

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**  
**TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY**
**Выпуск 3 (9), 2017**  
**Issue 3 (9), 2017**

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. Ditrjhs

**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

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

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

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

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

1. Тема и содержание представляемой для публикации статья и должны соответствовать профилю журнала, обладать научной новизной и представлять интерес для специалистов.
2. Статьи, ранее опубликованные или переданные в другие издания, в журнал не принимаются.
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).
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.

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 – 1,25 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, выставьте 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. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

<b>Поляков В. А., Хачапуридзе Н. М.</b>	Модель левитационной силы магнитолевитирующего поезда	5
<b>Никитин В. В., Стрепетов В. М.</b>	Энергообеспечение бортовых электромагнитов комбинированной системы левитации и тяги на переменном токе	25
<b>Костенко В. В., Белых Н. С., Четчуев М. В., Шепель А. С., Федоров В. П.</b>	Разработка модели грузового магнитолевитационного терминала	39
<b>Сундуков Е. Ю., Кочергин С. М., Селиванов Л. Ф.</b>	Арочная эстакада с магнитным и электромагнитным подвешиванием малогабаритных транспортных модулей	54
<b>Емельянов И. Г., Кузнецов А. В.</b>	Определение напряженного состояния тонкостенных конструкций с использованием методов теории оболочек	64
<b>Коган Я. Д., Богданова Н. В.</b>	Материалы и технологии формирования механических соединений методом холодной пластической деформации	79
 <u>Раздел 2. БЕЗОПАСНОСТЬ</u>		
<b>Аполлонский С. М.</b>	Обеспечение электромагнитной безопасности на высокоскоростном маглев транспорте	90
<b>Власов Т. Д., Рубинский А. В.</b>	Эксплуатация транспортной системы «Российский Маглев» и медико- биологические Аспекты безопасности	111
<b>Антоновская Г. Н., Афонин Н. Ю., Басакина И. М., Капустян Н. К., Басакин Б. Г., Данилов А. В.</b>	Возможности сейсмических методов для оценки состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера	133
 <u>Раздел 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</u>		
<b>Ю. В. Егоров, Л. Ф. Казанская, Н. В. Сакс</b>	Влияние процесса формирования рынка оперирования грузовыми вагонами на показатели операционной эффективности железнодорожного транспорт	162

## Content

### Section 1: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENT

<b>Polyakov V. A., Hachapuridze N. M.</b>	Model of a magnetically levitated train's levitation force	5
<b>Nikitin V. V., Strepetov V. M.</b>	Vehicle Electromagnets Energy Supply of A.C. Combined Levitation and Traction System	25
<b>Kostenko V. V., Belykh N. S., Chetchuev M. V., Shepel A. S., Fedorov V. P.</b>	Development of model freight magnetic levitation terminal	39
<b>Sundukov E. Yu., Kochergin S. M., Selivanov L. F.</b>	Application of maglev technologies in the european northeast and the cisural north of russia	54
<b>Emel'yanov I. G., Kuznetsov A. V.</b>	Determination of the stressed state of thin-construction structures using the methods of the theory of shells	64
<b>Kogan J. D., Bogdanova N. V.</b>	Materials and technology for fabricating mechanical connectors by cold plastic deformation	79
<u>Section 2. SAFETY</u>		
<b>Apollonskiy S. M.</b>	Ensuring electromagnetic safety at high-speed maglev transport	90
<b>Vlasov T. D., Rubinskiy A. V.</b>	Operation of "russian maglev" transport system and medical-biological safety aspects	111
<b>Antonovskaya G. N., Afonin N. Y., Basakina I. M., Kapustian N. K., Basakin B. G., Danilov A. V.</b>	Possibilities of seismic methods for the estimation of a railway roadbed state under the conditions of the far north	133
<u>Section 3. ECONOMIC TRANSPORT</u>		
<b>Egorov Y. V., Kazanskaya L. F., Saks N. V.</b>	Influence of development of market of freight cars operation upon operation efficiency indexes of railway transport	162

УДК 629.439

**В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе**  
Институт транспортных систем и технологий  
Национальной академии наук Украины  
(Днепр, Украина)

## **МОДЕЛЬ ЛЕВИТАЦИОННОЙ СИЛЫ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА**

Дата поступления 22.07.2017

Решение о публикации 26.10.2017

### ***Аннотация:***

**Цель.** Реализация левитационной сил (ЛС) магнитолевитирующего поезда (МЛП) происходит в процессе взаимодействия магнитных полей токов сверхпроводящих поездных (СПК) и короткозамкнутых путевых контуров (КПК), являющихся элементами левитационного узла (ЛУ). Исходя из этого, целью настоящего исследования является получение корректного описания такого взаимодействия. На современном этапе, основным и наиболее универсальным инструментом анализа и синтеза процессов и систем является их математическое и, в частности, компьютерное моделирование.

