокооборотные ЭМПЭ на БПО, рассматривается жесткий, недеформируемый ротор на упругих подшипниковых опорах (в качестве упругих подшипниковых опор могут выступать активные магнитные подшипники, газовые подшипники, гибридные магнитные подшипник), при этом ротор массой  $m_p$  установлен на двух опорах (рисунок 1). Статическая неуравновешенность массы ротора характеризуется эксцентриситетом  $e$ , динамическая – угловым параметром  $\beta$ .

В качестве ЭМПЭ при разработке математической модели рассматривается неявнополюсная ЭМПЭ с ВПМ, рисунок 1. Для упрощения математических преобразований используются следующие допущения:

- магнитная проницаемость окружающей среды и воздушного зазора равна магнитной проницаемости вакуума;
- величина немагнитного зазора намного меньше радиуса его кривизны, кривизна;
- обмотка статора представляется в виде тонкого электропроводящего слоя, распределенного по диаметру расточки магнитопровода статора;  $k_d$ ;
- плотность индуцированных токов по толщине тонкого медного слоя постоянна;
- теплопроводность активных элементов ЭМПЭ постоянна по всем координатным осям (активные элементы ЭМПЭ изотропны);
- аксиальная составляющая напряженности магнитного поля в торцевых поверхностях ротора равна 0, то есть рассматривается ЭМПЭ бесконечной длины;
- температура в воздушном зазоре считается известной.

При решении поставленной задачи ищется совместное решение нескольких систем уравнений:

- системы уравнений, описывающих электромагнитные процессы в высокооборотном ЭМПЭ (системой уравнений Максвелла для медленно движущихся сред):

$$\operatorname{rot} \vec{H} = j + j_{\text{ст}} + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\vec{j} = \sigma \left[ \vec{E} + (\vec{V} \times \vec{B}) \right], \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (5)$$

$$\vec{H} = \mu_0 \vec{B}, \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_e \quad (7)$$

где  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции результирующего магнитного поля;  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  – вектор напряженности электрического и магнитного полей;  $\vec{V}$  – вектор скорости движения ротора;  $\sigma$  – электрическая проводимость обмотки статора;  $\vec{j}$  – вектор плотности индуцированных токов;  $\vec{j}_{\text{ст}}$  – вектор плотности сторонних токов;

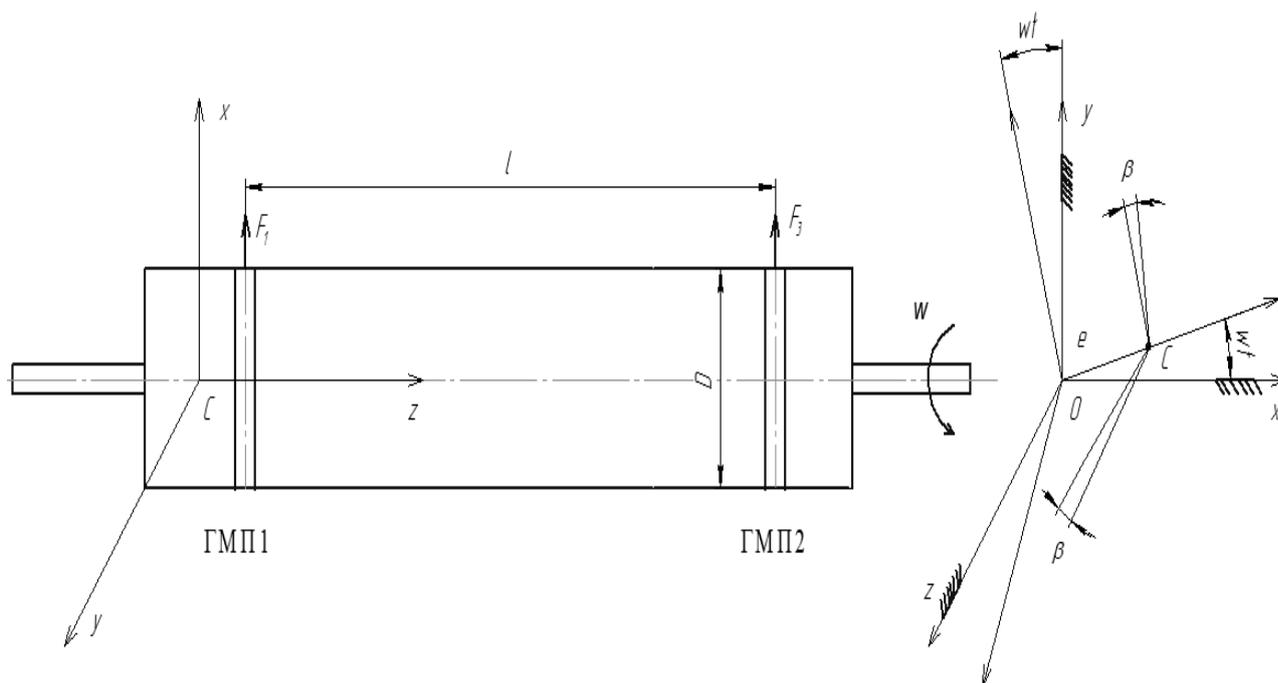


Рис. 1. Обобщенная конструктивная схема ЭМПЭ на ГМП

– математической модели, описывающей механическое движение ротора:

$$m_1 \ddot{x}_1 - m_{12} \ddot{x}_2 + h_0 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = Q_{1m} + Q_1 + Q_{1v}(t), \quad (8)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 - m_{12} \ddot{y}_2 - h_0 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = Q_{2m} + Q_2 + Q_{2v}(t), \quad (9)$$

$$-m_{12} \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 - h_0 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = Q_{3m} + Q_3 + Q_{3v}(t), \quad (10)$$

$$-m_{12} \ddot{y}_1 - m_2 \ddot{y}_2 + h_0 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = Q_{4m} + Q_4 + Q_{4v}(t), \quad (11)$$

где  $Q_{1m} - Q_{4m}$  – силы реакции опор;  $Q_1 - Q_4$  – внешние силы, определяющие характер движения ротора;

$$Q_{1v}(t) = \frac{m_p e \omega^2}{l_B} (z_2 \cos \omega t) - \frac{(J_1 - J_3) e \omega^2}{l_B} (\sin \omega t);$$

$$Q_{2v}(t) = \frac{m_p e \omega^2}{l_B} (z_2 \sin \omega t) - \frac{(J_1 - J_3) e \omega^2}{l_B} (-\cos \omega t);$$

$$Q_{3v}(t) = \frac{m_p e \omega^2}{l_B} (-z_1 \cos \omega t) - \frac{(J_1 - J_3) e \omega^2}{l_B} (-\sin \omega t);$$

$$Q_{4v}(t) = \frac{m_p e \omega^2}{l_B} (-z_1 \sin \omega t) - \frac{(J_1 - J_3) e \omega^2}{l_B} (\cos \omega t);$$

$e$  – эксцентриситет ротора;  $m_B$  – масса вала с ротором;  $l_B$  – длина вала ротора;  $\omega$  – частота вращения ротора;  $J_1$  – экваториальный момент инерции вала;  $J_3$  – осевой момент инерции

вала;  $m_1 = \frac{J_1 + m_B z_2^2}{l_B^2}$ ,  $m_{12} = \frac{J_1 + m_B z_1 z_2}{l_B^2}$ ,  $m_2 = \frac{J_1 + m_B z_1^2}{l_B^2}$  – изменение массы

ротора;  $h_0 = \frac{J_3 \omega}{l_B^2}$  – гироскопический коэффициент;  $x_1, x_2, y_1, y_2$  – радиальные

смещения вала в упругой подшипниковой опоре;  $z_1, z_2$  – осевая координата первого и второго БПО;  $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{y}_1, \dot{y}_2$  – вторые производные от перемещений по времени.

Для общего анализа физических процессов в ЭМПЭ с ВПМ разрабатываемая математическая модель должна учитывать зависимость параметров магнитного поля в рабочем зазоре ЭМПЭ от температуры.

Учитывая, что магнитная индукция в воздушном зазоре ЭМПЭ пропорциональна остаточной индукции ВПМ, то зависимость магнитного поля ЭМПЭ с ВПМ от температуры может быть описана в виде:

$$B(\Theta) = B_0 \left( 1 - \frac{k_{Br} (\Theta_{\text{ВПМ}} - 23)}{100} \right),$$

где  $B(\Theta)$  – действующие значения остаточной индукции и коэрцитивной силы ВПМ соответственно;  $\Theta_{\text{ВПМ}}$  – температура ВПМ;  $k_{Br}$  – температурный коэффициент остаточной индукции ВПМ.

Данное выражение может быть представлено в следующем виде:

$$\partial B = B_0 - \frac{B_0 k_{Br} \partial \Theta_{\text{ВПМ}}}{100},$$

Разделив обе части выражения на  $\partial t$ :

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{B_0}{\partial t} - \frac{B_0 k_{Br}}{100} \frac{\partial \Theta_{\text{ВПМ}}}{\partial t},$$

Из системы уравнений Максвелла следует, что

$$-\frac{\partial B}{\partial t} = \text{rot} \vec{E}.$$

При анализе электромагнитных процессов предполагается, что результирующее магнитное поле определяется суммой двух магнитных полей (поля ротора и поля индуцируемого в обмотке статора):

$$\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2, \quad (12)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2. \quad (13)$$

Тогда система уравнений Максвелла может быть переписана в виде:

$$\operatorname{rot}\vec{H} = j + j_{\text{CT}} + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (14)$$

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial B_1}{\partial t} - \frac{\partial B_2}{\partial t} - \left( \frac{B_0}{\partial t} - \frac{B_0 k_{Br}}{100} \frac{\partial \Theta_{\text{ВПМ}}}{\partial t} \right), \quad (15)$$

$$\vec{j} = \sigma \left[ \vec{E} + (\vec{V} \times \vec{B}) \right], \quad (16)$$

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0, \quad (17)$$

$$\operatorname{div}\vec{j} = 0, \quad (18)$$

$$\vec{H} = \mu_0 \vec{B}, \quad (19)$$

$$\operatorname{div}\vec{D} = \rho_e, \quad (20)$$

Из выражения (15) видно, что если  $\frac{\partial B_1}{\partial t} = 0, \frac{\partial B_2}{\partial t} = 0$  (ротор неподвижен), но при этом  $\frac{\partial \Theta_{\text{ВПМ}}}{\partial t} \neq 0$  (то есть температура ЭМПЭ изменяется во времени), то ЭМПЭ с ВПМ может генерировать электрическую энергию, мощность которой определяется скоростью изменения температурного потока и свойствами ВПМ. Очевидно, что скорость изменения температуры ВПМ много меньше скорости вращения высокооборотных ЭМПЭ. Но в тоже время доказанное свойство ЭМПЭ с ВПМ может быть использовано при создании различных типов датчиков и микротермоэлектрических генераторов.

Данный вывод является одним из свойств ЭМПЭ с ВПМ, которое нехарактерно для других типов электрических машин.

Решая систему уравнений (1)–(11) относительно напряженности вторичного поля, имеем следующее:

$$\Delta \vec{H}_2 - \mu_0 \sigma \left( \frac{d\vec{H}_2}{dt} - \operatorname{rot}(\vec{V} \times \vec{H}_2) \right) = -\mu_0 \sigma \left( \frac{d\vec{H}_1}{dt} - \operatorname{rot}(\vec{V} \times \vec{H}_1) \right). \quad (21)$$

При решении уравнения (21) обычно принимается, что ротор ЭМПЭ обладает одной степенью свободы, и скорость ротора не зависит от координат. При рассмотрении ЭМПЭ на упругих подшипниковых опорах ротор обладает 5 степенями свободы, в связи с чем, данное допущение при решении для ЭМПЭ на упругих подшипниковых опорах будет не верным.

Представим  $\operatorname{rot}(\vec{V} \times \vec{H}_2)$  в виде:

$$\operatorname{rot}(\vec{V} \times \vec{H}_2) = (\vec{H}_2 \cdot \nabla) \vec{V} - (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{H}_2 + \vec{V} \operatorname{div} \vec{H}_2 - \vec{H}_2 \operatorname{div} \vec{V}, \quad (22)$$

$$\operatorname{rot}(\vec{V} \times \vec{H}_1) = (\vec{H}_1 \cdot \nabla) \vec{V} - (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{H}_1 + \vec{V} \operatorname{div} \vec{H}_1 - \vec{H}_1 \operatorname{div} \vec{V}, \quad (23)$$

где  $\nabla$  – оператор Гамильтона.

Так как  $\operatorname{div}\vec{H}_2 = 0, \operatorname{div}\vec{H}_1 = 0$ :

$$\text{rot}(\vec{V} \times \vec{H}_2) = (\vec{H}_2 \cdot \nabla) \vec{V} - (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{H}_2 - \vec{H}_2 \text{div} \vec{V}, \quad (24)$$

$$\text{rot}(\vec{V} \times \vec{H}_1) = (\vec{H}_2 \cdot \nabla) \vec{V} - (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{H}_2 - \vec{H}_2 \text{div} \vec{V}. \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \Delta \vec{H}_2 - \mu_0 \sigma \left( \frac{d\vec{H}_2}{dt} - \left( (\vec{H}_2 \cdot \nabla) \vec{V} - (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{H}_2 - \vec{H}_2 \text{div} \vec{V} \right) \right) = \\ = -\mu_0 \sigma \left( \frac{d\vec{H}_1}{dt} - \left( (\vec{H}_1 \cdot \nabla) \vec{V} - (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{H}_1 - \vec{H}_1 \text{div} \vec{V} \right) \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Из векторного анализа известно, что:

$$(\vec{H}_1 \cdot \nabla) \vec{V} = H_{x1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + H_{y1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + H_{z1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}, \quad (27)$$

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{H} = V_x \frac{\partial \vec{H}}{\partial x} + V_y \frac{\partial \vec{H}}{\partial y} + V_z \frac{\partial \vec{H}}{\partial z}. \quad (28)$$

При проектировании ЭМПЭ с упругими опорами более целесообразно оперировать переменными в декартовой системе координат. Это обусловлено тем, что практически все системы управления БПО построены именно на использовании декартовой системы координат.

Тогда с учетом выражений (27), (28) можно записать следующее:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{H}_2 - \mu_0 \sigma \left( \frac{d\vec{H}_2}{dt} - \left( -\vec{H}_2 \text{div} \vec{V} + \left( H_{x2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + H_{y2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + H_{z2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \left( V_x \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial x} + V_y \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial y} + V_z \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial z} \right) \right) \right) = \\ = -\mu_0 \sigma \left( \frac{d\vec{H}_1}{dt} - \left( -\vec{H}_1 \text{div} \vec{V} + \left( H_{x1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + H_{y1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + H_{z1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \left( V_x \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial x} + V_y \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial y} + V_z \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial z} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (29)$$

Допускается, что в направлении оси  $z$  ротор жестко закреплен:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{H}_2 - \mu_0 \sigma \left( \frac{d\vec{H}_2}{dt} - \left( -\vec{H}_2 \text{div} \vec{V} + \left( H_{x2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + H_{y2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \right) - \left( V_x \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial x} + V_y \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial y} \right) \right) \right) \\ = -\mu_0 \sigma \left( \frac{d\vec{H}_1}{dt} - \left( -\vec{H}_1 \text{div} \vec{V} + \left( H_{x1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + H_{y1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + H_{z1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) - \left( V_x \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial x} + V_y \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial y} + V_z \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial z} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (30)$$

Совокупность представленных выражений является обобщенным математическим описанием высокооборотного ЭМПЭ с ВПМ на БПО.

## Заключение

Таким образом, разработана обобщенная математическая модель высокооборотного ЭМПЭ с ВПМ на бесконтактных подшипниковых опорах и проведены ее исследования. На основе исследований разработанной математической модели, авторами был разработан оригинальный алгоритм управления положением ротора в гибридных магнитных подшипниках который позволяет при проектировании высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ отказаться от датчиков положения ротора. Кроме этого, на основе результатов расчетов была разработана способ диагностики эксцентриситета ротор высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ, а также новые методы расчета высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ, прошедшие экспериментальную верификацию.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 16-38-60001).