**Методика.** В то же время, радикальные преимущества этого инструмента делают ещё более важной прецизионность выбора конкретной методики проведения исследования. Особую актуальность это имеет по отношению к столь большим и сложным системам, какими являются МЛП. По этой причине, в работе особое внимание уделено аргументированному обоснованию выбора селективных особенностей исследовательской парадигмы.

**Результаты.** Результаты анализа существующих версий модели процесса реализации ЛС свидетельствуют о том, что каждая из них, наряду с преимуществами, обладает и существенными недостатками. В связи с этим, одним из основных результатов исследования должно явиться построение математической модели указанного процесса, сохраняющей преимущества упомянутых версий, но свободной от их недостатков. В работе аргументировано обоснована рациональность применения, для целей исследования ЛС поезда, интегративной холистической парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля.

**Научна новизна.** Приоритетность создания такой парадигмы, а также соответствующей версии модели реализации ЛС составляют научную новизну исследования.

**Практическая значимость.** Основным проявлением практической значимости работы является возможность, в случае использования её результатов, существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном снижении их ресурсоёмкости.

**Ключевые слова:** магнитолевитирующий поезд; математическая модель левитации; интегративная исследовательская парадигма.

## Введение

Токи и поля контуров ЛУ МЛП – компоненты единого электромагнитного субпроцесса гиперпроцесса электромеханического преобразования энергии. Моделирование этих компонентов вполне возможно [1] в рамках парадигм теорий электрических цепей и электромагнитного поля. Поэтому существующие версии математической модели ЛС МЛП построены [1 – 3] исходя из упомянутых парадигм. Анализ свойств упомянутых версий модели свидетельствует о том, что каждая из них обладает как преимуществами, так и недостатками. Их общая положительная черта – достаточная функциональность. Основной же имманентный недостаток таких версий – нестационарность дифференциальных уравнений, вызванная циклической переменностью их коэффициентов, соответствующих собственным и взаимным индуктивностям КПК ЛУ как между собой, так и со СПК, в зависимости от положения поезда. Это существенно затрудняет решение задач описываемой динамики [4], радикально снижая практическую ценность версий модели.

## Задача исследования

Изложенное выявляет [5 – 7] актуальность создания математической модели ЛС МЛП, ассимилирующей достоинства имеющихся версий такой модели, но свободной от их недостатков. Синтез такой модели является основной задачей настоящей работы.

## Методика исследования

Электромеханическое энергопреобразование ЛУ МЛП осуществляется в процессе взаимодействия полей токов СПК и КПК. Поэтому паттерном ЛС поезда является взаимодействие тока элемента СПК с полем токов КПК. Такое взаимодействие может быть описано выражением закона Ампера [8]:

$$f_{\beta\gamma} = l_{\beta\gamma} \cdot i^{\beta\gamma} \cdot B_{\beta\gamma} \cdot \sin \alpha_{\beta\gamma}, \quad (1)$$

где  $f_{\beta\gamma}$  – сила, действующая на  $\gamma$ -тый элемент  $\beta$ -го СПК;

$l_{\beta\gamma}, i^{\beta\gamma}, B_{\beta\gamma}, \alpha_{\beta\gamma}$  – длина элемента, ток в нём, индукция поля, в котором элемент находится, а также угол между  $\overline{i^{\beta\gamma}}$  и  $\overline{B_{\beta\gamma}}$ .

Расчётные схемы СПК и секций КПК приняты, соответственно, в виде наборов гальванически не связанных проводящих прямоугольных рамок, а также пар идентичных прямоугольных катушек, соединённых согласно нуль-поточной схеме [1]. Тогда ЛС поезда определима как векторная сумма величин

$\overline{f_{\lambda\chi}} \forall \lambda \in [1, N], \chi \in [1, 4]$ , каждая из которых, – это результат взаимодействия тока одного из элементов СПК с полем токов взаимодействующих с ним КПК. В последнем выражении,  $N$  – число упомянутых СПК. Динамика электромагнитного компонента такого взаимодействия определяется уравнениями второго закона Кирхгофа [8]. Подсистема “СПК – КПК”, как правило, вырождена [6] – ёмкостные показатели её элементов пренебрежимо низки. Потому, в инерциальной системе отсчёта  $Q\varepsilon^\rho \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$ , модель электромагнитного компонента взаимодействия  $\beta$ -го СПК с учитываемыми (в этом взаимодействии) КПК имеет вид [8, 9]:

$$\sigma_{\rho\beta} = L_{\rho\rho} \cdot \frac{d}{dt} i^\rho + L_{\rho\mu} \cdot \frac{d}{dt} i^\mu + r_\rho \cdot i^\rho \quad \forall \rho, \mu \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]; \quad (2)$$