## Библиографический список

1. Hendershot J. & Miller T. Design of brushless permanent-magnet motors // Oxford University Press, 1996.
2. Borisavljevic A. Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines // Printed by Wormann Print Service. – Zutphen, the Netherlands, 2011. – P. 209.
3. Nagorny A. S., Jansen R. H. & Kankam D. M., Experimental performance evaluation of a highspeed permanent magnet synchronous motor and drive for a flywheel application at different frequencies, in Proceedings // Electrical Machines-ICEM, 2006. – pp. 1-8.
4. Binder A. & Schneider T. Permanent magnet synchronous generators for regenerative energy conversion - a survey // Power Electronics and Applications, 2005. – pp. 110-115.
5. Malmquist A. Mikrogasturbinen als Wegbereiter der dezentralen Wärme- und Stromversorgung // ABB Technik.- 3/2000. – p.22-30.
6. Nagorny A., Dravid N., Jansen R. & Kenny B. Design Aspects of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Applications // NASA/TM–2005–213651, 2005. – pp.1-7.
7. Bailey C., Saban D. & Guedes-Pinto P. Design of High-Speed Direct-Connected Permanent-Magnet Motors and Generators for the Petrochemical Industry // IEEE Transactions on Industry Applications, 2009. – vol. 45. № 3. – pp. 1159-1165.
8. Isomura K., Murayama M., Teramoto S., Hikichi K., Endo Y., Togo S. & Tanaka S. Experimental Verification of the Feasibility of a 100W Class Micro-scale Gas Turbine at an Impeller Diameter of 10 mm, J. // Micromech. Microeng, 2006. – no. 16. – pp. 254-261.

9. Kulkarni S. S. & Thosar A. G. Mathematical Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Machine // International Journal of Electronics and Electrical Engineering. – vol. 1. – №. 2. – pp. 66-71.
10. Kolondzovski Z., Arkkio A., Larjola J. & Sallinen P. Power limits of high-speed permanent-magnet electrical machines for compressor applications. Report Series on Electromechanics // Report 76, Aalto University School of Science and Technology, Espoo 2010. – 21 p.
11. Li W., Zhang X. & Cheng S. Thermal Optimization for a HSPMG Used for Distributed Generation Systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013. – vol. 60. – no. 2. – pp. 474-482.
12. Pierre-Daniel Pfister Very High Speed Slotless Permanent Magnet Motors: Analytical Modeling, Optimization, Design and Torque Measurement Methods // IEEE Transactions on industrial electronics. – vol. 57. – no. 1. – pp. 45-49.
13. Tüysüz A., Steichen M., Zwyssig C. & Kolar J. W. Advanced cooling concepts for ultra-high-speed machines // Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), pp. 2194-2202.
14. Vong P. & Rodger D. Coupled electromagnetic-thermal modeling of electrical machines // IEEE Trans. on Magn. – vol. 39. – no 3. – pp. 1614-1617.
15. Shen J. & Fabien B. Optimal control of a flywheel energy storage system with a radial flux Hybrid Magnetic Bearing // Journal of the Franklin Institute–Engineering and Applied Mathematics, 2002. – vol. 339. – no 2. – pp. 189-210.

## References

1. Hendershot J. & Miller T. Design of brushless permanent-magnet motors, Oxford University Press, 1996.
2. Borisavljevic A. Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines. Zutphen, 2011. 209 p.
3. Nagorny A. S., Jansen R. H. & Kankam D. M. *Electrical Machines-ICEM*, 2006, pp. 1–8.
4. Binder A. & Schneider T. *Power Electronics and Applications*, 2005, pp. 110–115.
5. Malmquist A. *ABB Technik*, 2000, no. 3, pp.22–30.
6. Nagorny A., Drauid N., Jansen R. & Kenny B. *NASA/TM*, 2005, 213651, pp.1–7.
7. Bailey C., Saban D. & Guedes-Pinto P. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 1159–1165.
8. Isomura K., Murayama M., Teramoto S., Hikichi K., Endo Y., Togo S. & Tanaka S. *Micromech. Microeng*, 2006, no.16, pp. 254–261.
9. Kulkarni S. S. & Thosar A. G. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, vol. 1, №. 2, pp. 66–71.

10. Kolondzovski Z., Arkkio A., Larjola J. & Sallinen P. Power limits of high-speed permanent-magnet electrical machines for compressor applications. Report Series on Electromechanics, Report 1976, Aalto University School of Science and Technology, Espoo 2010, 21 p.
11. Li W., Zhang X. & Cheng S. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 2, pp. 474–482.
12. Pierre-Daniel Pfister *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 57, №. 1, pp.45–49
13. Tüysüz A., Steichen M., Zwyssig C. & Kolar J. W. *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, pp. 2194–2202.
14. Vong P. & Rodger D. *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 39, no. 3, pp. 1614–1617.
15. Shen J. & Fabien B. *Journal of the Franklin Institute–Engineering and Applied Mathematics*, 2002, vol. 339, no. 2, pp. 189–210.

**Сведения об авторе:**

БАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич  
E-mail: s2\_88@mail.ru

**Information about author:**

Viacheslav VAVILOV  
E-mail: s2\_88@mail.ru

УДК: 624.012.45.04

**Л. Ю. Соловьев**

Сибирский государственный университет путей сообщения

## **МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВ**

Дата поступления: 30.08.2016

Решение о публикации: 01.09.2016

Дата публикации: 30.09.2016

**Аннотация:** Цель исследования – совершенствование математических подходов к оценке долговечности железобетонных конструкций. Используемый в работе метод исследования основан на известных положениях теории пластического течения с двойным изотропным упрочнением.

**Результатом работы** являются основные математические зависимости модели нелинейного деформирования бетона на базе теории пластического течения, и алгоритм их применения для оценки долговечности бетонных и железобетонных конструкций мостов.

При построении модели использован закон неассоциированного течения. Для описания нелинейной сжимаемости материала при трехосном напряженном состоянии, введены дополнительные поверхности нагружения и пластического потенциала.

Поверхность прочности представлена в пространстве главных напряжений в виде замкнутого объема (колпачковая модель). Поверхность нагружения строится на основе принципа подобия поверхности прочности.

Сложность полученной математической модели компенсируется возможностями расчета конструкций при непропорциональных нагружениях.

Модель может быть встроена в общую модель деформирования бетона и железобетона с трещинами, в том числе – с учетом циклических и длительных нагружений.

**Практическая значимость** состоит в применимости модели для прогнозирования долговечности статически неопределимых бетонных и железобетонных конструкций, имеющих повреждения в виде трещин.

**Ключевые слова:** Теория пластического течения, неассоциированный закон течения, нелинейное деформирование бетона, долговечность железобетонных мостов

**L. Yu. Solovyov**

Siberian Transport University

**MODEL OF DEFORMATION OF CONCRETE BASED ON FLOW  
PLASTICITY THEORY FOR ANALYSIS OF DURABILITY OF PLAIN  
CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE BRIDGE CONSTRUCTIONS**

**Abstract: The purpose of research** - perfection of mathematical approaches to an estimation of durability of reinforced concrete structures. The method of research used in work is based on known positions of theories of plasticity with nonassociated flow rule and double isotropic hardening.

**Result of work** are the basic mathematical dependences of nonlinear model of concrete on the basis of the nonassociated flow rule, and algorithm of their application for an estimation of durability of concrete and reinforced concrete bridge structures.

The nonassociated flow rule is used. For the description of nonlinear compressibility of a material at the three-dimension stress state, additional loading surfaces and the plastic potential, are entered.

The strength surface of durability is presented in the principle stresses space in the form of the closed volume (cap model). The loading surface is under construction as similar of a strength surface.

Complexity of the received mathematical model is compensated by opportunities of calculation of designs at nonproportionate loadings.

The model can be built in the general model of deformation of concrete and reinforced concrete with cracks, including - in view of cyclic and long term loadings.

**The practical importance** consists in applicability of model for forecasting durability of statically indefinable concrete and ferro-concrete designs having damages in the form of cracks.

**Keywords:** the nonassociated law, nonlinear deformation of concrete, durability of reinforced concrete bridges

## Введение

Срок службы конструкций транспортных сооружений определяется нагрузками, изменчивостью прочностных и деформативных параметров материалов под воздействием агрессивных факторов окружающей среды, конструкционными особенностями сооружения.

Под воздействием окружающей среды меняются прочностные и деформативные характеристики бетона и арматуры, за счет разрушения бетона продуктами коррозии арматуры сокращается рабочая площадь сечения. В результате этих процессов изменяется жесткость сечений, образуются трещины в бетоне, что приводит к перераспределению усилий как между сечениями конструкции (особенно статически неопределимых), так и между бетоном и арматурой в пределах одного сечения, изменяется несущая способность сооружения в целом.

Нагружение в зонах ослаблений становится непропорциональным даже при внешне монотонно изменяющейся нагрузке. Теория пластического течения позволяет с единых позиций учитывать такой характер нагружения отдельных зон конструкций, как при монотонном возрастании, так и при повторно-переменных воздействиях внешней нагрузки [1, 2, 5]. Это позволяет эффективно моделировать перераспределение усилий в конструкциях при нелинейном численном анализе методом конечных элементов.

В настоящее время существуют предложения по установлению зависимостей между параметрами диаграммы деформирования бетона, прочностью материалов, величиной сцепления арматуры с бетоном и т.д. и временем воздействия агрессивных факторов внешней среды [13-15]. Эти зависимости после преобразований для соответствия теории пластического течения бетона могут быть использованы для оценки технического состояния эксплуатируемых транспортных сооружений и установления долговечности конструкций.

Одним из критериев долговечности сооружения является время до исчерпания несущей способности, определяемое с учетом развития деградационных процессов в материале конструкций [3, 4]. При этом, несмотря на вероятностный характер исходных данных, определение несущей способности целесообразно выполнять в детерминированной форме.

## Цель

Совершенствование математических подходов к оценке долговечности железобетонных конструкций, одним из которых является разработка модели нелинейного деформирования бетона на основе пластического течения для расчетов несущей способности бетонных и железобетонных конструкций мостов с учетом изменчивости свойств материалов под воздействием факторов времени и агрессивности внешней среды.

## Метод

Теоретической основой для разработки модели является теория пластического течения.

*Гипотезы* [6, 9]

1. Приращение полных деформаций:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p, \quad (1)$$

где  $d\varepsilon_{ij}^e$  – приращения упругих деформаций;  $d\varepsilon_{ij}^p$  – приращения пластических деформаций.

2. Приращение упругих напряжений:

$$d\sigma_{ij}^e = D_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl}, \quad (2)$$

где  $D_{ijkl}^e$  – матрица упругости.

3. Вектор пластических деформаций ортогонален поверхности пластического потенциала:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (3)$$

где  $d\lambda$  – пластический множитель;  $G(\sigma_{ij}, \varepsilon^p)$  – функция пластического

потенциала.

4. Поверхность нагружения состоит из двух независимых поверхностей:  $f_1(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0$ , учитывающей процессы нелинейного увеличения объема бетона при сжатии, и  $f_2(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0$ , отражающей процесс необратимой сжимаемости материала.

Полная величина пластической деформации определяется как [8]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\varepsilon_{ij}^{p(1)} + d\varepsilon_{ij}^{p(2)}, \quad (4)$$

где

$$d\varepsilon_{ij}^{p(1)} = d\lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{ij}}; d\varepsilon_{ij}^{p(2)} = d\lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (5)$$

$d\lambda_k, g_k(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p)$  – пластические множители и пластические потенциалы соответствующих поверхностей нагружения.

5. Механизмы упрочнения поверхностей не зависят друг от друга [10].

#### *Основные соотношения модели*

Стадия пластического (нелинейного) деформирования определяется как [7, 11,12]:

$$d\sigma_{ij} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \sigma_0} \geq 0; d\sigma_{ij} \frac{\partial f_\beta}{\partial \sigma_0} \leq 0, \alpha \neq \beta, \alpha, \beta = 1, 2. \quad (6)$$

В моделях с составными поверхностями это условие записывается в виде:

$$\left. \begin{aligned} d f_1 &= \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon_{kl}^p} d\varepsilon_{kl}^p = 0; \\ d f_2 &= \frac{\partial f_2}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon_{kl}^p} d\varepsilon_{kl}^p = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Принимая

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p), \quad (8)$$

где  $D_{ijkl}^e$  — матрица упругости,

получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl} - d\lambda_1 R_{11} - d\lambda_2 R_{12} &= 0; \\ \frac{\partial f_2}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl} - d\lambda_1 R_{21} - d\lambda_2 R_{22} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где

$$R_{\alpha\beta} = \frac{\partial f_\alpha}{\partial \sigma_{rs}} D_{rstu}^e \frac{\partial g_\beta}{\partial \sigma_{rs}} - B_{\alpha\beta}, \alpha, \beta = 1, 2. \quad (10)$$

Согласно гипотезе 5  $B_{12} = B_{21} = 0$ . Отсюда

$$\left. \begin{aligned} d\lambda_1 &= \frac{1}{\det \mathbf{R}} \left( \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_{ij}} R_{22} - \frac{\partial f_2}{\partial \sigma_{ij}} R_{12} \right) d\sigma_{ij}^e; \\ d\lambda_2 &= \frac{1}{\det \mathbf{R}} \left( \frac{\partial f_2}{\partial \sigma_{ij}} R_{11} - \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_{ij}} R_{21} \right) d\sigma_{ij}^e, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $d\sigma_{ij}^e$  вычисляются по формуле (2);  $\det \mathbf{R} = R_{11}R_{22} - R_{21}R_{12}$ ,  
 $B_{\alpha\alpha} = -h_\alpha \sqrt{\frac{\partial g_\alpha}{\partial \sigma_{kl}} \frac{\partial g_\alpha}{\partial \sigma_{kl}}}$ ,  $\alpha = 1, 2$ ,  $h_\alpha$  – эмпирические параметры упрочнения.

После ряда преобразований [1] представим выражение для матрицы  $D_{ijkl}^{ep}$  как

$$\begin{aligned} D_{ijkl}^{ep} &= D_{ijkl}^e - \\ &\frac{1}{\det \mathbf{R}} \sum_{\alpha=1}^2 D_{ijmn}^e \frac{\partial g_\alpha}{\partial \sigma_{mn}} \left( \frac{\partial f_\alpha}{\partial \sigma_{rs}} R_{\beta\beta} - \frac{\partial f_\beta}{\partial \sigma_{rs}} R_{\alpha\beta} \right) D_{rskl}^e, \quad (12) \\ &\alpha \neq \beta, \alpha, \beta = 1, 2. \end{aligned}$$

Для симметризации матрицы (12) вводим поверхность текучести эквивалентного материала  $F$ :

$$F_\alpha(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = g_\alpha(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) + \Phi_\alpha(\varepsilon_{ij}^p) = 0, \alpha = 1, 2. \quad (15)$$

где  $\Phi(\varepsilon_{ij}^p)$  – корректирующая функция

Используя (15) получим, как показано в [1] окончательное выражение для симметричной матрицы запишем в виде

$$\begin{aligned} D_{ijkl}^{ep} &= D_{ijkl}^e - \\ &-\frac{1}{\det \mathbf{R}'} \sum_{\alpha=1}^2 D_{ijmn}^e \frac{\partial g_\alpha}{\partial \sigma_{mn}} \left( \frac{\partial g_\alpha}{\partial \sigma_{rs}} R'_{\beta\beta} - \frac{\partial g_\beta}{\partial \sigma_{rs}} R'_{\alpha\beta} \right) D_{rskl}^e, \quad (16) \\ \det \mathbf{R}' &= R'_{11}R'_{22} - R'_{12}R'_{21}, \alpha \neq \beta, \alpha, \beta = 1, 2. \end{aligned}$$

В (19) обозначено:

$$\mathbf{R}' = \left\{ \begin{aligned} &\frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{rs}} D_{rstu}^e \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{tu}} - H_{11} \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{rs}} D_{rstu}^e \frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{tu}} \\ &\frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{rs}} D_{rstu}^e \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{tu}} \quad \frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{rs}} D_{rstu}^e \frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{tu}} - H_{22} \end{aligned} \right\}; \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{11} &= \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{rs}} D_{rstu}^e \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{tu}} - \\ &-\frac{1}{d\lambda_1} \left[ \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij}^e - \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{rs}} D_{rstu}^e \frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{tu}} d\lambda_2 \right] \\ H_{22} &= \frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{rs}} D_{rstu}^e \frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{tu}} - \\ &-\frac{1}{d\lambda_2} \left[ \frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij}^e - \frac{\partial g_2}{\partial \sigma_{rs}} D_{rstu}^e \frac{\partial g_1}{\partial \sigma_{tu}} d\lambda_1 \right] \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Величины пластических множителей  $d\lambda_\alpha$  в (18) определяются согласно (11).

## Поверхности нагружения и пластического потенциала

Будем рассматривать модель нелинейного деформирования бетона с изотропным упрочнением. Все мгновенные (промежуточные) поверхности нагружения на всех этапах нагружения сохраняют подобие друг другу и предельной поверхности (поверхности прочности).

Первую поверхность нагружения примем в виде поверхности прочности [1]:

$$f_1(I_1(T_\sigma), J_2(D_\sigma), J_3(D_\sigma), m_c) = 0, \quad (19)$$

где  $I_1(T_\sigma)$  – первый инвариант тензора напряжений;  $J_2(D_\sigma)$ ,  $J_3(D_\sigma)$  – второй и третий инварианты девиатора напряжений;  $m_c$  – показатель упрочнения материала.

При  $m_c = 1$  функция (19) определяет предельную поверхность нагружения, при  $m_c = m_0$  – начальную поверхность.

Примем мгновенную поверхность нагружения в виде

$$\bar{\tau}_0^2 + a_1 \bar{J}_3(D_\sigma) + c_1 = 0, \quad (20)$$

где

$$a_1 = \frac{\sqrt{2}(1-K)}{\bar{\tau}_{0c}(1-K+K^2)}; c_1 = -\frac{\bar{\tau}_{0c}^2 K^2}{1-K+K^2};$$

$\bar{\tau}_0 = \tau_0 R_b^{-1}$  – относительное октаэдрическое касательное напряжение;  
 $\bar{J}_3 = J_3 R_b^{-3}$ ;

$$\bar{\tau}_{0c} = \frac{1}{6} \left\{ A + \sqrt{A^2 - 48\sqrt{2}m_c(\bar{\sigma}_0 - c)} \right\}, \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} A &= m_c(\sqrt{2}-4) - 2c(3\bar{\sigma}_0 + 6 + m_c); \\ c &= m_c \chi \left\{ 4a - [4 + \sqrt{2}a(\chi + b)^{-1}](1+b) \right\} \{ 2[m_c \chi(1+b) + 6ma] \}^{-1}; \\ \chi &= R_{bt} R_b^{-1}; a = m(\chi - 1); b = m(\chi + 1); m = 1 + 1,25\chi. \end{aligned}$$

$\bar{\sigma}_0 = \sigma_0 R_b^{-1}$  – относительное среднее нормальное напряжение;

$$K = m\sqrt{2}(m\sqrt{2} - \alpha)^{-1}, \quad (22)$$

$\alpha = 2(2+c)\bar{\tau}_{0c}[4(\bar{\sigma}_0 - c) - \bar{\tau}_{0c}]$ ,  $m$ ,  $c$  – переменные, описанные в (24).

Сечение второй поверхности при  $\mu_\sigma = \pm 1$ :

$$f_2(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = d_0 \bar{\tau}_{0c}^* + \bar{\sigma}_0 - \sigma^* = 0, \quad (23)$$

где  $d_0 = -0,2$ ;  $\sigma^*$  – параметр, связанный с механизмом упрочнения поверхности;  $\bar{\tau}_{0c}^*$  – величина, определяемая из выражения (21).

Для получения других сечений достаточно продифференцировать функции первой поверхности по множителям  $m_c$  при заданных значениях  $\bar{\tau}_{0c}^*$  и  $\sigma^*$ .

Первая поверхность пластического потенциала  $g_1 = 0$  имеет вид

$$t(2\bar{\tau}_0 - t)(1 - \bar{\sigma}_0) + \bar{\tau}_0 = 0, \quad (24)$$

где  $t = \bar{\tau}_0 + \sqrt{\bar{\tau}_0^2 + \bar{\tau}_0(1 - \bar{\sigma}_0)^{-1}}$ .

Вторая (замыкающая) поверхность пластического потенциала  $g_2 = 0$ :

$$q\bar{\tau}_0 + p\bar{\sigma}_0 - \sigma^* = 0, \quad (25)$$

Где  $p = -1; q = 2 \left[ 1,25 - 0,2\bar{\sigma}_0 + \sqrt{(1,25 + 0,2\bar{\sigma}_0)^2 + 0,8(\bar{\tau}_0 - 0,2\bar{\sigma}_0)} \right]^{-1}$ . Параметры

упрочнения для поверхностей приведены в [1, 2].

*Место представленных соотношений в общей модели деформирования трехмерных (массивных) железобетонных элементов с трещинами*

Основная зависимость в общей модели железобетона [1, 5] между бесконечно малыми приращениями напряжений и деформаций сохраняет общую форму (2). Поэтому для включения разработанных соотношений в общую модель достаточно вычислить характеристики бетона  $D_{ijkl}$ , как показано выше, учесть армирование и трещинообразование, как показано, например, в [5].

Подробное описание алгоритмов общей модели железобетона с учетом представленной модели приведено в [1].

### **Оценка долговечности железобетонных конструкций с учетом разработанной модели**

Особенностью применения модели для оценки долговечности конструкций состоит в том, что достаточно в параметры функций (20) и (21) ввести коэффициенты, учитывающие изменение прочностных и деформативных свойств материала со временем – принцип подобия поверхностей сохраняется и здесь. Для учета изменения модуля упругости бетона с течением времени можно воспользоваться известными зависимостями [4].

Коррозия и другие повреждения арматуры учитываются аналогично в рамках общей модели деформирования железобетона.

Долговечность как момент исчерпания эксплуатационной пригодности по условию прочности элементов конструкции определяется последовательными расчетами несущей способности при различных значениях времени эксплуатации.

### **Практическая значимость**

Модель базируется на методе конечных элементов, что позволяет с единых позиций уже на стадии проектирования оценивать долговечность будущего строения.

## Заключение

1. Представлены основные положения модели нелинейного деформирования бетона на основе теории течения.
2. Показано место полученных выражений в общей модели деформирования трехмерных железобетонных элементов.
3. Показаны пути применения модели для оценки долговечности бетонных и железобетонных конструкций.

## Библиографический список

1. Круглов В. М. Нелинейное деформирование бетона и железобетона / В. М. Круглов, Н. И. Карпенко, Л. Ю. Соловьев. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2001. – 276 с.
2. Соловьев Л. Ю. Нелинейная модель бетона на основе теории пластического течения // Системы. Методы. Технологии, 2014. – 4 (24). – С. 131–140.
3. Овчинников И. Г. Инженерные методы расчета конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах // Учебное пособие / И. Г. Овчинников, А. И. Айнабеков, Н. В. Кудайбегов. – Алматы, РИК, 1994. – 132 с.
4. Пухонто Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 424 с.
5. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
6. Ильюшин А. А. Пластичность. – М.: АН СССР, 1948. – 376 с.
7. Wolffersdorf P.-A. Algorithmus zur Entwicklung allgemeiner elasto-plastischer Stoffgleichungen und dessen Anwendung auf bodenmechanische doppel-werfestigungs-Modelle // Wiss. Z. Hochsch. Archit. Wiemar, 1985. – No. 31. – 6В. – С. 288-291.
8. Ивлев Д. Д., Быковцев Г. И. Теория упрочняющегося пластического тела. – М.: Наука, 1971. – 232 с.
9. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М., 1975. – 400 с.
10. Desai C. S., Hashmi Q. S. E. Analysis, evaluation and implementation of nonassociative model for geologic material // Int. J. Plast., 1984. – vol. 5. – no. 4. – pp. 397-420.
11. Dvorkin E. N., Cuitino A. M., Gioia G. A concrete material model based on nonassociated plasticity and fracture // Eng. Comput., 1989. – vol. 6. – pp. 281-294.
12. Frantziskonis G., Desai C. S. Constitutive model for nonassociative behavior // J. Eng. Mech., 1986. – vol. 112. – no. 9. – pp. 932-946.
13. Бенин А. В. Математическое моделирование процесса разрушения

сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения. / А. В. Бенин, А. С. Семенов, С. Г. Семенов, Б. Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал, 2013. – № 5 (40). – С. 86-99.

14. Бенин А. В. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения. / А. В. Бенин, А. С. Семенов, С. Г. Семенов, Б. Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал, 2014. – № 1 (45). – С. 23-40.

15. Бенин А. В. Конечно-элементное моделирование процессов разрушения и оценка ресурса элементов автодорожного моста с учетом коррозионных повреждений. / А. В. Бенин, А. С. Семенов, С. Г. Семенов, Б. Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал, 2012. – № 7 (33). – С. 32-42.

## References

1. Karpenko N. I., Kruglov V. M. & Solovyov L. Yu. Nelineinoe deformirovanie betona i zelezobetona [Non-linear Deformation of Concrete and Reinforced Concrete]. Novosibirsk, 2001, 276 p.

2. Soloviev L. Yu. *Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 4 (24), pp. 131–140.

3. Ovchinnikov I. G., Ainabekov A. I. & Kudaybegov N. V. Ingenernye metody rascheta konstrukcyi, ekspluatiruyuschihsa v agressivnyh sredah [Engineering methods of calculation of structures, maintained in excited environments]. Almaty, 1994, 132 p.

4. Poukhonto L. M. Dolgovechnost zelezobetonnyh konstrukcyi ingenernyh sooruzenyi [Durability of reinforced concrete structures]. Moscow, 2004, 424 p.

5. Karpenko N. I. Obschie modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow, 1996. 416 p.

6. Ilushin A. A. Plastichnost [The plasticity]. Moscow, 1948. 376 p.

7. Wolffersdorf P.-A. *Wiss. Z. Hochsch. Archit. Wiemar*, 1985, no. 31, 6B, pp. 288–291.

8. Ivlev D. D. & Bykovtsev G. I. Teoria uprochniaiyschegosia plasticeskogo tela [The theory of the strengthened plastic environment]. Moscow, 1971. 232 p.

9. Malinin N. N. Prikladnaia teoria plastichnosi i polzuchesti [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow, 1975. 400 p.

10. Desai C. S. & Hashmi Q. S. E. *Int. J. Plast.*, 1984, vol. 5, no. 4, pp. 397–420.

11. Dvorkin E. N., Cuitino A. M. & Gioia G. *Eng. Comput.*, 1989, vol. 6,

pp. 281–294.

12. Frantziskonis G. & Desai C. S. *J. Eng. Mech.*, 1986, vol. 112, no. 9, pp. 932–946.

13. Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G. & Melnikov B. E. *Ingenerno-stroitelnyi zhurnal – Engineering-building journal*, 2013, no. 5 (40), pp. 86–99.

14. Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G. & Melnikov B. E. *Ingenerno-stroitelnyi zhurnal – Engineering-building journal*, 2014, no. 1 (45), pp. 23–40.

15. Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G. & Melnikov B. E. *Ingenerno-stroitelnyi zhurnal – Engineering-building journal*, 2012, no. 7 (33), pp. 32–42.

**Сведения об авторе:**

СОЛОВЬЕВ Леонид Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО СГУПС)

E-mail: [lys111@yandex.ru](mailto:lys111@yandex.ru)

**Information about author:**

Leonid Yu. Solovyov – candidate of technical sciences (PhD in engineering), associated professor of Siberian State Transport University

E-mail: [lys111@yandex.ru](mailto:lys111@yandex.ru)

УДК: 338.945:530.1

**В. К. Федюкин**

## **НЕВОЗМОЖНОСТЬ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА**

Дата поступления 07.08.2016

Решение о публикации 01.09.2016

Дата публикации 30.09.2016

**Аннотация:** Предлагается решение застарелой и актуальной научно-технической проблемы сверхпроводимости электрического тока.

Выявлены несоответствия фактам и внутренние противоречия гипотезы о сверхпроводимости электрического тока телами, в условиях сверхнизких температур. Сформулировано новое (альтернативное) понимание сути и адекватной теории явления, ошибочно называемого низкотемпературной сверхпроводимостью электрического тока без сопротивления. Анализ закона Ома и его ограничений доказывает невозможность возникновения сверхпроводимости. Утверждается, что при охлаждении проводника его электросопротивление увеличивается, а не уменьшается. При переохлаждении проводника происходит изоляция им электрического тока.

Предложены двухтоковая модель и начала соответствующей теории электропроводности. Показано, что в соответствии с реальной двухтоковой теорией распространения (течения) электрической энергии по проводнику, сверхпроводимости не может быть. Этот же вывод доказывают закон Джоуля-Ленца и факты увеличения электросопротивления от действия на проводник внешнего магнитного поля и уменьшения температуры проводника.

Обосновано, что физическая природа электросопротивления состоит в противодействии движению внешнего электромагнитного поля (электричества) по проводнику от самоиндуцированного в нем диамагнитного поля. Утверждается, что при глубоком переохлаждении диамагнитность проводника становится больше магнитного поля электричества и проводник превращается в сверхдиамагнитный электроизолятор (диэлектрик).

Замена ошибочного учения о сверхпроводимости электричества на давно предлагаемую автором этой статьи альтернативную и наиболее обоснованную теорию холодной сверхдиамагнитиваемости веществ позволяет решить многие проблемы практического использования явления сверхдиамагнитиваемости при создании новых процессов и перспективной техники будущего.

**Ключевые слова:** сверхпроводимость, сверхдиамагнетизм, электроизоляционность.

**Veniamin K. Fedyukin**

## IMPOSSIBILITY OF SUPERCONDUCTIVITY ELECTRIC FLOW

**Abstract:** The solution of an old and urgent scientific and technical problem of superconductivity of electric current is proposed.

Discrepancies to the facts and internal contradictions of a hypothesis of superconductivity of electric current by bodies, in the conditions of cryogenic temperatures are revealed. The new (alternate) comprehension of an essence and the adequate theory of the phenomenon which is inaccurately called by the low-temperature superconductivity of electric current without resistance is formulated. The analysis of an Ohm's law and its restrictions proves impossibility of emergence of superconductivity. It is claimed that when cooling the conductor its resistance increases, but does not decrease.

When overcooling the conductor there is an isolation of electric current by it. The two-current model and the beginnings of the corresponding theory of an electrical conductivity are offered. It is shown that according to the actual two-current theory of distribution (current) of electric energy on the conductor, superconductivity cannot be. The same conclusion is proved by the law of Joule-Lenz and the facts of increase in resistance from action on the conductor of an external magnetic field and decrease of temperature of the conductor.

It is proved that the physical nature of resistance consists in counteraction of an external electromagnetic field (electricity) to the movement on the conductor from the diamagnetic field self-induced in it. It is claimed that at deep overcooling the diamagnetization of the conductor becomes more magnetic field of electricity and the conductor turns into the superdiamagnetic electroisolation center (dielectric).

Replacement of the inaccurate doctrine about superconductivity of electricity on long ago the alternate and most reasonable theory of a cold superdiamagnetization of substances offered by the author of this article allows to solve many problems of practical use of the phenomenon of a superdiamagnetization during creation of new processes and perspective technique of the future.

**Key words:** superconductivity, superdiamagnetism, insulation electric.

### Введение

Проблема теории и практики использования сверхпроводимости, а по существу, гипотезы о движении электричества в его проводнике без сопротивления, состоит в противоречии фундаментальным законам природы, в частности, основным законам механики, термодинамики, электрофизики, осмысленному опыту (объективной практике) повсеместного использования электричества и, на конец, здравому смыслу и научной картине материального мира. В этом отношении достаточно вспомнить хотя бы элементарную механику Ньютона, доказавшую, что всякому действию есть противодействие и поэтому, любому движению есть сопротивление. Электрическому току тоже всегда есть сопротивление, которое преодолевается или не преодолевается электродвижущей силой источника тока, как в случае с так называемой сверхпроводимостью тока при закритически низких температурах.

## Постановка задачи

В данной статье антимировоззренческие аспекты гипотезы о сверхпроводимости электрического тока без сопротивления не рассматриваются, так как их решения против идеи о сверхпроводимости вполне очевидны. Здесь анализируются только некоторые основополагающие вопросы физики явления, ошибочно называемого и считающегося сверхпроводимостью.

Ошибочность «теории сверхпроводимости» приводит к неправильным решениям при попытках использовать эту «теорию» при создании новой техники. Разработка адекватной теории перехода веществ в иное, фактически сверхдиамагнитное, а не в сверхпроводящее состояние является важной и одной из наиболее актуальных задач физико-технических наук.