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l; \quad \sigma_{\rho\beta}^\kappa = -\frac{d}{dt} (M_{\rho\beta}^\kappa \cdot i_s^\beta)$$

$$\forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \kappa = u \vee \kappa = l, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\rho\beta}^\kappa \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \kappa = u \vee \kappa = l$  – электродвижущие силы (э. д. с.) в катушках  $\rho$ -го КПК при изменениях сцеплений с их подконттурами потока тока  $i_s^\beta$  цепи  $\beta$ -го СПК;

$L_{\rho\rho}, L_{\rho\mu}, r_\rho \forall \rho, \mu \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$  – собственные и взаимные индуктивности, а также активные сопротивления КПК;

$\chi_\beta$  – номер (от начала участка трассы, вдоль которого происходит движение МЛП) последнего КПК, поперечную осевую линию которого миновала поперечная осевая линия  $\beta$ -го СПК;

$E$  – половина числа КПК, с которыми учитывается электромагнитное взаимодействие каждого СПК;

$i^\rho, i^\mu \forall \rho, \mu \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$  – токи КПК;

$M_{\rho\beta}^\kappa \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \kappa = u \vee \kappa = l$  – взаимные индуктивности между  $\beta$ -ым СПК и катушками взаимодействующих с ним КПК;

$t$  – текущее время.

Благодаря принятым конструкционным мерам [1], значения токов  $i_s^\lambda \forall \lambda \in [1, K]$ , изменяются достаточно медленно и, на интервалах, соизмеримых со временем наблюдения движения поезда, могут считаться равными между собой и постоянными

$$i_s^\lambda = i_s = const \quad \forall \lambda \in [1, K], \quad (4)$$

где  $K$  – число СПК, установленных на МЛП. Значение же  $E$  нужно выбирать так, чтобы по обеим сторонам от каждого  $\beta$ -го СПК в КПК, предшествующих, а также следующих за учитываемыми, величины  $\sigma_{\rho\beta}^\kappa \forall \rho <$



$\chi_\beta - E \vee \rho > \chi_\beta + E, \kappa = u \vee, \kappa = l$  даже в неравновесном состоянии ЛУ, были бы пренебрежимо малы.

СПК и КПК взаимоподвижны. Поэтому  $L_{\rho\rho}, L_{\rho\mu}, M_{\rho\lambda}^\kappa$   $\forall \rho, \mu \in [(\chi_\lambda - E), (\chi_\lambda + E)], \lambda \in [1, K], \kappa = u \vee \kappa = l$  имеют циклически изменяющиеся во времени значения. Это, в свою очередь, приводит к нестационарности коэффициентов уравнений (2), (3) и, как отмечено, существенно снижает практическую ценность версии модели. С целью устранения указанного недостатка, реализацию слагающих ЛС МЛП следует рассматривать относительно координатных систем, в каждой из которых рассматриваемый СПК и учитываемые во взаимодействии с ним КПК условно взаимно неподвижны. В таком качестве, удобнее всего принять [5] отсчётные системы  $C_\lambda \eta^\mu \forall \lambda \in [1, K], \mu \in [1, 3]$ , каждая из которых жёстко связана с  $\lambda$ -ым СПК. Инерциальными  $C_\lambda \eta^\mu \forall \lambda \in [1, K], \mu \in [1, 3]$ , в общем случае, не являются. В то же время, весьма желательно [10], чтобы уравнения, описывающие динамику электромагнитного компонента взаимодействия СПК с КПК, имели тензорный характер. Такие уравнения могут быть получены [11], из равенств типа (2), путём замены в них локальных производных  $\frac{d}{dt}$  абсолютными  $\frac{D}{dt}$ , а также перехода в модели (2), (3) к координатам  $\eta_\lambda^\mu \forall \lambda \in [1, K], \mu \in [1, 3]$ . Соотношение между упомянутыми производными, как известно, имеет вид [11]:

$$\frac{D}{dt} \eta_\alpha^\mu = \frac{d}{dt} \eta_\alpha^\mu + e_{\mu\alpha\nu} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta_\alpha^\nu \forall \mu, \nu \in [1, 3], \quad (5)$$

где  $e_{\mu\alpha\nu} \forall \mu, \nu \in [1, 3], \omega_\alpha$  – символ Леви-Чивита, а также вектор угловой скорости вращения  $C_\alpha \eta^\mu \forall \mu \in [1, 3]$ .

После указанной замены, соотношения, полученные из (2), приобретают тензорный характер. Поэтому, в частности, их форма становится инвариантной по отношению к координатам, в которых они записаны. Переход же к координатам  $\eta_\alpha^\mu \forall \mu \in [1, 3]$  осуществим согласно выражениям:

$$\eta_\alpha^\mu = \mathcal{G}_\rho^\mu \cdot \varepsilon^\rho \forall \rho \in [(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]; \mu \in [1, 3] \quad (6)$$

где  $\mathcal{G}_\rho^\mu$  – матрица преобразования координат:

$$\mathcal{G}_\rho^\mu = \frac{\partial \eta_\alpha^\mu}{\partial \varepsilon^\rho} \forall \rho \in [(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]; \mu \in [1, 3]. \quad (7)$$

На оси  $\eta_\alpha^\mu \forall \mu \in [1, 3]$  и  $\varepsilon^\rho \forall \rho \in [(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]$  могут проецироваться любые векторные величины, характеризующие электродинамику взаимодействия СПК и КПК в системах отсчёта соответственно  $C_\alpha \eta^\mu$

$\forall \mu \in \overline{[1,3]}$  и  $Q\varepsilon^\rho \forall \rho \in \overline{[(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]}$ . В частности, ими могут быть векторы токов, э. д. с. и индукции полей.

Выражения для связей вида

$$\eta_\alpha^\mu = \eta_\alpha^\mu(\varepsilon^\rho) \forall \rho \in \overline{[(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]}; \mu \in \overline{[1,3]} \quad (8)$$

могут быть получены исходя из того, что [5], в процессе описываемого координатного преобразования, его инвариантами являются амплитуды токов в рассматриваемых контурах, а также их э. д. с.

С помощью же матрицы

$$\mathcal{G}_\mu^\rho = \frac{\partial \varepsilon^\rho}{\partial \eta_\alpha^\mu} = (\mathcal{G}_\rho^\mu)^T \forall \rho \in \overline{[(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]}; \mu \in \overline{[1,3]}, \quad (9)$$

осуществимо обратное преобразование

$$\varepsilon^\rho = \mathcal{G}_\mu^\rho \cdot \eta_\alpha^\mu \forall \rho \in \overline{[(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]}; \mu \in \overline{[1,3]}. \quad (10)$$

В выражениях (3) для  $\sigma_{\rho\beta}^\kappa \forall \rho \in \overline{[(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]}$ ,  $\kappa = u \vee \kappa = l$ ,  $M_{\rho\beta}^\kappa \forall \rho \in \overline{[(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]}$ ,  $\kappa = u \vee \kappa = l$  существенно зависят, в частности, от взаимного расположения рассматриваемого  $\beta$ -го СПК и КПК, взаимодействие с которыми для него рассматривается. Поэтому

$$M_{\rho\beta}^\kappa = M_{\rho\beta}^\kappa(w_\beta) \forall \rho \in \overline{[(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]}, \kappa = u \vee \kappa = l, \quad (11)$$

где  $w_\beta$  – координата, определяющая текущее положение рассматриваемого  $\beta$ -го СПК относительно начала отсчёта движения МЛП вдоль оси пути. При этом, поскольку КПК вдоль трассы движения поезда располагаются регулярно, последние зависимости имеют гармонический характер. В то же время, современные способы измерения позволяют [12] экспериментально-расчётными методами со вполне приемлемой точностью определять значения взаимных индуктивностей контуров магнитосвязанных электрических цепей при различном текущем их пространственном взаиморасположении. Это, в свою очередь, позволяет, используя упомянутые методы, поточечно строить искомые зависимости (11) на требуемой сетке  $w_\beta$ . Далее, с использованием методов, например, полиномиальной регрессии [13], реализация которых доступна в ряде современных систем компьютерной математики (например, Mathematica), зависимостям вида (11) может, с сохранением достаточно высокой точности содержания, быть придана форма аналитических выражений. Помимо того, с учётом равенств (4), выражения (3) могут быть преобразованы к виду

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l; \quad \sigma_{\rho\beta}^\kappa = -i_s \cdot w_\beta \cdot \frac{d}{dw_\beta} M_{\rho\beta}^\kappa \forall \rho \in \overline{[(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]}, \kappa = u \vee \kappa = l, \quad (12)$$

где  $\dot{w}_\beta$  – скорость продольного (вдоль касательной к оси) движения рассматриваемого  $\beta$ -го СПК относительно пути. Значения  $\frac{d}{dw_\beta} M_{\rho\beta}^\kappa$

$\forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$ ,  $\kappa = u \vee \kappa = l$  для подстановки в выражения (12) могут быть получены с использованием, созданных описанным путём в форме аналитических выражений, зависимостей вида (11). Таким образом, каждый из  $\beta$  векторов  $\overline{\sigma_{\rho\beta}} \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$  оказывается определёнными в системе отсчёта  $Q\varepsilon^\rho \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$ . Далее, с использованием соотношений вида (6) – (8), каждый такой вектор может быть определён в системе  $C_\beta \eta^\mu \forall \mu \in [1, 3]$  проекциями  $\sigma_{\mu\beta} \forall \mu \in [1, 3]$ .