### Экспериментальные результаты, полученные Гейке Камерлинг-Оннесом

Начиная с 1911 года [1;2], в науке об электричестве ошибочно считается, что существует феноменальное (исключительное) физическое явление возникновения у различных металлических и неметаллических материалов сверхпроводимости электрического супертока без сопротивления при закритически низких температурах. Такое представление о сверхпроводимости сформировано Гейке Камерлинг-Оннесом [3;4] в результате фальсификаций при объяснении (толковании) результатов экспериментов. Исследователи, подвергая проводники с электрическим током глубокому охлаждению вплоть до 1-4-х градусов Кельвина, объективно обнаруживают следующие три факта:

1. Разность электрических потенциалов на концах охлаждаемого участка однородного проводника ( $\Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}$ ), то есть напряжение  $U$  постепенно уменьшается, а при определенной критической температуре  $T_{\text{кр}}$  резко, скачкообразно исчезает.

2. По мере охлаждения, проводник с током уменьшает тепловыделение, а по достижении критической температуры  $T_{\text{кр}}$  вообще перестает нагреваться.

3. При докритических температурах охлаждения величина магнитного поля  $H$  электрического тока  $I$ , совпадающего по направлению с вектором движения тока, уменьшается, а по достижении критической температуры поле  $H$  исчезает, но возникает значительно большее, чем обычно, противоположно направленное постоянное магнитное поле индукции  $B$ , то есть происходит сверхдиамагнитивание провода, которое сохраняется и после отключения участка цепи от источника электрического напряжения.

Из литературных первоисточников Г. Оннеса, его сотрудников и других исследователей «сверхпроводимости» известно, как при стремлении согласованно объяснить новые обнаруженные в экспериментах факты, которые тогда представлялись противоречивыми и революционными, возникла гипотеза о феноменальной сверхпроводимости электрического тока. Логика формирования этой гипотезы такова. Первым исходным тезисом было и существует мнение о том, что, так как у проводника с током всегда есть магнитное поле, то сохранение магнитного поля у провода и при температурах ниже критической непременно свидетельствует о нахождении в нем электрического тока, даже если охлажденный участок цепи отключен от источника электрического тока. Это суждение и логически, и по существу является ошибочным [3;4], так как наличие магнитного поля у объекта не гарантирует, что в нем есть электрический ток. Примером магнитного поля без тока являются постоянные магниты из углеродистых сталей и других материалов. Вторым тезисом (производным от первого) в обосновании сверхпроводимости является следующий. Электрический ток в проводнике, у которого нет разности электрических потенциалов, течет сам по себе и без сопротивления. Наконец, ток без сопротивления не может нагревать проводник, но при этом величина холодного тока почему-то становится неограниченной и даже бесконечно большой. Так, якобы, возникает сверхток. Но очевидно, и в науке об электричестве давно известно, что без разности потенциалов нет тока. Току без разности потенциалов не из чего произойти. Но, все же утверждается, что ток сверхпроводимости без сопротивления почему-то необъяснимо и как-то противоестественно течет. Но это утверждение противоречит фундаментальным законам (принципам) не только физики, но и других наук естествознания. Против возможности существования супертока сверхпроводимости приведем следующее простое логическое рассуждение. В соответствии с постулатом об отсутствии сопротивления току в «сверхпроводящем» участке цепи имеем, что ток (потенциал и напряжение), входящий в рассматриваемый участок проводника, проскакивает, проходит как бы по инерции, без потерь, не изменяясь. В таком случае  $I_{вх} = I_{вых}$ , а по мнимому сверхпроводнику не может течь бесконечно большой суперток. Приведенные здесь простые аргументы опровергают гипотезу о сверхпроводимости и ее псевдотеорию.

Автором этой статьи давно предлагается адекватное объяснение вышеперечисленных трех фактов, проявляющихся в экспериментах с током в теле при закритически низких температурах. Разработаны и основы новой (альтернативной) теории явления перехода проводника с током или вещества без тока, но находящегося в магнитном поле, в состояние сверхдиамагнитичности при критической температуре. Образную модель этого превращения, то есть научное представление о физической природе рассматриваемого явления, очень кратко можно описать так. Важнейшим фактором здесь является магнитное превращение в веществе, когда в нем

при  $T_{кр}$  происходит смена магнитного поля  $H$ , воспринимаемого от внешнего источника, на собственное диамагнитное поле, то есть, на противоположно направленное магнитное поле  $B$ . Диамагнитное поле индукции  $B$ , противодействуя полю  $H$ , при достижении  $T_{кр}$  становится равным или больше  $H$ , что резко увеличивает электросопротивление и делает вещество диэлектриком, электроизолятором. Блокировка тока, то есть его отсутствие в прежнем проводнике приводит к исчезновению у него разности электрических потенциалов, к отсутствию тока и нагрева провода. Так оказывается, что обнаруженные Оннесом и его сотрудниками экспериментальные факты являются взаимосвязанными и непротиворечивыми. Это позволяет создать истинную теорию явления низкотемпературного сверхдиамагнитивания веществ, а не перехода их в состояние «сверхпроводимости» электрического тока.

В данной статье подробнее рассмотрены основные вопросы, касающиеся теории сверхпроводимости и низкотемпературного сверхдиамагнетизма.

### **Ошибки в трактовке экспериментальных результатов**

Все приведенные выше экспериментальные факты и их краткие объяснения, даже без подробного анализа на соответствие их предположению Г. Оннеса о сверхпроводимости, свидетельствуют о невозможности электрического тока в условиях большой диамагнитичности проводника, без разности потенциалов у него и без нагрева. Однако, вероятно, по недоразумению, в современной науке об электричестве, эти факты объясняются фантастической сверхпроводимостью электрического тока.

**Во-первых**, понятие о сверхпроводимости и его теоретическое обоснование невозможно без соответствующего учета закона Ома. Однако, почему-то преднамеренно факт уменьшения и последующего исчезновения электрического напряжения, то есть разности электрических потенциалов на концах охлаждённого участка проводника, абсолютно необоснованно принимается за такое же уменьшение вольт-амперного показателя  $R$ , уподобляемого показателю электросопротивления. Это, по сути дела, противоречит логике, результатам экспериментов и практике, а также классическому закону Ома, в частности, для определенно рассматриваемого участка электрической цепи.

Считается, что в далеком 1826 году физик Георг Ом экспериментально установил прямую зависимость (связь) между током («магнитной силой»)  $I$  и напряжением  $U$ , то есть, между током и «возбуждающей силой» или «разностью электрических сил» по терминологии Г. Ома. Он установил, что ток соответствует напряжению:  $I \sim U$  [5]. Позднее Ом и его последователи старались найти соответствующий

коэффициент пропорциональности между  $I$  и  $U$ . Это привело к тому, что в настоящее время закон Ома для участка цепи из однородного проводника формулируется так: «Сила тока  $I$  прямо пропорциональна напряжению  $U$ , и обратно пропорциональна сопротивлению тока  $R$ ». А если сказать проще, то: «Электрический ток проводника численно равен отношению напряжения к сопротивлению». При этом под электронапряжением участка проводника понимается разность электрических потенциалов на входе (в начале) и на выходе (в конце) участка проводника, то есть,  $U = \Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}$ . Поэтому закон Ома, в приведенных выше определениях, математически записывают как

$$I = \frac{\Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}}{R} = \frac{\Delta\Psi}{R} = \frac{1}{R} U = \frac{U}{R} . \quad (1)$$

Ток  $I$ , определяемый по закону Ома, называем током сопротивления или потребительским током, потому, что он, как и напряжение  $U$ , создается сопротивлением на любом участке провода. Видимо поэтому, принято считать, что коэффициент обратной пропорциональности  $R$  в уравнениях (1) является показателем электросопротивления проводника. Однако это утверждение не вполне корректно, что еще будет подтверждено.

Анализируя закон Ома, трудно не согласиться с его основным смыслом о том, что чем больше сопротивление проводника, тем меньше на нём разность электрических потенциалов, то есть, тем меньше «падают» напряжение  $U$  и ток  $I$ . И наоборот, чем меньше сопротивление, тем, естественно, больше разность потенциалов и больше расходуемый ток. Если придерживаться установившегося понимания и общепринятой формулировки закона Ома, то в этом случае, очевидно, что уменьшение  $U$  в результате охлаждения проводника, свидетельствует об увеличении его сопротивления, а не об уменьшении электросопротивления, как это утверждается в «теории сверхпроводимости» и в других разделах электрофизики.

Итак, уже на этом первом этапе рассмотрения связей закона Ома со «сверхпроводимостью» электричества, можно обоснованно утверждать, что, так как при охлаждении проводника с электрическим током на нём объективно уменьшается его напряжение, то есть «падает» разность электрических потенциалов, то это приводит к уменьшению тока из-за увеличения, а не из-за уменьшения электросопротивления, регулирующего этот ток. Исчезновение  $U$  у охлаждаемого проводника, с током, будучи по-прежнему подключенным к нему напряжением от источника электричества, убедительно доказывает, что тока в таком случае у провода без его напряжения не существует, что при этом проводник становится изолятором с большим сопротивлением, блокирующим расходование электрической энергии, то есть не пропускающим ток  $I$ .

Так как «сверхпроводимость» изначально противоречит сути закона Ома и экспериментальным фактам, то она не может быть признана в качестве объективного физического явления природы.

В научной литературе часто утверждается, что по закону Ома, при отсутствии сопротивления ( $R=0$ ) ток  $I=\infty$ , то есть, становится бесконечным или неограниченно большим. Но это не так, а такого сверхтока в природе нет и быть не может. Существуют и другие аргументы против сверхтока сверхпроводимости. Очевидно, что разность потенциалов на концах проводника или напряжение тока предопределяет величину этого тока. Но разность потенциалов в принципе не может быть больше входного электрического потенциала  $\Psi_{\text{вх}}$  и напряжение  $U$  тоже не может быть больше входного напряжения  $U_{\text{вх}} = \Psi_{\text{вх}}$ . Кроме того,  $R$  в основной формуле (1) закона Ома и в других формулах, не может быть меньше единицы еще и потому, что при  $R < 1$  получается, что частное от деления  $U$  на  $R$ , то есть  $I$ , невероятно, но оказывается больше делимого, а это, по определению простого арифметического деления чисел, невозможно, недопустимо. Следовательно,  $\Delta\Psi$  и  $U$  существуют у проводника в таких пределах:  $0 < \Delta\Psi < \Psi_{\text{вх}}$ ,  $0 < \Delta U < U_{\text{вх}}$ . Поэтому максимальный ток не может быть больше тока абсолютного короткого замыкания, когда сопротивление практически равно нулю, то есть  $I_{\text{max}} = U_{\text{вх}}$ , где  $U_{\text{вх}} = \Psi_{\text{вх}} - 0$ . Получается, что по закону Ома, диапазон изменения реального тока  $I$  в зависимости от величины переменного значения показателя  $R$ , ограничен пределами  $0 < I < I_{\text{max}}$ . Это ограничение рабочего тока отрицает возникновение сверхтока сверхпроводимости, который не проявляется в экспериментах. Данный факт вновь отвергает существование сверхпроводимости электрического тока в проводнике при закритической температуре его глубокого охлаждения.

Наряду с вышеизложенными аргументами, необходимо определить в каких пределах может изменяться показатель  $R$ . Из формулы закона Ома следует что

$$R = \frac{U}{I} \geq 1 \quad (2)$$

Величина  $U$  (по закону Ома) всегда больше  $I$ . Это наглядно отражается, например, в виде графиков вольт-амперных характеристик для однородных проводников. Так как  $U > I$ , то  $R$  количественно всегда больше единицы ( $R > 1$ ), а это просто формально-математически не допускает неограниченного сверхтока большего, чем  $I_{\text{max}}$ , то есть, не допускает тока сверхпроводимости. Укажем, кстати, что, во-первых, ток проводника объективно не может быть больше, чем физически способен обеспечить его данный источник тока и, во-вторых, никакой материал не обладает сверхъестественными способностями (возможностями) сверхпроводимости тока  $I_{\text{сп}}$ , якобы стремящегося к бесконечно большому по величине ( $I_{\text{сп}} \rightarrow \infty$ ). Суперток сверхпроводимости от нулевого сопротивления это нечто крайне

фантастическое в научной «теории сверхпроводимости». В реальности нет сопротивления только тогда, когда проводник отключен от источника тока.

Еще одно замечание, относящееся к закону Ома и, в частности, к измерениям характеристик свойств тока. Принято, по аналогии с формулой (3), что элементарной физической единицей измерения сопротивления является  $1 \text{ Ом} = 1 \text{ вольт} / 1 \text{ ампер}$ , то есть, 1 Ом когда 1 вольт = 1 ампер. В таком случае получается, что при любом численном значении сопротивления ток  $I = U$ . Однако, по закону Ома это невозможно, так как при действии сопротивления даже в 1 Ом, то численно 1 вольт всегда больше 1 ампера (1 вольт > 1 ампера). Кроме того, по закону Ома, указанного равенства быть не может по причине несовпадения существующих размерностей сочетаемых величин. Однако практически *вольт* и *ампер* однородные силовые характеристики. Параметр  $R$  выражает не натуральную, не реальную величину сопротивления, а соотношение соответствующих свойств, измеряемых в вольтах и амперах. Это указывает на определенную некорректность или на неточность, содержащуюся в формулах закона Ома (1) и (2).

Далее, так как практически всегда  $R > 1$ , а ток при этом меньше, чем разность потенциалов или электронапряжение тока проводника, то  $I$  не может быть больше  $I_{\text{max}}$ . С другой стороны, при наибольшем значении  $R$  конкретного проводника с током ( $R_{\text{max}} \geq R_{\text{бл}}$ ) ток прекращается, следовательно, диапазоны изменения  $R$  и  $I$  таковы. При  $R_{\text{min}} = 1$ , ток  $I = U$ , а при  $R_{\text{max}} = R_{\text{бл}}$  ток  $I_{\text{min}} = 0$ , поэтому  $1 \leq R \leq R_{\text{бл}}$  и ток изменяется в пределах  $0 < I \leq I_{\text{max}} = \Psi_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}$ . Это не согласуется с учением о сверхпроводимости.

Указанные количественные ограничения параметров формулы (1) не допускают ни  $R < 1$ , ни  $R = 0$ , ни  $I = \infty$ , что делает невозможной сверхпроводимость электрического тока ни при каких условиях электропроводности.

Считается, что формула (1) является расчетной и поэтому она уверенно используется при определении, например, численного значения тока  $I$  проводника по известным значениям его  $U$  и  $R$ . Однако это утверждение требуется обосновать. Зная  $U$  и  $I$ , по формуле (2) можно рассчитать коэффициент  $R$ . Но при подстановке выражения (4) в формулу (1) получаем, что для расчета численного значения  $I$  по формуле (1) чтобы вычислить коэффициент  $R$ , нужно предварительно знать искомую величину тока  $I$ . Такой метод расчета тока  $I$  по его же величине, то есть посредством самого себя, в научной логике считается неприемлемым, признается некорректным и называется «порочным кругом». Нет смысла так рассчитывать  $I$ , если его значение уже известно, так как  $I$  входит в показатель  $R$ . С позиций математики тоже получается, что формула (1) закона Ома некорректна и не решаема из-за недопустимости того, что искомая величина  $I$  (функция) содержится в числе аргументов правой части уравнения, то есть, находится в составе коэффициента  $R$ . Однако, если все-

таки делать это, то получаем:  $I = \frac{U}{U/I} = \frac{UI}{U} = I$ , что демонстрирует тавтологичность и абсурдность подобного рода расчетов. Это же противоречие содержится и в определении величины удельного сопротивления  $\rho$ .

Зная о непосредственной зависимости разности потенциалов (напряжения) на проводнике и расходуемого тока от сопротивления, можно утверждать, что в формуле (1)  $\Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}} = U$  и  $I$  есть показатели реального сопротивления  $r = \Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}} = \Delta\Psi$  проводника с током. Поэтому для определения величины тока  $I$  не надо делить ни  $\Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}$ , ни  $U$  на какой-либо показатель сопротивления. Следовательно, уточненная формула (1) закона Ома должна иметь вид:

$$I = \Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}} = U \quad (3)$$

Так как параметр реального сопротивления  $r$  численно равен уменьшению разности потенциалов  $\Delta\Psi$ , то есть эквивалентен падению напряжения  $\Delta U = U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}} = \Delta\Psi$  на участке проводника, то очевидно, что ток, преодолевший сопротивление проводника (ток проводимости потенциальной электрической энергии)  $P$  равен величине напряжения этого тока в конце рассматриваемого участка электрической цепи. Эти равенства записываются так:

$$P = \Psi_{\text{вх}} - \Delta\Psi = \Psi_{\text{вх}} - (\Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}) = \Psi_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} \quad (4)$$

Расходуемый электрический ток  $I$  можно оценивать (определять) по его электропроводности из проводника. Эта электрическая проводимость конкретного проводника, то есть электропроводность или его расходность и коэффициент электропроводности  $\Omega$  – есть понятие и количественная характеристика преобразования проводником входной потенциальной энергии (потенциала  $\Psi_{\text{вх}}$ ) в электрический как бы ток  $I$  в окружающую проводник среду. Показателем электропроводности мнимого тока  $I$  является соответствующий коэффициент  $\Omega$ , который выражает долю расходуемого тока  $I$  и его разности потенциалов  $\Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}$  по отношению к входному потенциалу электричества, подаваемого проводнику, то есть:

$$\Omega = \frac{\Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}}{\Psi_{\text{вх}}} = \frac{U}{\Psi_{\text{вх}}} \quad (5)$$

Поэтому ток  $I$  равен:

$$I = \Psi_{\text{вх}} \Omega = \Psi_{\text{вх}} \frac{\Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}}{\Psi_{\text{вх}}} = \Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}} = U \quad (6)$$

Уравнения (4) и (6) выражают закон эквивалентности (равенства) величин тока сопротивления и его разности потенциалов (напряжения) на концах проводника. Это свойство динамики электричества существенно упрощает и уточняет физическую теорию электричества, а также теорию и практику электротехники.

Относительно определения количественного значения второй составляющей суммарного электрического тока, то есть тока проводимости

$P$ , на ограниченном участке проводника, то его легко определить, используя коэффициент проводимости этого тока:

$$G = 1 - \Omega = 1 - \frac{\Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}}{\Psi_{\text{вх}}} = 1 - \frac{\Delta\Psi}{\Psi_{\text{вх}}} \quad (7)$$

В таком случае ток проводимости находим как

$$P = \Psi_{\text{вх}} G = \Psi_{\text{вх}}(1 - \Omega) = \Psi_{\text{вх}} \left(1 - \frac{\Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}}{\Psi_{\text{вх}}}\right) = \Psi_{\text{вх}} \left(\frac{\Psi_{\text{вх}} - \Delta\Psi}{\Psi_{\text{вх}}}\right) = U_{\text{вых}} \quad (8)$$

Из равенств (3), (5), (6) и (4), (7), (8) следует, что, например, при максимально большом сопротивлении  $r$ , численно равном  $\Psi_{\text{вх}}$ , разность потенциалов  $\Delta\Psi = 0$ , ток  $I = 0$  и ток  $P = 0$ .

Воображаемое электросопротивление  $r = 0$ , которого нет, возможно, только если в проводнике нет токов, так как  $\Psi_{\text{вх}} = 0$ . Фактически всегда  $0 < r \leq \Psi_{\text{вх}}$ . В указанном диапазоне сопротивлений токи  $I$  и  $P$  изменяются синхронно: они увеличиваются или уменьшаются одновременно и эквивалентно, то есть равными долями в соответствии с таким же изменением  $r$ . При малом сопротивлении токи  $I$  и  $P$  большие и наоборот. Но суммарная величина двух токов  $I+P$  не может быть больше того, что обеспечивает  $\Psi_{\text{вх}}$ . Увеличение сопротивления равномерно уменьшает  $I$ ,  $P$  и  $U = \Delta\Psi$ . Поэтому исчезновение разности потенциалов у «сверхпроводников» свидетельствует о достижении у них предельно большого сопротивления и об отсутствии токов в переохлажденном проводе.

В изложенной здесь сущности электрических токов проводника нет возможности возникновения сверхпроводимости супертока без сопротивления.

**Вторым** решающим аргументом, опровергающим существование сверхпроводимости, является факт отсутствия нагрева «сверхпроводящего» проводника с предполагаемым неограниченно большим супертоком электричества.

При выяснении причины того, что провод в состоянии якобы сверхпроводимости не нагревается, проводя чрезмерно большой ток, необходимо обратиться к закону Джоуля-Ленца. Экспериментальный факт, исследованный еще в 1833 г. независимо друг от друга англичанином Д.Джоулем и россиянином Э.Ленцем, состоит в том, что проводник, по которому передается (течет) электрическая энергия, нагревается и им выделяется в окружающую среду определенное количество тепла  $Q$  за единицу времени. Констатация этого факта получила название закона Джоуля-Ленца.

В экспериментах при охлаждении проводника с электрическим током установлено, что с понижением температуры, нагрев и тепловыделение проводника уменьшается, а при критической температуре холода  $T_{\text{кр}}$  нагрев и выделение тепла прекращаются. Так как естественной причиной, источником выделяющейся тепловой энергии является электрический ток сопротивления, то изменения  $Q$  также является отражением

соответствующего изменения величины тока  $I$ . Поэтому очевидно, что  $Q$  прямо пропорциональна току  $I$  или падению напряжения на данном проводнике, то есть тепло  $Q$  пропорционально  $U = \Psi_{\text{вх}} - \Psi_{\text{вых}}$ . Из этого следует, что уменьшение и последующее невыделение тепла охлаждаемым проводником электричества является доказательством одновременного увеличения сопротивления и уменьшения до исчезновения тока сопротивления и тока проводимости. Представляется очевидным и убедительным утверждение того, что по закону Джоуля-Ленца и на практике отсутствие тепловыделения у так называемых сверхпроводников, подключенных к источникам тока, является очередным доказательством перехода проводника с электрическим током в состояние диэлектрика, изолятора. Поэтому гипотеза о сверхпроводимости не имеет каких-либо оснований, так как очевидно, что если нет нагрева провода, то по нему не передается электричество, нет тока.

Заканчивая краткое рассмотрение связи закон Джоуля-Ленца с представлением о сверхпроводимости электричества, необходимо отметить, что наиболее точную физико-математическую теорию количественного выражения явления нагрева проводника с током, надо еще создать, так как существующая теория содержит существенные противоречия, например, в вопросе о влиянии сопротивления на величину  $Q$ . А пока (в рамках данной статьи) важным является аргумент отрицания сверхпроводимости и других токов фактом отсутствия нагрева критически переохлаждённого проводника, подключенного к источнику электричества.

**Третьим** и одним из основных факторов в решении проблемы сверхпроводимости следует признать то, что при температуре  $T_{\text{кр}}$  магнитное поле  $H$  электрического тока сменяется на противоположное ему диамагнитное поле  $B$ . Магнитная составляющая электромагнитного поля тока совпадает с направлением движения этого тока, а проявляющееся диамагнитное поле противонаправлено и этим противодействует, создает сопротивление полю  $H$  и электрическому току в целом. В этом, в основном, состоит физическая природа сопротивления проводника электрическому току.

Преимущественное влияние внешнего магнитного поля  $H$  (электромагнитного происхождения или от постоянного магнита) на электросопротивление проводника известно давно. Внешнее магнитное поле увеличивает сопротивление электрическому току. С понижением температуры ниже  $T_{\text{кр}}$  внутреннее диамагнитное поле индуцируется активнее и поэтому оно проявляется аномально больше по величине, чем  $H$  ( $(B > H)$  - это сверхдиамагнитность проводника). Собственное сверхдиамагнитное поле материала провода блокирует поле  $H$  и электрический ток, а проводник превращается в диэлектрик, становится изолятором. Теоретические исследования и анализ экспериментов подтверждают достоверность изложенного о диамагнитной природе

электросопротивления. Физическая теория диамагнитного электросопротивления разработана и опубликована автором многократно и, в частности, в монографии [13].

Экспериментально установленный факт перехода различных проводников с электрическим током, при температурах ниже критических  $T_{кр}$ , в состояние сверхдиамагнитности известен давно (см., например, [10;11] и [12, стр. 271-273]). В связи с этим явлением германские ученые братья Лондоны пытались теоретически обосновать гипотезу о сверхпроводимости реальным явлением сверхдиамагнитиваемости проводов [6-9]. Создать приемлемую теорию диамагнитной сверхпроводимости не получилось, так как факты требуют не объяснения сверхпроводимости диамагнетизмом, а замены представления и теории о сверхпроводимости на понятие и теорию сверхдиамагнитиваемости веществ при очень низких температурах.

Есть и такой практический аргумент решительного опровержения сверхпроводимости. Ученые утверждают, что в экспериментах сверхпроводящие провода пропускают сверхток от  $10^6$  до  $10^{12}$  и более ампер в единицу времени, то есть в секунду. Однако они не указывают, как эти сверхбольшие токи измерялись и какими амперметрами. Так как получаемый в расчётах сверхток всегда больше токовых возможностей используемого источника электричества, что невозможно, то это доказывает ошибочность количественного определения сверхтока и самого факта его существования. Нет сверхтока – нет и сверхпроводимости.

## Заключение

Итак, на основании вышеизложенного, надо признать, что сверхпроводимости электрического тока без сопротивления не бывает, а есть, по существу, противоположное сверхпроводимости явление холодной сверхдиамагнитиваемости веществ с одновременным переходом их в состояние электроизоляции. Давно пора перестать заблуждаться в отношении существования сверхпроводимости. Миф о движении электричества без сопротивления уже 105 лет тормозит развитие физической науки, приносит огромные материальные и интеллектуальные затраты и этим наносит ущерб экономикам стран, пытающихся использовать несуществующую сверхпроводимость в исследовательских и промышленных установках, например, в Коллайдерах и Токамаках, а также в ИТР – интернациональных термоядерных реакторах традиционных конструкций и в других научно-технических устройствах и сооружениях. Но, если физическое явление, пока что понимаемое как сверхпроводимость электричества, переосмыслить, признать его сверхдиамагнитиваемостью тел в условиях низких температур и создать соответствующую опытам научную теорию, то станет абсолютной уверенностью в том, что проблемные

и иные вопросы практического использования этого объективного явления природы веществ будут успешно решены.

### Библиографический список

1. Kamerling-Onnes H. On the Sudden Change in the Rate at Which the Resistance of Mercury Disappears. Lab.Univ.Leiden, 1911. 124 p.
2. Kamerling-Onnes H. Further Experiments with Liquid Helium. D. On the Change of the Electrical Resistance of Pure Metals at very low Temperatures. V. The Disappearance of the resistance of mercury. / Communication from the University of Leiden. N122b (Preprint), 1911. – pp. 81-83.
3. Kamerling-Onnes H., Teyn W. Further experiments with liquid helium, Proc. Acad. Sci. Amsterdam, 1923. – vol. 25. – pp. 443-444.
4. Камерлинг-Оннес Г. Исследования свойств тел при низких температурах, приведшие, между прочим, к приготовлению жидкого гелия. (Нобелевская речь 11.12.1913 г.) – Петроград: Печатный Труд, 1914. – 30 с.
5. Кошманов В. В. Георг Ом: учебное пособие. – М.: Просвещение, 1982. – 112 с.
6. London F., London H. Supraleitung and diamagnetismus / Physica, 1935. – vol.2. – no.4. – pp. 341-354.
7. London F. Une conception nouvelle de la supra-conductibilité. /Actualités Scientifiques et Industrielles. № 458. Exposes de physique theorique. XV. Paris, 1937. 80 p.
8. London F. On the Problem of the Molecular Theory of Superconductivity // Physical Review, 1945. – V. 74. – N. 5. – pp. 562-573.
9. London F. Superfluids. Macroscopic theory of superconductivity. – New York, 1950. – 161 p.
10. Гейликман Б. Т. Об аномальном диамагнетизме // Журнал экспериментальной и технической физики 1940. – Т.10. – Вып.5. – С. 497-498.
11. Гинзбург В. Л. К теории сверхдиамагнетиков. // Письма в ЖЭТФ, 1979. – Т. 30. Вып. 6. – С.345-349.
12. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Левитационная транспортная технология. – М.: Физматлит, 2014. – 476 с.
13. Федюкин В. К. Не «сверхпроводимость» электричества, а сверхдиамагнитиваемость и электроизоляционность веществ при низких температурах: монография. – М.: Изд. «Русайнс», 2015. – 236 с.

### References

1. Kamerling-Onnes H. On the Sudden Change in the Rate at Which the Resistance of Mercury Disappears. Lab.Univ.Leiden, 1911. 124 p.
2. Kamerling-Onnes H. Further *Communication from the University of*

*Leiden*, no.122b (Preprint), 1911, pp. 81–83.

3. Kamerling-Onnes H. & Tayn W. Further experiments with liquid helium, *Proc. Acad.Sci.Amsterdam*. vol. 25, 1923, pp. 443–444.

4. Kamerlingh-Onnes G. Issledovaniya svojstv tel pri nizkih temperaturah, privedshie, mezhdu prochim, k prigotovleniyu zhidkogo geliya. (Nobelevskaya rech' 11.12.1913 g.) [The Study of the properties of bodies at low temperatures which led, among other things, to the preparation of liquid helium. (Nobel prize acceptance speech 11.12.1913 year)]. Petrograd, 1914. 30 p.

5. Koshmanov V. V. Georg Om: uchebnoe posobie [Georg Ohm: a tutorial]. Moscow, 1982. 112 p.

6. London F. & London H. *Physica*, 1935, vol. 2, no. 4, pp. 341–354.

7. London F. *Exposes de physique theorique*, XV, no. 458, 1937, 80 p.

8. London F. *Physical Review*, 1945, vol. 74, no. 5, pp. 562–573.

9. London F. *Superfluids. Macroscopic theory of superionductivity*. NY, 1950. 161 p.

10. Geilikman B. T. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, T.10, vol. 5, 1940, pp. 497–498.

11. Ginzburg V. L. *Letters in GETF*, T.30, vol. 6, 1979, pp. 345–349.

12. Antonov Y. F. & Zaitsev A. A. *Levitazionnaya transportnaya tehnologiya* [Levitation jet transport technology]. Moscow, 2014. 276 p.

13. Fedyukin V. K. Ne “sverhprovodimost” ehlektrichestva, a sverhdianamagnichivaemost' i ehlektroizolyacionnost' veshchestv pri nizkih temperaturah: monografiya [Not «superconductivity» of electricity, but superdiamagnetism and electrical insulation substances at low temperatures: monograph]. Moscow, 2015. 236 p.

**Сведения об авторе:**

ФЕДЮКИН Вениамин Константинович, доктор технических наук, профессор

E-mail: [yvf\\_spb@km.ru](mailto:yvf_spb@km.ru)

**Information about author:**

Veniamin K. FEDYUKIN, D. Sc. (Tech.), professor

E-mail: [yvf\\_spb@km.ru](mailto:yvf_spb@km.ru)

**К. Э. Воеводский<sup>1</sup>, В. М. Стрепетов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **МЕТОД УСЛОВНОЙ ГРАНИЦЫ**

Дата поступления 28.07.2016

Решение о публикации 01.09.2016

Дата публикации 30.09.2016

**Аннотация:** Цель работы состоит в том, чтобы предложить новый подход к расчету электромагнитного поля, которое возбуждается вихревыми токами, индуцированными в проводящей среде под воздействием внешнего источника магнитного поля. В работе принято квазистационарное приближение, то есть, не учитываются токи смещения.

**Метод.** Главная особенность метода – введение так называемых *условных границ*. Такое название дано мысленным поверхностям, которые можно провести в области, свободной от проводящей среды. Форма условной границы произвольна и диктуется соображениями удобства расчетов. Принимается соглашение, что на условной границе выполняются такие же граничные условия, как на границе проводник-вакуум.

В работе доказано, что такое изменение задачи приводит к изменению ее решения только вне проводника и только в части электрического поля. Вектор магнитной индукции во всем пространстве, а также вектор напряженности электрического поля в проводящей среде изменению не подвергаются.

В то же время, удачный выбор *условных границ* в ряде случаев позволяет упростить задачу с расчетной точки зрения.

Помимо введения условных границ, предлагаются также некоторые формальные преобразования основных соотношений, описывающих квазистационарное электромагнитное поле. Эти преобразования преследуют ту же цель облегчения расчетов.

**Результат.** Получена новая формулировка задачи расчета квазистационарного электромагнитного поля в виде системы дифференциальных уравнений и граничных условий, включающей как известные соотношения, так и вновь полученные. Новая формулировка равносильна традиционной (с описанной выше оговоркой). Вместе с тем она обладает некоторыми преимуществами с точки зрения удобства расчетов.

**Практическая значимость.** В практике конкретных расчетов разработанный метод будет полезен, в частности, в тех случаях, когда форма проводника близка к некоторой «простой» форме.

**Ключевые слова:** условная граница, электромагнитное поле, вихревые токи, проводящая среда, граничные условия, гармоническая функция, краевая задача, потенциал простого слоя, обобщенная функция, сингулярность, квазистационарное приближение.