После преобразований, уравнения, полученные из (2) и (3) путём их трансформации в триэдр  $C_\beta \eta^\mu \forall \mu \in [1, 3]$  с использованием соотношений (5) и (6), приобретают вид

$$\sigma_{\mu\beta} = L_{\mu\nu} \cdot \left( \frac{d}{dt} i^\nu + e_{\mu\beta\nu} \cdot \omega_\beta \cdot i^\nu \right) + L_{\mu\tau} \cdot \left( \frac{d}{dt} i^\tau + e_{\tau\beta\theta} \cdot \omega_\beta \cdot i^\theta \right) + r_\mu \cdot i^\mu$$

$$\forall \mu, \nu, \tau, \theta \in [1, 3]; \quad (13)$$

$$\sigma_{\mu\beta} = \mathcal{G}_\rho^\mu \cdot \sigma_{\rho\beta} \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]; \mu \in [1, 3]$$

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l; \quad \sigma_{\rho\beta}^\kappa = -i_s \cdot \dot{w}_\beta \cdot \frac{d}{dw_\beta} M_{\rho\beta}^\kappa$$

$$\forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \kappa = u \vee \kappa = l. \quad (14)$$

Уравнения (13) имеют постоянные коэффициенты, являются тензорными и описывают токовую динамику ЛУ МЛП в координатах  $i^\mu \forall \mu \in [1, 3]$ . После их (как правило – численного) разрешения относительно этих переменных, последние, с использованием соотношений (10), преобразуются в координаты  $i^\rho \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$ , значения которых определяют реальные токи в цепях КПК.

Магнитная цепь ЛУ предполагается ненасыщенной [1]. Поэтому она может считаться условно-линейной подсистемой и, следовательно, к ней применим принцип аддитивности. Исходя из этого, результирующее поле токов КПК в любой точке геометрического пространства  $O\Xi_\gamma \forall \gamma \in [1, 3]$ , в котором реально движется СПК относительно КПК, может описываться как сумма полей, создаваемых в этой точке токами отдельных модулей КПК:

$$B_{\gamma\beta} = B_{\gamma\rho\beta} \cdot e^\rho; \quad e^\rho = 1; \quad \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \gamma \in [1, 3], \quad (15)$$

где  $B_{\gamma\beta}, B_{\gamma\rho\beta} \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \gamma \in [1, 3]$  – пространственные компоненты индукции поля, создаваемого всеми (учитываемыми во

взаимодействии с  $\beta$ -ым СПК) модулями КПК, а также отдельными такими модулями в рассматриваемой точке этого пространства. В свою очередь, значения компонентов  $B_{\gamma\alpha\beta} \forall \gamma \in [1, 3]$  для каждого  $\alpha$ -ого модуля КПК, определимы соотношениями

$$B_{\gamma\alpha\beta}(i^\alpha) = B_{\gamma\alpha\beta}^u(i^\alpha) - B_{\gamma\alpha\beta}^l(i^\alpha) \quad \forall \gamma \in [1, 3], \quad (16)$$

где  $B_{\gamma\alpha\beta}^\kappa \forall \gamma \in [1, 3], \kappa = u \vee \kappa = l$  – пространственные компоненты индукции поля токов катушек  $\alpha$ -го КПК (взаимодействующего с  $\beta$ -ым СПК).

Выражения же для определения значений  $B_{\gamma\rho\beta}^\kappa(i^\rho) \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \gamma \in [1, 3], \kappa = u \vee \kappa = l$  имеют вид [14]:

$$\begin{aligned} B_{1\rho\beta}^\kappa &= -\frac{i^\rho}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[ F_{12}(k_1', \varphi', \eta) + F_{12}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\substack{\varphi_1' = x_0 - l \\ \varphi_2' = x_0 - l - d}} - \right. \\ &\quad \left. - \left[ F_{12}(k_2', \psi', \eta) + F_{12}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\substack{\psi_1' = x_0 + l \\ \psi_2' = x_0 + l + d}} \right\} \begin{matrix} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{matrix} ; \\ B_{2\rho\beta}^\kappa &= -\frac{i^\rho}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[ F_{12}(k_1, \varphi, \eta) + F_{12}(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\substack{\varphi_1' = x_0 + l \\ \varphi_2' = x_0 + l + d}} - \right. \\ &\quad \left. - \left[ F_{12}(k_2, \psi, \eta) + F_{12}(k_3, \psi, \eta) \right]_{\substack{\psi_1 = y_0 + a \\ \psi_2 = y_0 + a + d}} \right\} \begin{matrix} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{matrix} ; \\ \left\{ F_{12}(k, \varphi, \eta) \right\}_{\substack{\eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h}} &= \left\{ \eta \cdot \operatorname{arctg} \frac{k \cdot \varphi - \eta^2}{\eta \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}} - \right. \\ &\quad \left. - \varphi \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \eta^2}} - \frac{k}{\sqrt{2}} \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + 2 \cdot \varphi}{\sqrt{k^2 + 2 \cdot \eta^2}} \right\} \begin{matrix} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{matrix} ; \\ B_{3\rho\beta}^\kappa &= -\frac{i^\rho}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[ f_3^0(k_1, \varphi, \eta) + f_3^0(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\substack{\varphi_1 = y_0 - a \\ \varphi_2 = y_0 - a - d}} - \right. \\ &\quad \left. - \left[ f_3^0(k_2, \psi, \eta) + f_3^0(k_3, \psi, \eta) \right]_{\substack{\psi_1 = y_0 + a \\ \psi_2 = y_0 + a + d}} + \right. \\ &\quad \left. + \left[ f_{31}(k_1', \varphi', \eta) + f_{31}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\substack{\varphi_1' = x_0 - l \\ \varphi_2' = x_0 - l - d}} - \right. \\ &\quad \left. - \left[ f_{31}(k_2', \psi', \eta) + f_{31}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\substack{\psi_1' = x_0 + l \\ \psi_2' = x_0 + l + d}} \right\} \begin{matrix} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{matrix} \\ &\quad \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \kappa = u \vee \kappa = l ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_{31}(k, \varphi, \eta) &= -\eta \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \eta^2}} + \varphi \cdot \operatorname{arctg} \frac{(k + \varphi) \cdot \eta}{\varphi \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}}; \\
f_{32}(k, \varphi, \eta) &= \sqrt{2} \cdot \eta \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + 2 \cdot \varphi}{\sqrt{k^2 + 2 \cdot \eta^2}} - k \cdot \operatorname{arctg} \frac{(k + 2 \cdot \varphi) \cdot \eta}{k \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}}; \\
f_3^0(k, \varphi, \eta) &= f_{31}(k, \varphi, \eta) + f_{32}(k, \varphi, \eta); \\
k_1' &= -k_1 = [(y_0 - a) - (x_0 - l)]; \\
k_2' &= -k_2 = [(y_0 + a) - (x_0 + l)]; \\
k_3' &= k_3 = -[(y_0 + a) + (x_0 - l)]; \\
k_4' &= k_4 = -[(y_0 - a) + (x_0 + l)], \tag{17}
\end{aligned}$$

где  $i^\rho \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$  – плотности токов в обмотках КПК;  
 $2 \cdot h, d$  – высота и толщина каждой такой обмотки;  
 $2 \cdot l, 2 \cdot a$  – размеры её же внутреннего пространства;  
 $x_0, y_0, z_0$  – координаты точки пространства, в которой описывается поле.

В выражениях (17), кроме того:

$$i^\rho = 0,5 \cdot i^\rho \cdot q \cdot (h \cdot d)^{(-1)} \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \tag{18}$$

где  $q$  – число витков обмотки КПК.

Далее, в (18) последовательно подставляются значения токов  $i^\rho \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$  и, согласно (15) - (17), находятся компоненты  $B_{\gamma\beta} \forall \gamma \in [1, 3]$  индукции поля, создаваемого токами КПК, учитываемых во взаимодействии с  $\beta$ -ым СПК.

Пространство системы  $O\Xi_\gamma \forall \gamma \in [1, 3]$  – евклидово. Поэтому мгновенное значение модуля вектора полной индукции поля, компоненты которого были определены, может быть определено выражением

$$B_\beta = \sqrt{B_{\gamma\beta}^{(2)} \cdot e^\gamma}; e^\gamma = 1 \forall \gamma \in [1, 3]. \tag{19}$$

Соотношение же значений упомянутых компонентов  $B_{\gamma\beta} \forall \gamma \in [1, 3]$  определяет собой направление вектора  $\overline{B_\beta}$ .

Поскольку геометрические размеры элементов обмоток СПК определяются их конструкцией, а направления векторов токов таких элементов может считаться совпадающим с их продольными осями, то, таким образом, оказываются известными все величины, входящие в выражения для определения значений ЛС МЛП, чем завершается построение искомой модели этой силы.

## **Результат исследования**

Создана интегративная парадигма моделирования ЛС МЛП, ассимилирующая достоинства теорий цепей и поля, но свободная от их недостатков. Построена математическая модель такой ЛС, не имеющая дефектов предыдущих версий модели. Этим решена задача настоящей части исследования.