**Konstantin E. Voevodskii, Vladimir M. Strepetov**

St. Petersburg State University

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

THE METHOD OF CONDITIONAL BOUNDARY

**Abstract:** The goal of this work is to propose a new approach to the calculation of electromagnetic field that excited by the eddy current induced in the conductive environment the influence of an external magnetic field source. The quasistationary approximation accepted, that is, the bias currents do not take into account.

**Method.** The main feature of the method is the introduction of so-called *conditional boundary*. This name is given for mental surfaces, which can be done in the area, free of conductive environment. Boundary form is arbitrary and dictated by considerations of calculations convenience. The agreement that the same boundary conditions, like on the conductor-vacuum boundary are performed.

We prove that this task change leads to a change in its decisions only outside of the conductor and the only for part of the electric field. Magnetic induction vector throughout the space, as well as electric field tension vector in the conductive environment do not change.

At the same time, a good choice of *conditional boundary* in some cases allows to simplify the task with calculation point of view.

In addition to the conditional boundaries introduction, some formal basic conversion ratios are proposed, describing quasistationary electromagnetic field. These changes had the same goal to simplify calculations.

**The result.** The new formulation of task of quasistationary electromagnetic field calculation is received in the form of differential equations system and boundary conditions, including both known ratio and the newly received. The new formulation is equivalent to traditional (with the above proviso). However, it has some advantages in terms of ease of calculation.

**The practical significance.** In practice of specific calculations the method would be useful, particularly in cases when the form guide is close to some "simple" form.

**Keywords:** conditional boundary, electromagnetic field, eddy current, conductive environment, boundary conditions, harmonic function, boundary value problem, a simple layer potential, generalized functions, singularity, quasistationary approximation.

## Введение

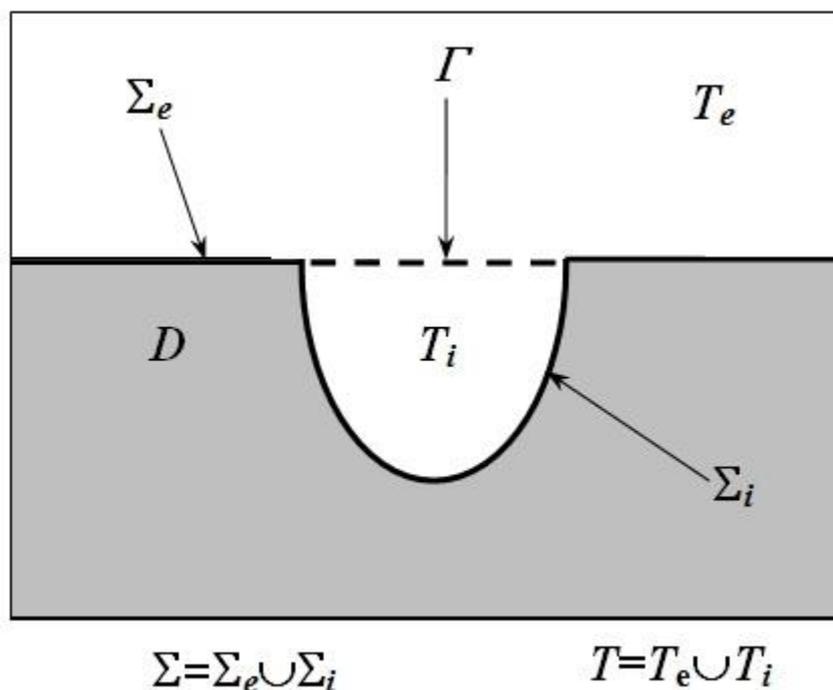
В последнее время резко возрос интерес к разработке и внедрению транспортных систем с использованием MAGLEV-технологий не только применительно к пассажирским, но и грузовым перевозкам [1-6]. В связи с чем является важной задача по совершенствованию методов электродинамических расчетов в подобных системах, включая и аналитические методы.

В данной работе рассматривается задача расчета квазистационарного электромагнитного поля, которое возникает в проводнике и в окружающем пространстве под действием расположенных вне проводника первичных источников – токов, изменяющихся во времени и движущихся в пространстве. Предлагается некоторая трансформация этой задачи, которая,

с одной стороны, сохраняет все существенные результаты, с другой, облегчает расчеты для ряда случаев, представляющих практический интерес.

## 1. Исходная постановка задачи

Пусть  $D$  – область, занятая проводящей средой, вообще говоря, неоднородной (на рисунке, иллюстрирующем условные обозначения, область  $D$  закрашена),  $T$  – свободное пространство,  $\Sigma$  – их граница. Среда считается немагнитной, то есть, всюду  $\mu=1$ ; первичные источники расположены в свободном пространстве  $T$ .



### К выбору обозначений

Выпишем известные соотношения, образующие исходную постановку задачи в ее *квазистационарном* приближении [7-8].

1.1) В области  $D$  выполняются уравнения:

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \mathbf{E}, \quad (1.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (1.2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (1.3)$$

1.2) В области  $T$  выполняются уравнения (1.2) и (1.3), а также:

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}, \quad (1.4)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0. \quad (1.5)$$

1.3) На границе  $\Sigma$  выполняются условия контакта:

$$[\mathbf{B}] = 0, \quad (1.6)$$

$$[E_t] = 0. \quad (1.7)$$

Здесь использованы следующие общепринятые обозначения:

$\sigma$  – удельная проводимость (вообще говоря, зависит от координат);

$\mathbf{B}$  и  $\mathbf{E}$  – векторы магнитной индукции и напряженности электрического поля (зависят от координат и времени);

$\mathbf{j}$  – заданная плотность токов (первичный источник поля, зависит от координат и времени);

В условиях контакта квадратные скобки обозначают скачок на границе, нижние индексы  $t$  и  $n$  – тангенциальные и нормальные компоненты вектора.

Чтобы сообщить задаче единственность, к этим соотношениям нужно добавить те или иные условия на бесконечности. Здесь они явно не выписаны и не конкретизированы, так как в дальнейшем не будут подвергаться изменению, и их конкретный вид роли не играет.

## 2. Введение условной границы

Проведем в свободной области  $T$  мысленную границу  $\Gamma$ , которая отделит от области  $T$  некоторую ее часть  $T_i$ . К этой выделенной области  $T_i$  предъявляется единственное требование: в ней  $\mathbf{j} = 0$ , иначе говоря, в области  $T_i$  нет источников. Тем самым, область  $T$  разбилась на части  $T_i$  и  $T_e$ , граница  $\Sigma$  (проводник-вакуум) – на части  $\Sigma_e$  (между  $T_e$  и  $D$ ) и  $\Sigma_i$  (между  $T_i$  и  $D$ ) – смотри рисунок. Поверхность  $\Gamma$  – и есть та *условная граница*, которая дала название методу.

Будем рассматривать уравнения (1.4)-(1.5), справедливые для всей области  $T$ , как действующие отдельно в областях  $T_i$  и в  $T_e$  (заметим, при этом, что в области  $T_i$  уравнение (1.4) принимает вид  $\text{rot } \mathbf{B} = 0$ ). Чтобы такая постановка была равносильна исходной, достаточно [9] потребовать, чтобы на границе  $\Gamma$  все компоненты векторов  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{E}$  были непрерывны.

Назовем задачу в такой постановке ЗАДАЧЕЙ I и перейдем к формулированию новой ЗАДАЧИ II.

Заменим непрерывность нормальной компоненты  $\mathbf{E}$  на границе  $\Gamma$  условием

$$E_n^i = 0, \quad (2.1)$$

где индекс  $i$  обозначает предельное значение на границе  $\Gamma$  изнутри области  $T_i$ . При этом сохраним непрерывность остальных компонент  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{E}$  на границе  $\Gamma$ . Таким образом, на границе  $\Gamma$  выполнены условия (1.6), (1.7) и (2.1).

Выясним, как изменится вследствие этого решение задачи (то есть, векторы  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{E}$ ). Ответ на этот вопрос дает следующее утверждение.

Пусть  $\mathbf{B}^I, \mathbf{E}^I$  – решение ЗАДАЧИ I,  $\mathbf{B}^{II}, \mathbf{E}^{II}$  – решение ЗАДАЧИ II. Тогда

$$\mathbf{B}^{II} = \mathbf{B}^I, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{E}^{\text{II}} = \mathbf{E}^{\text{I}} \text{ в области } D, \quad (2.3)$$

$$\mathbf{E}^{\text{II}} = \mathbf{E}^{\text{I}} + \mathbf{grad} \varphi_e, \text{ где } \Delta \varphi_e = 0 \text{ в области } T_e, \quad (2.4)$$

$$\mathbf{E}^{\text{II}} = \mathbf{E}^{\text{I}} + \mathbf{grad} \varphi_i, \text{ где } \Delta \varphi_i = 0 \text{ в области } T_i, \quad (2.5)$$

### Доказательство.

1. Пусть  $\mathbf{B}^{\text{I}}, \mathbf{E}^{\text{I}}$  – решение ЗАДАЧИ I. Построим  $\mathbf{B}^{\text{II}}, \mathbf{E}^{\text{II}}$  согласно (2.2)-(2.5), где  $\varphi_i$  и  $\varphi_e$  – гармонические функции [10], в областях  $T_i$  и  $T_e$ , удовлетворяющие на границах этих областей следующим краевым условиям:

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial n} = -E_n^{\text{I}} \text{ на границе } \Gamma, \quad (2.6)$$

$$\varphi_i = 0 \text{ на границе } \Sigma_i, \quad (2.7)$$

$$\varphi_e = \varphi_i \text{ на границе } \Gamma, \quad (2.8)$$

$$\varphi_e = 0 \text{ на границе } \Sigma_e. \quad (2.9)$$

Докажем, что построенные так  $\mathbf{B}^{\text{II}}, \mathbf{E}^{\text{II}}$  суть решение ЗАДАЧИ II.

В силу равенств (2.2), (2.3) для  $\mathbf{B}^{\text{II}}, \mathbf{E}^{\text{II}}$  выполняются все уравнения в области  $D$  и все уравнения и граничные условия, в которых присутствует только  $\mathbf{B}$ .

Поскольку  $\mathbf{E}^{\text{I}}$  и  $\mathbf{E}^{\text{II}}$  отличаются градиентным слагаемым, уравнение (1.2) выполняется в силу того, что ротор градиента равен нулю, а уравнение (1.5) – в силу того, что  $\text{div grad} \varphi_{e,i} = \Delta \varphi_{e,i} = 0$  [11].

Остается проверить выполнение:

– условий (2.1) и (1.7) на границе  $\Gamma$ ,

– условий (1.7) на границах  $\Sigma_i$  и  $\Sigma_e$ .

1) Условия на границе  $\Gamma$

Согласно уравнению (2.5), предельное значение  $E_n^{\text{II}}$ , со стороны области  $T_i$  равно  $E_n^{\text{I}} + \partial \varphi_i / \partial n$ . Но, как видно, из выражения (2.6),  $E_n^{\text{I}} + \partial \varphi_i / \partial n = E_n^{\text{I}} - E_n^{\text{I}} = 0$ . Тем самым условие (2.1) выполнено.

Займемся условиями (1.7). Вычислим скачок  $E_t^{\text{II}}$  (индекс  $t$  обозначает произвольное тангенциальное направление). Согласно равенств (2.4), (2.5),  $[E_t^{\text{II}}] = [E_t^{\text{I}}] + (\partial \varphi_e / \partial t - \partial \varphi_i / \partial t)$ . Первое слагаемое равно нулю, так как для  $\mathbf{E}^{\text{I}}$  имеет место (1.7), второе – в силу условия (2.8). Тем самым  $[E_t^{\text{II}}] = 0$ , то есть, условие (1.7) выполнено и для  $\mathbf{E}^{\text{II}}$ .

2) Условия на границе  $\Sigma_i$

Согласно (2.3), (2.5),  $[E_t^{\text{II}}] = [E_t^{\text{I}}] + \partial \varphi_i / \partial t$ . Первое слагаемое равно 0, так как для  $\mathbf{E}^{\text{I}}$  имеет место условие (1.7), а  $\partial \varphi_i / \partial t = 0$  в силу (2.7). Тем самым, (1.7) выполнено и для  $\mathbf{E}^{\text{II}}$ .

3) Аналогично из (2.4), (2.5), условия (1.7) для  $E^I$  и краевого условия (2.9) выводится (1.7) для  $E^II$  на границе  $\Sigma_e$ .

Итак, для  $E^II$  выполнены все соотношения ЗАДАЧИ II.

2. Пусть  $B^II$ ,  $E^II$  – решение ЗАДАЧИ II, построим решение ЗАДАЧИ I.

Пусть  $\psi$  – потенциал, создаваемый в области  $T$  простым слоем, распределенным на границе  $\Gamma$  с плотностью  $-E_n^{II^e}$  (нормальная компонента с внешней стороны) [12]. Как известно [13],  $\psi$  – гармоническая функция в областях  $T_e$  и  $T_i$ , а на их границе  $\Gamma$

$$[\partial\psi/\partial n] = -E_n^{II^e}. \quad (2.10)$$

Пусть  $u$  – гармоническая функция в области  $T$ , удовлетворяющая на границе  $\Sigma$  граничному условию

$$u = -\psi \quad (2.11)$$

Определим  $E^I$  в областях  $T_e$  и  $T_i$  следующим образом:

$$E^I = E^II + \mathbf{grad} \psi + \mathbf{grad} u. \quad (2.12)$$

Проверим выполнение требований ЗАДАЧИ I.

Как и выше, автоматически выполняются все уравнения в области  $D$ , и все соотношения, не содержащие  $E$ . Далее, уравнения, содержащие  $E$ , также выполняются, так как для этого достаточно, чтобы  $E^I$  и  $E^II$  отличались градиентным слагаемым [11], а это имеет место в силу (2.12). Тем самым, остается проверить, что для  $E^I$  выполняются:

- условия непрерывности всех компонент на границе  $\Gamma$ ,
- условия (1.7) на границах  $\Sigma_i$  и  $\Sigma_e$ .

1) *Условия на границе  $\Gamma$*

Изучим три слагаемых в (2.12) с точки зрения непрерывности тангенциальных компонент на границе  $\Gamma$ . У  $E^II$  они непрерывны, так как  $E^II$  – решение ЗАДАЧИ II, у  $\mathbf{grad} \psi$  – в силу непрерывности потенциала простого слоя [13], у  $\mathbf{grad} u$  – поскольку в окрестности границы  $\Gamma$  функция  $u$  – гармоническая. Тем самым, на границе  $\Gamma$  тангенциальные компоненты  $E^I$  непрерывны.

Займемся нормальными компонентами на границе  $\Gamma$ . Нормальная компонента  $E^II$  имеет скачок  $E_n^{II^e} - E_n^{II^i}$ . Но в силу (2.1),  $E_n^{II^i} = 0$ , значит, скачок равен  $E_n^{II^e}$ . Нормальная компонента  $\mathbf{grad} \psi$  это  $\partial\psi/\partial n$ . Согласно (2.10), ее скачок равен  $-E_n^{II^e}$ . Нормальная компонента  $\mathbf{grad} u$  непрерывна, так как в окрестности границы  $\Gamma$  функция  $u$  – гармоническая. Таким образом, скачок нормальной компоненты  $E^I$  на границе  $\Gamma$  равен  $E_n^{II^e} - E_n^{II^e} + 0 = 0$ .

Итак, на границе  $\Gamma$  все компоненты  $E^I$  непрерывны.

2) Условия на границах  $\Sigma_i$  и  $\Sigma_e$

С внешней стороны  $E_t^I = E_t^{II} + \partial\psi/\partial t + \partial u/\partial t$ . Но  $\partial\psi/\partial t + \partial u/\partial t = 0$  в силу (2.11). Значит,  $E_t^I = E_t^{II}$ . С внутренней стороны это равенство также выполняется (см. (2.3)). Значит,  $[E_t^I] = [E_t^I] = 0$ . Условие (1.7) выполнено.

### 3. «Стирание» $\Sigma_i$ – внутренней части реальной границы

Дальнейшая трансформация задачи является равносильной, то есть, не приводит к изменению ее решения.

Доопределим функцию  $\sigma$  нулем в области  $T_i$ . Тогда уравнения (1.1) для области  $D$  и  $\text{rot } \mathbf{B} = 0$  для области  $T_i$  можно заменить одним уравнением (1.1) для объединенной области  $T_i \cup D$ .

Вычислим дивергенцию от обеих частей (1.1). Поскольку дивергенция ротора равна 0 [11], получим, что  $\text{div}(\sigma \mathbf{E}) = 0$ . Или, что то же самое,  $\sigma \text{div } \mathbf{E} + \mathbf{E} \cdot \text{grad } \sigma = 0$ . Разделив обе части на  $\sigma$ , получим:  $\text{div } \mathbf{E} = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$ , где  $\mathbf{p} = (\text{grad } \sigma / \sigma)$ . Будем считать, что в области  $T_i$  вектор  $\mathbf{p}$  равен 0. Тогда уравнение

$$\text{div } \mathbf{E} = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E} . \quad (3.1)$$

будет справедливо в объединенной области  $T_i \cup D$ , причем в  $T_i$  оно заменит собою (1.5), а в  $D$  будет следствием (1.1).

Итак, в объединенной области  $T_i \cup D$ , выполнена система уравнений: (1.1)-(1.3), (3.1). Докажем, что условия контакта (1.6), (1.7) на границе  $\Sigma_i$  также вытекают из этой системы, если считать, что она имеет силу для всей объединенной области  $T_i \cup D$ , включая границу  $\Sigma_i$ . При этом дифференцирование разрывных функций следует понимать в смысле *обобщенных* функций [14].

Введем в некоторой точке границы  $\Sigma_i$  локальную систему координат, направив ось  $z$  по нормали от  $D$  к  $T_i$  считая при этом, что на границе  $z = 0$ .

Запишем в этих координатах уравнение (1.3)

$$\partial B_z / \partial z + \partial B_x / \partial x + \partial B_y / \partial y = 0 .$$

Все три компоненты  $\mathbf{B}$  имеют, вообще говоря, скачок при  $z = 0$ . Следовательно, производная по  $z$  будет иметь *сингулярное* слагаемое  $[B_z] \delta(z)$ , а продольные производные не будут содержать сингулярности (здесь через  $\delta(z)$  обозначена дельта-функция Дирака) [15]. Таким образом, из (1.3) имеем:  $[B_z] \delta(z) + \dots = 0$ , где многоточием обозначена обычная функция (то есть, не имеющая сингулярностей) [15]. Отсюда следует, что  $[B_z] = 0$ . Тем самым, на границе  $\Sigma_i$  нормальная компонента  $\mathbf{B}$  непрерывна.

Перейдем к уравнению (1.1). Его правая часть не содержит производных, значит, это обычная функция. Выделим *сингулярную*

составляющую левой части. В координатной записи выражения  $\text{rot } \mathbf{B}$  производную по нормали содержат только два слагаемых, а именно:

$$(\partial B_x / \partial z) \mathbf{e}_y - (\partial B_y / \partial z) \mathbf{e}_x.$$

Сингулярная составляющая этого выражения равна  $([B_x] \mathbf{e}_y - [B_y] \mathbf{e}_x) \delta(z)$  [15]. Приравнивая это выражение к 0, получим условие непрерывности тангенциальных компонент  $\mathbf{B}$ . Вместе с полученной ранее непрерывностью нормальной компоненты это дает условие (1.6) на границе  $\Sigma_i$ .

Совершенно аналогичное рассмотрение уравнения (1.2) дает условие (1.7) – непрерывность на границе  $\Sigma_i$  тангенциальных компонент  $\mathbf{E}$ .

#### 4. Унификация условий на внешней части реальной границы ( $\Sigma_e$ ) и условной границе ( $\Gamma$ )

На обеих этих границах выполнены условия непрерывности вектора  $\mathbf{B}$  (1.6) и тангенциальных компонент  $\mathbf{E}$  (1.7), а на границе  $\Gamma$  – еще и условие (2.1). Как известно [7], для границы проводник-вакуум, каковой является граница  $\Sigma_e$ , условие (2.1) является следствием (1.6), (1.7) и уравнений для  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{E}$  по разные стороны границы (в предположении, что на границе внутреннее предельное значение проводимости отлично от нуля). Физически же условие (2.1) выражает тот факт, что вихревые токи не протекают сквозь границу. Таким образом, можно считать, что на всей объединенной границе  $\Sigma_e \cup \Gamma$  выполнены условия (1.6), (1.7) и (2.1). (На рисунке, помещенном в разделе 1 статьи эта граница имеет вид плоскости).

#### 5. Итоговая формулировка

В итоге мы пришли к задаче, включающей следующие уравнения и граничные условия.

5.1) В объединенной области  $T_i \cup D$  (на рисунке она имеет вид нижнего полупространства) выполнена система уравнений:

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \mathbf{E}, \text{ rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \text{ div } \mathbf{B} = 0, \text{ div } \mathbf{E} = -\rho \mathbf{E}. \quad (5.1)$$

5.2) В области  $T_e$  (на том же рисунке – верхнее полупространство) – система уравнений

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}, \text{ rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \text{ div } \mathbf{B} = 0, \text{ div } \mathbf{E} = 0. \quad (5.2)$$

5.3) На границе этих областей  $\Sigma_e \cup \Gamma$  – условия

$$[\mathbf{B}] = 0, [E_t] = 0, E_n^i = 0. \quad (5.3)$$

Здесь:

$\mathbf{j}$  – заданная функция координат и времени (распределение плотности тока в первичном источнике поля),

$\sigma$  – заданная функция координат (удельная проводимость, которая может принимать и нулевые значения),

$\mathbf{p} = (\mathbf{grad} \sigma / \sigma)$ , причем в области, где  $\sigma = 0$ ,  $\mathbf{p}$  принимается равным нулю.

## 6. Физическая интерпретация

Вернемся к исходной задаче и поместим в область  $T_i$  однородную проводящую «вставку» с удельной проводимостью  $\sigma_0 > 0$ . Тогда вся объединенная область  $T_i \cup D$  будет заполнена проводником, и вся ее граница  $\Sigma_e \cup \Gamma$  станет реальной границей раздела проводник-вакуум. Поэтому в области  $T_i \cup D$  будут выполняться уравнения для проводящей среды, причем их можно будет записать в виде (5.1). В области  $T_e$  будут выполнены уравнения для вакуума (5.2), а на границе этих областей  $\Sigma_e \cup \Gamma$  – граничные условия (5.3), в том числе условие  $E_n^i = 0$ .

Устремим теперь  $\sigma_0$  к нулю. В пределе все соотношения примут тот вид, который отвечает случаю  $\sigma_0 = 0$  (то есть, когда проводящей вставки, изначально нет). Исключение составляет поведение нормальной компоненты  $\mathbf{E}$  на границе  $\Gamma$ . Если  $\sigma_0 = 0$ , то граница  $\Gamma$  не является границей раздела, поэтому на ней нормальная компонента  $\mathbf{E}$  непрерывна. Однако при любом сколько угодно малом  $\sigma_0$ , отличном от 0,  $\Gamma$  есть граница раздела проводник-вакуум, поэтому на ней выполняется условие  $E_n^i = 0$ . Очевидно, это условие сохранится и в пределе при  $\sigma_0 \rightarrow 0$ .

Таким образом, задача (5.1)-(5.3), отвечает той ситуации, когда область  $T_i$  заполнена плохим проводником. Наличие проводимости (пусть и слабой) обеспечивает условие  $E_n^i = 0$ , однако вихревые токи, индуцированные в  $T_i$ , не оказывают заметного влияния на результирующие поля.

## Заключение

Новая формулировка задачи позволяет найти верные значения магнитного вектора во всем пространстве и электрического вектора в проводящей среде. Этого достаточно для отыскания всех характеристик системы, представляющих окончательный интерес, таких как силы взаимодействия первичного источника с вихревыми токами, тепловыделения в проводящей среде и т.п.

Польза перехода к новой формулировке связана с возможностью в ряде случаев «исправить» сложную форму проводящей области. Этого удается достичь, когда реальная форма в том или ином смысле близка к некоторой простой. Примерами могут служить проводники простой формы (скажем, плоской), содержащие изъяны, шероховатости, стыки и т.п.

## Библиографический список

1. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев; под ред. В. П. Гапановича. – ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. – ISBN 978-5-9221-1540-7.
2. Зайцев А. А. Транспорт на магнитном подвесе / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова. Под ред. А. А. Зайцева. – СПб: ПГУПС, 2010. – 160 с. – ISBN 978-5-7641-0262-7.
3. Зайцев А. А. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе левитации / А. А. Зайцев, Ю. Ф. Антонов // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии. МТСТ-14: Труды 2-ой Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 17-20 июня 2014 года; под ред. проф. Ю. Ф. Антонова, Киров: МЦНИП, 2014. – С. 11-23. – ISBN 978-5-00090-036-9.
4. Хожайнов А. И. Энергосберегающие преобразователи электроприводов магнитолевитационных транспортных систем / А. И. Хожайнов, В. В. Никитин, Е. Г. Середа // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии. МТСТ'14: Труды 2-ой Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 17-20 июня 2014 года; под ред. проф. Ю. Ф. Антонова, Киров: МЦНИП, 2014. – С. 313-322. – ISBN 978-5-00090-036-9.
5. Никитин В. В. Варианты схем электроснабжения транспортного средства с комбинированной системой левитации и тяги на переменном токе / В. В. Никитин, В. М. Стрепетов, А. С. Волювач // Известия высших учебных заведений «Проблемы энергетики», 2010. – №3-4. – С.54-62.
6. Антонов Ю. Ф. Технология HSST в проектах LINIMO и ROTEM / Ю. Ф. Антонов, В. В. Никитин, А. И. Хожайнов // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии. МТСТ-13: Труды 1-ой Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 29-31 октября 2013 года. ; под ред. проф. Ю. Ф. Антонова, СПб: ООО PUDRA, 2013. – С. 133-137. – ISBN 978-5-85263-125-1.
7. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. 2-е изд., испр. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М.: изд-во Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 621 с. (т. VIII).
8. Voevodskii K. E. and Kochetkov V. M. Theory of superconducting magnet suspension: main results, survey // Cryogenics, 1981. – №12. – pp. 719-728.
9. Тамм И. Е. Основы теории электричества. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.
10. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский – М.: изд-во Наука, 1977. – 735 с.
11. Анчиков А. М. Основы векторного и тензорного анализа. – М.: изд-во Наука, 1988. – 140 с.

12. Гюнтер Н. М. Теория потенциала и ее применение к основным задачам математической физики. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 416 с.

13. Бабич В. М. Линейные уравнения математической физики / В. М. Бабич, М. Б. Капилевич, С. Г. Михлин, Г. И. Натансон, П. М. Риз, Л. Н. Слободецкий, М. М. Смирнов. Под ред. С. Г. Михлина; под общей ред. Л. А. Люстерника и А. Р. Янпольского. – М.: изд-во Наука, 1964. – 368 с.

14. Шилов Г. Е. Математический анализ. Второй специальный курс. – М.: изд-во Наука, 1965. – 328 с.

15. Гельфанд И. М., Шилов Г. Е. Обобщенные функции и действия над ними / И. М. Гельфанд, Г. Е. Шилов. – М.: Физматгиз, 1959. – 470 с.

## References

1. Antonov Y. F. & Zaitsev A. A. Magnitolevitacionnaia transportnaia tehnologiia [Magnetic Levitation Transport Technology]. Moscow, 2014. – 476 p.

2. Zaitcev A. A., Talashkin G. N. and Sokolova Ya. V. Transport na magnitnom podvese [Transport on Magnetic Suspension]. St. Petersburg, 2010. 160 p.

3. Zaitcev A. A. Konteinernyi most Sankt-Petersburg – Moskva na osnove levitacii [Container bridge St. Petersburg – Moscow on the basis levitation] *Magnitolevitacionnye transportnye systemy i tekhnologii: trudy II mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Proc. 2nd Int. Conf. "Magnetic Levitation Transport Systems and Technologies"). St. Petersburg, 2014, pp. 11–23.

4. Khozhainov A. I., Nikitin V. V. & Sereda E. G. Energoberegaiushchie preobrazovateli ekektroprivodov magnitolevitacionnykh transportnykh sistem. [Energy-efficient converters electric drives of maglev transport system] *Magnitolevitacionnye transportnye systemy i tekhnologii: trudy II mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Proc. 2nd Int. Scientific Conf. "Magnetic Levitation Transport Systems and Technologies"). St. Petersburg, 2014, pp. 313–322.

5. Nikitin V. V., Strepetov V. M. & Voliuvach A. S. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii Problemy energetiki – High School News "Problems of Energy"*, 2010. No 3–4, pp. 54–62.

6. Antonov IU. F., Nikitin V. V. & Khozhainov A. I. Tekhnologiia HSST v proektakh LINIMO i ROTEM [Technology HSST in projects LINIMO und ROTEM] *Magnitolevitacionnye transportnye systemy i tekhnologii: trudy I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Proc. 1st Int. Scientific Conf. "Magnetic Levitation Transport Systems and Technologies"). St. Petersburg, 2013. pp. 133–137.

7. Landau L. D. Teoreticheskaya fizika. Elektrodinamika sploshnykh sred [Theoretical Physics. Electrodynamics of Continuous Media]. Moscow, 1982. 621 p.

8. Voevodskii K. E. & Kochetkov V. M. *Cryogenics*, 1981, no 12, pp. 719–728.

9. Tamm I. E. *Osnovy teorii elektrichestva* [Basics of the Theory of Electricity]. Moscow, 2003. 616 p.

10. Tihonov A. N. & Samarski A. A. *Uravneniya matematicheskoi fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Moscow, 1977. 735 p.

11. Anchikov A. M. *Osnovy vektornogo i tenzornogo analiza* [Basics of Vector and Tensor Analysis] Moscow, 1988. 140 p.

12. Giunter N. M. *Teoriya potentsiala i ee primenenie k osnovnym zadacham matematicheskoi fiziki* [Potential Theory and its Application to the Basic Problems of Mathematical Physics]. Moscow, 1953. 416 p.

13. Babich V. M., Kapilevich M. B., Mihlin S. G., Natanson G. I., Riz P. M, Slobodeckii L. N. & Smirnov M. M. *Lineinye uravneniya matematicheskoi fiziki* [Linear Equations of Mathematical Physics]. Moscow, 1964. 368 p.

14. Shilov G. E. *Matematicheskii analiz* [Mathematical Analysis]. Moscow, 1965. 328 p.

15. Gel'fand I. M. & Shilov G. E. *Obobshennye funktsii i deistviya nad nimi* [Generalized Functions and Operations with Them]. Moscow, 1959. 470 p.

**Сведения об авторах:**

ВОЕВОДСКИЙ Константин Эммануилович, кандидат технических наук, доцент кафедры Высшей геометрии Санкт-Петербургского государственного университета  
E-mail: kv5832@mail.ru

СТРЕПЕТОВ Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры "Электромеханические комплексы и системы" Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
E-mail: strepetov.vm@mail.ru

**Information about authors:**

Konstantin E. VOEVODSKII, Ph.D., assistant professor of department High geometry, at St. Petersburg State University  
E-mail: kv5832@mail.ru

Vladimir M. STREPETOV, Ph.D., assistant professor of department "Electromechanical complexes and systems" Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
E-mail: strepetov.vm@mail.ru

## Раздел 3. БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 656

**В. В. Шматченко, П. А. Плеханов**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

### УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫМ ДВИЖЕНИЕМ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОГО РАДИОКАНАЛА

Дата поступления: 29.08.2016

Решение о публикации: 30.08.2016

Дата публикации: 30.09.2016

**Аннотация: Введение.** Система управления транспортными средствами на магнитном подвесе (далее – СУТС МП) имеет ключевое значение для развития магнитолевитационного транспорта.

**Цель.** В статье рассмотрены вопросы управления безопасным движением магнитолевитационного транспорта с использованием цифрового радиоканала, проанализирован международный опыт и сделаны выводы применительно к российской практике.

**Методология.** Использовались следующие методы: системный подход, анализ и синтез, обобщение.

**Результаты.** СУТС МП должна учитывать физические возможности магнитной левитации, факторы и ограничения, влияющие на эти возможности, в том числе – факторы, связанные с безопасностью. СУТС МП должна обладать комплексом функций, позволяющих эффективно, полно и безопасно реализовать возможности магнитной левитации в условиях действия указанных факторов и ограничений.