## **Научная новизна и практическая значимость исследования**

Научную новизну исследования составляют приоритетность создания интегративной холистической парадигмы моделирования ЛС МЛП, а также соответствующей версии модели реализации ЛС. Основным проявлением практической значимости работы является возможность, в случае использования её результатов, существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном снижении их ресурсоёмкости.

## **Вывод**

Холистичность и интегративность созданной парадигмы исследования позволили существенно повысить качество математической модели ЛС МЛП, созданной с использованием такой парадигмы. Её использование в процессе динамических исследований МЛП позволит повысить их эффективность и снизить ресурсоёмкость.

## **Библиографический список**

1. Дзензерский В. А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев, В. И. Матин, С. А. Сергеев – К.: Наук. думка, 2001. – 479 с.
2. Dumitrescu M. Magnetic suspension applications on the railway traction for high speed maglev trains / M. Dumitrescu, V Ştefan, C. Pleşcan, C. I. Bobe, G. M. Dragne, C. N. Badea, G. Dumitru // Bulletin of the Transylvania University of Braşov. – 2015. CIBv • Vol. 8 (57) Special Issue № 1. – P. 233–244.
3. Wairagade A. K. R. Magnetic Levitation Train / A. K. R. Wairagade, M. B. H. Balapure, P. Ganer // Journal for Research – 2015. – Vol. 01. – Iss. 08. – P. 1–5.
4. Tandan G. K. A Review on Development and Analysis of Maglev Train / G. K. Tandan, P. K. Sen, G. Sahu, R. Sharma, S. Bohidar // International Journal of Research in Advent Technology. – 2015. – Vol. 3, № 12 – P. 14–17.
5. Сипайлов Г. А. Электрические машины (специальный курс) / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, К.А. Хорьков – М.: Высш. шк., 1987. – 287 с.

6. Львович А. Ю. Электромеханические системы – Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. – 296 с.
7. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи – М.: Высш. шк., 1996. – 578 с.
9. Арменский Е. В. Единая теория электрических машин / Е. В. Арменский, И. В. Кузина. – М.: Изд-во Московск. ин-та электрон. машиностроен., 1975. – 256 с.
10. Крон Г. Применение тензорного анализа в электротехнике / Г. Крон. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 275 с.
11. Рашевский П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ / П. К. Рашевский. – М.: Наука, 1967. – 644 с.
12. Панфилов В. А. Электрические измерения / В. А. Панфилов. – М.: Издат. дом “Академия”, 2006. – 288 с.
13. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Е. Корн. – М.: Наука, 1973. – 831 с.
14. Бирюков В. А. Магнитное поле прямоугольной катушки с током / В. А. Бирюков, В. И. Данилов // Журнал технической физики. – 1961. – Т. XXXI, № 4. – С. 428 – 435.

**Сведения об авторах:**

ПОЛЯКОВ Владислав Александрович: кандидат технических наук; старший научный сотрудник; старший научный сотрудник; Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины

E-mail: p\_v\_a\_725@mail.ru

ХАЧАПУРИДЗЕ Николай Михайлович: кандидат технических наук; старший научный сотрудник; заместитель директора по научной работе; Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины

E-mail: itst@westa-inter.com

**Vladislav A. Polyakov, Nicholas M. Hachapuridze**

Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's National Academy of Sciences

(Dnepr, Ukraine)

## MODEL OF A MAGNETICALLY LEVITATED TRAIN'S LEVITATION FORCE

Date of receipt 22.07.2017

Decision to publish on 26.10.2017

**Annotation:** The implementation of the magnetically levitated train's (MLT) levitation force (LF) occurs during the interaction between fields of superconductor train (STC) and short-circuited track contours (SCTC), which are the elements of levitation module (LM).

**Purpose.** Based on above, the purpose of this study is to obtain a correct description of such interaction. At the present stage, the main and the most universal tool for the analysis and synthesis of processes and systems is their mathematical and, in particular, computer modeling. At the same time, the radical advantages of this tool make even more important the precision of choosing a specific methodology for research conducting.

**Methodology.** This is particularly relevant in relation to such large and complex systems as MLT. For this reason, the work pays special attention to the reasoned choice of the selective features of the research paradigm. The analysis of existing versions of LF implementation's models show that each of them, along with the advantages, also has significant drawbacks.

**Results.** In this regard, one of the main result of the study should be the construction of this force implementation's mathematical model, which preserves the advantages of the mentioned versions, but would be free from their shortcomings. The rationality of application, for the train's LF researching, of an integrative holistic paradigm, which assimilates the advantages of the electric circuit and magnetic field theories, is reasonably justified in work.