**Практическая значимость.** Основными практическими результатами, которые могут быть получены при разработке СУТС МП, являются:

- создание СУТС МП с высоким уровнем автоматизации управления и потому эффективной и безопасной;
- разработка в рамках СУТС МП типовых проектных решений, применимых для адаптации к задачам мониторинга и управления различными системами и средствами транспорта на магнитном подвесе;
- создание предпосылок разработки и совершенствования всего комплекса нормативных документов, соответствие которым обеспечивает безопасность инфраструктуры и подвижного состава транспорта на магнитном подвесе;
- получение опыта взаимодействия Заказчика, исследовательских и проектных организаций, предприятий промышленности, монтажных и эксплуатирующих организаций на этапах жизненного цикла СУТС МП, как ключевой подсистемы транспорта на магнитном подвесе.

**Заключение.** Главное назначение СУТС МП – создание и постоянное обеспечение условий, в которых реализуется безопасное и эффективное функционирование и развитие этого нового вида транспорта.

**Ключевые слова:** магнитолевитационный транспорт, цифровой радиоканал, безопасность, анализ риска.

**Vladimir V. Shmatchenko, Pavel A. Plekhanov**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

## DIGITAL RADIO BASED TRAIN CONTROL FOR SAFETY ASSURANCE OF MAGLEV TRANSPORTATION

**Abstract: Introduction.** The Control System of Maglev Vehicles (further – CSMV) has key value for development maglev.

**Purpose.** In article management by safe movement of maglev vehicles with use of digital radio channel are considered, the international experience is analysed and conclusions for Russian practice are drawn.

**Methodology.** The following methods were used: system approach, analysis and synthesis, generalization.

**Results.** CSMV should consider physical possibilities of magnetic levitation, factors and the restrictions influencing these possibilities, including – the factors connected with safety. CSMV should possess complex of functions allowing effectively, full and safely to realise possibility of magnetic levitation in conditions of specified factors and restrictions.

**Practical importance.** The basic practical results, which can be received by working out CSMV, are:

- creation CSMV with high level of control automation and consequently effective and safe;
- working out within CSMV typical design decisions, applicable for adaptation to monitoring and control of problems various systems and maglev vehicles;
- creation of preconditions of design and perfection of all complex of regulatory framework, conformity which provides safety of maglev infrastructure and vehicles;
- reception of interaction experience of the Customer, the research and design organisations, the industry enterprises, the assembly and maintaining organisations at stages of life cycle of CSMV, as key subsystem of maglev.

**Conclusion.** The main appointment of CSMV – creation and constant provide of conditions for safe and effective functioning and development of this new type of transport.

**Key words:** maglev, digital radio channel, safety, risk analysis.

### Введение

Система управления транспортными средствами на магнитном подвесе (далее – СУТС МП) имеет ключевое значение для развития магнитолевитационного транспорта. Главное ее назначение – создание и постоянное обеспечение условий, в которых реализуется безопасное и эффективное функционирование и развитие этого нового вида транспорта. Система управления должна учитывать физические возможности магнитной левитации, факторы и ограничения, влияющие на эти возможности, в том числе – факторы, связанные с безопасностью. Система должна обладать комплексом функций, позволяющих эффективно, полно и

безопасно реализовать возможности магнитной левитации в условиях действия указанных факторов и ограничений.

## **1. Необходимость создания системы управления транспортными средствами на магнитном подвесе**

Основными практическими результатами, которые могут быть получены при разработке СУТС МП, являются:

- создание СУТС МП с высоким уровнем автоматизации управления и потому эффективной и безопасной;
- разработка в рамках СУТС МП типовых проектных решений, применимых для адаптации к задачам мониторинга и управления различными системами и средствами транспорта на магнитном подвесе;
- создание предпосылок разработки и совершенствования всего комплекса нормативных документов, соответствие которым обеспечивает безопасность инфраструктуры и подвижного состава транспорта на магнитном подвесе;
- получение опыта взаимодействия Заказчика, исследовательских и проектных организаций, предприятий промышленности, монтажных и эксплуатирующих организаций на этапах жизненного цикла СУТС МП, как ключевой подсистемы транспорта на магнитном подвесе.

Однако, получение этих результатов возможно только при правильной организации процесса создания СУТС МП, что означает, как минимум, применение при разработке этой системы современных международных стандартов безопасности в области колеечного транспорта и имеющегося отечественного опыта.

В этой связи далее будут рассмотрены цели создания СУТС МП, задачи, решением которых достигаются цели, и действующие стандарты, позволяющие формализовать требования и методы выполнения задач и уже имеющие опыт соответствующего применения.

## **2. Цели и задачи создания СУТС МП**

Основные цели создания СУТС МП могут быть сформулированы следующим образом.

1. Создать систему управления движением транспортных средств на магнитном подвесе, имеющую высокую степень автоматизации функций мониторинга, управления и обеспечения безопасности в реальном масштабе времени.
2. Сформировать кооперацию работ исследовательских и проектных организаций, предприятий промышленности, монтажных и эксплуатирующих организаций, способных обеспечивать поддержку и развитие СУБД в различных условиях применения.

Для достижения этих целей необходимо решить следующие задачи:

1. Определение требований по назначению СУТС МП и условий ее применения.

Полнота требований к создаваемой системе рассматривается в проекте prEN 50126-1:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [1]) в разрезе общих требований к СУТС МП, требований по безопасности, требований по надежности, готовности ремонтпригодности.

Например, к общим требованиям относятся:

- определение области применения и назначения СУТС МП;
- определение концепции СУТС МП;
- анализ финансовой и технической осуществимости СУТС МП, анализ осуществимости включает также оценку необходимой системы материально-технического обеспечения, для чего целесообразно использовать стандарт 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);
- создание структуры управления проектом СУТС МП.

К требованиям по надежности, готовности и ремонтпригодности относятся:

- определение показателей надежности, готовности и ремонтпригодности;
- анализ ранее достигнутых показателей для подобных проектов;
- анализ значимости показателей для проекта СУТС МП.

Требования по анализу безопасности включают:

- анализ ранее достигнутых показателей обеспечения безопасности;
- определение значимости показателей обеспечения безопасности для СУТС МП;
- разработка целей и политики в области безопасности (на основе требований проекта prEN 50126-1:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [1])).

2. Идентификация угроз, связанных с применением СУТС МП в соответствии с назначением, и проведение анализа риска, обусловленного действием этих угроз.

Идентификация угроз и оценка связанного с ними риска осуществляется в соответствии с требованиями, приведенными в проектах prEN 50126-1:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [1]) и prEN 50126-2:2012 (действующая редакция – технический отчет PD CLC/TR 50126-2 [2]). Результаты анализа риска являются основанием для выбора тех или иных дополнительных функций защиты транспортной системы.

3. Определение функциональных требований к СУТС МП, включая требования по защите от угроз, и требования к системным и

внутрисистемным интерфейсам, включая интерфейсы между инфраструктурными и мобильными подсистемами СУТС МП и интерфейсы с человеком-оператором.

Определение функциональных требований к СУТС МП осуществляется в соответствии с проектами prEN 50126-1:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [1]), prEN 50126-2:2012 (действующая редакция – технический отчет PD CLC/TR 50126-2 [2]), prEN 50126-4:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62425 [3]) и prEN 50126-5 (действующая редакция – стандарт IEC 62279 [4]). При этом учитывается специфика безопасности аппаратных средств, в которых сначала появляются случайные отказы (события), после чего наступает неисправность (состояние), и программных средств, когда сначала появляются ошибки человека (состояния), которые могут привести к отказу (событию).

Требования к составу функций цифрового радиоканала, необходимых для реализации систем управления подвижными объектами [5, 6], содержатся в серии стандартов IEEE 1474 [7-9], требования по безопасности радиоканала приведены в стандарте IEC 62280 [10] (на основе документа EN 50159 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)).

4. Разработка архитектуры СУТС МП, включая подсистемы технического обслуживания и материально-технического обеспечения на линейном и региональном уровне.

Разработка архитектуры функций СУТС МП является частью уникальной работы по созданию функциональной модели магнитолевитационного транспорта, еще не выполнявшейся в России. Эта модель должна применяться для декомпозиции требований к системе в целом на требования к ее подсистемам и компонентам, в том числе – на требования к подсистеме СУТС МП и ее составным частям. Общие требования по формированию функциональной модели и ее применению приводятся в проектах prEN 50126-1:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [1]), prEN 50126-2:2012 (действующая редакция – технический отчет PD CLC/TR 50126-2 [2]).

5. Разработка технических требований к СУТС МП, ее мобильным и инфраструктурным программным и аппаратным подсистемам и компонентам, включая требования по надежности, готовности, ремонтпригодности, безопасности и по материально-техническому обеспечению.

Определение технических требований к СУТС МП осуществляется в соответствии с проектами prEN 50126-1:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [1]), prEN 50126-2:2012 (действующая редакция –

технический отчет PD CLC/TR 50126-2 [2]), prEN 50126-4:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62425 [3]) и prEN 50126-5 (действующая редакция – стандарт IEC 62279 [4]). Целесообразно также использовать следующие документы:

– 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);

– 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);

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

– 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);

– 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);

– 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);

– 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).

Технические требования к цифровому радиоканалу целесообразно определить на основе проекта EIRENE [11, 12], содержащего функциональные и технические требования железных дорог Европы к цифровой радиосвязи.

6. Разработка требований по проверке выполнения функциональных и технических требований к СУТС МП, ее программно-аппаратных подсистем и компонентов, включая программу и методику лабораторных натурных испытаний макетов СУТС МП, требования к полигону испытаний и полигону внедрения.

Здесь имеются в виду требования по анализу результатов каждой задачи, ее верификации и валидации, а также требования по будущим валидации и испытаниям системы СУТС МП. Эти требования разрабатываются в соответствии с проектами prEN 50126-1:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [1]), prEN 50126-2:2012 (действующая редакция – технический отчет PD CLC/TR 50126-2 [2]), prEN 50126-4:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62425 [3]) и prEN 50126-5 (действующая редакция – стандарт IEC 62279 [4]). Целесообразно использовать также стандарт 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).

7. Выполнение разработки программно-аппаратных подсистем и компонентов СУТС МП с изготовлением макетов и подготовкой рабочей конструкторской документации.

Требования по выполнению этой задачи содержатся в проектах prEN 50126-1:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [1]), prEN 50126-2:2012 (действующая редакция – технический отчет PD CLC/TR 50126-2 [2]), prEN 50126-4:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62425 [3]) и prEN 50126-5 (действующая редакция – стандарт IEC 62279 [4]).

8. Проведение комплексной стыковки (интеграции) макетов программно-аппаратных подсистем и компонентов СУТС МП в лабораторных условиях. Проведение испытаний макетов СУТС МП в лабораторных условиях.

Общие требования по интеграции составных частей СУТС МП и методы интеграции приведены в проекте prEN 50126-1:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [1]), дополнительные требования и методы, учитывающие специфику интеграции программно-аппаратных комплексов, содержатся в проекте prEN 50126-4:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62425 [3]).

9. Выполнение доработки макетов СУТС МП, актуализация программы и методики испытаний и рабочей конструкторской документации по результатам лабораторных испытаний. Определение опытного полигона и организация натурных испытаний СУТС МП.

10. Проведение натурных испытаний макетов СУТС МП в условиях выбранного опытного полигона. Определение полигона и организации внедрения СУТС МП.

11. Выполнение доработки макетов СУТС МП, актуализация программы и методики испытаний и рабочей конструкторской документации по результатам натурных испытаний. Подготовка рабочей конструкторской документации и ее передача промышленности для выпуска образцов СУТС МП для опытной эксплуатации.

Выполнение задач 9, 10 и 11 также осуществляется в соответствии с проектами prEN 50126-1:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [1]), prEN 50126-2:2012 (действующая редакция – технический отчет PD CLC/TR 50126-2 [2]), prEN 50126-4:2012 (действующая редакция – стандарт IEC 62425 [3]) и prEN 50126-5 (действующая редакция – стандарт IEC 62279 [4]).

При выполнении всех задач целесообразно учитывать требования проекта prEN 50126-3 по менеджменту безопасности и требования международного стандарта ISO 9001 [13] по менеджменту качества.

### **3. Задачи формирования кооперации работ**

Формирование кооперации работ по созданию СУТС МП осуществляется решением следующих задач:

1. Разработка модели процессов эксплуатации, управления и обеспечения СУТС МП на линейном, региональном и центральном уровне (в том числе – процессов обеспечения безопасности).

2. Определение показателей выполнения процессов.

3. Определение полномочий, ответственности и подотчетности владельцев и исполнителей процессов.

4. Определение организационной структуры процессов эксплуатации, управления и обеспечения СУТС МП на линейном, региональном и центральном уровне.

5. Разработка предложений по кадровому, ресурсному и документальному обеспечению процессов СУТС МП.

Для разработки этих задач целесообразно использовать требования стандарта IRIS [14, 15], главное достоинство которого в данном случае определяется его способностью обеспечить централизованное управление качеством и безопасностью в условиях рыночной экономики.

### **Заключение**

Приведенные выше цели и задачи являются, по существу, частью технического комплексного технического задания на создание СУТС МП. Для завершения подготовки технического задания необходимо увязать выполнение каждой задачи по созданию СУТС МП с согласованными требованиями указанных выше нормативных документов и предусмотреть их выполнение в соответствии с требованиями Международного стандарта железнодорожной промышленности IRIS.

## Библиографический список

1. IEC 62278 (2002) Railway applications. Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS).
2. PD CLC/TR 50126-2:2007 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.
3. IEC 62425 (2007) Railway applications - Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signaling.
4. IEC 62279 (2002) Railway applications - Communications, signalling and processing systems - Software for railway control and protection systems.
5. Шматченко В. В. Методология измерений в цифровых системах технологической радиосвязи / В. В. Шматченко, П. А. Плеханов, П. Н. Ерлыков // Бюллетень результатов научных исследований, 2014. – № 3 (12). – С. 31-39.
6. Роенков Д. Н. Основные требования к организации радиосвязи на высокоскоростной магистрали / Д. Н. Роенков, В. В. Шматченко, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов // Транспорт Российской Федерации, 2015. – № 2 (57). – С. 49-52.
7. IEEE 1474.1 Communications-Based Train Control (CBTC) performance and functional requirements.
8. IEEE 1474.2 User interface requirements in Communications-Based Train Control (CBTC) systems.
9. IEEE 1474.3 Recommended practice for Communications-Based Train Control (CBTC) – System design and functional allocations.
10. IEC 62280 (2014) Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Safety related communication in transmission systems.
11. European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE). Functional Requirements Specification (FRS). Version 7.4.0 (27 April 2014).
12. European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE). System Requirements Specification (SRS). Version 15.4.0 (31 March 2014).
13. ISO 9001:2015 Quality management systems - Requirements.
14. IRIS Revision 02.1 (2012) International Railway Industry Standard.
15. IRIS Audit Tool V4.2.0.00.

## References

1. IEC 62278 (2002) Railway applications. Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS).
2. PD CLC/TR 50126-2:2007 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.

3. IEC 62425 (2007) Railway applications - Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signaling.
4. IEC 62279 (2002) Railway applications - Communications, signalling and processing systems - Software for railway control and protection systems.
5. Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A. & Erlikov P. N. *Bulleten rezultatov nauchnyh issledovaniy - Bulletin of scientific research results*, 2014, no. 3 (12), pp. 31–39.
6. Roenkov D. N., Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A. & Ivanov V. G. *Transport Rossiiskoy Federatsii – Transport of Russian Federation*, 2015, no. 2 (57), pp. 49–52.
7. IEEE 1474.1 Communications-Based Train Control (CBTC) performance and functional requirements.
8. IEEE 1474.2 User interface requirements in Communications-Based Train Control (CBTC) systems.
9. IEEE 1474.3 Recommended practice for Communications-Based Train Control (CBTC) – System design and functional allocations.
10. IEC 62280 (2014) Railway applications - Communication, signalling and processing systems – Safety related communication in transmission systems.
11. European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE). Functional Requirements Specification (FRS). Version 7.4.0 (27 April 2014).
12. European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE). System Requirements Specification (SRS). Version 15.4.0 (31 March 2014).
13. ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements.
14. IRIS Revision 02.1 (2012) International Railway Industry Standard.
15. IRIS Audit Tool V4.2.0.00.

**Сведения об авторах:**

ШМАТЧЕНКО Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

E-mail: railwayradio@gmail.com

ПЛЕХАНОВ Павел Андреевич, кандидат технических наук, доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

E-mail: pavelplekhanov@gmail.com

**Information about authors:**

Vladimir V. SHMATCHENKO, candidate of technical sciences (PhD in engineering), assistant professor of Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

E-mail: railwayradio@gmail.com

Pavel A. PLEKHANOV, candidate of technical sciences (PhD in engineering), assistant professor of Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

E-mail: pavelplekhanov@gmail.com