**The scientific novelty of the research.** The priority of creation of such a paradigm and the corresponding version of the implementation of LF's model account for the novelty of the research.

**Practical significance of the work.** The practical significance consists in the possibility, in case of using its results, of significantly increasing the efficiency of dynamic MLT research while reducing their resource costs.

**Keywords:** magnetically levitated train (MLT), mathematical model of levitation, integrative paradigm of research.

### Introduction

Currents and poles of contours of levitation junctions of MLT are the elements of one electromagnetic hyperprocess of electromechanical conversion of the energy. It is quite possible to simulate them [1] within the paradigms of electric circuits and magnetic field theories. Therefore, the existing versions of mathematical model of MLT's LF are built [1 – 3] basing upon these paradigms.



Analysis of the properties of the mentioned versions of models signifies that each of them possesses both advantages and disadvantages. Their common advantage is sufficient functionality. Yet the basic immanent drawback of these versions is non-stationary feature of differential equations, caused by cyclic variability of their coefficients, which correspond to self-inductance and mutual inductance of short-circuited track contours (SCTC) of LF both among each other and among superconductor train contours (STC), depending on the position of a train. This significantly complicates solution of tasks of the described dynamics [4], drastically decreasing practical value of model versions.

### Purposes of the Studies

The introduction above reveals [5 – 7] relevance of creation of mathematical model of LF of MLT, which assimilates the advantages of both existing versions of the model, but free of their drawbacks. Creation of this model is the basic task of this work.

### Methodology

Electromechanical conversion of LF of MLT is carried out in the process of interaction of poles and currents of SCTC and STC. Therefore, the pattern of LF of a train is an interaction of STC's element current with current pole of SCTC. This interaction may be described by Ampère's force law expression [8]:

$$f_{\beta\gamma} = l_{\beta\gamma} \cdot i^{\beta\gamma} \cdot B_{\beta\gamma} \cdot \sin \alpha_{\beta\lambda}, \quad (1)$$

where  $f_{\beta\gamma}$  – force, which exerts on  $\gamma^{\text{th}}$  element of  $\beta^{\text{th}}$  STC;

$l_{\beta\gamma}, i^{\beta\gamma}, B_{\beta\gamma}, \alpha_{\beta\gamma}$  – the length of the element, current in it, pole inductance, in which the element is located, and the angle between  $\overline{i^{\beta\gamma}}$  and  $\overline{B_{\beta\gamma}}$ .

The design schemes of SCTC and STC are taken as sets of galvanically isolated conducting rectangular frame and pairs of identical rectangular coils, connected in accordance with zero-flow scheme [1]. In that case, the levitation force (LF) of the train is determined as vector sum of quantities  $\overline{f_{\lambda\chi}} \forall \lambda \in [1, N], \chi \in [1, 4]$ , each of which is a result of interaction of current of one element of STC with the pole of currents forming SCTC with it. In the last expression,  $N$  is the number of superconductor train contours (STC). The dynamics of electromagnetic component of such an interaction is determined by equations of Kirchhoff's second rule [8]. The subsystem of “STC–SCTC”, as a rule, is degenerate [6], namely, their capacity indices are very low. Therefore, in the inertial system  $Q\varepsilon^{\rho} \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - \overline{E}), (\chi_{\beta} + \overline{E})]$ , the model of electromagnetic component of interaction of  $\beta^{\text{th}}$  STC with SCTC considered, has the form [8, 9]:

$$\sigma_{\rho\beta} = L_{\rho\rho} \cdot \frac{d}{dt} i^\rho + L_{\rho\mu} \cdot \frac{d}{dt} i^\mu + r_\rho \cdot i^\rho \quad \forall \rho, \mu \in \overline{(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)}; \quad (2)$$

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l; \quad \sigma_{\rho\beta}^\kappa = -\frac{d}{dt} (M_{\rho\beta}^\kappa \cdot i_s^\beta) \\ \forall \rho \in \overline{(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)}, \kappa = u \vee \kappa = l, \quad (3)$$

where  $\sigma_{\rho\beta}^\kappa \quad \forall \rho \in \overline{(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)}, \kappa = u \vee \kappa = l$  – electromotive force (EMF) in coils of  $\rho^{\text{th}}$  of short-circuited track contours with changes of coupling with subcontours of current  $i_s^\beta$  in circuit  $\beta^{\text{th}}$  superconductor train contours;

$L_{\rho\rho}, L_{\rho\mu}, r_\rho \quad \forall \rho, \mu \in \overline{(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)}$  – own and mutual inductances and active resistances of short-circuited track contours;

$\chi_\beta$  – number (from the onset of a track section on which the magnetically levitated train runs) of the last short-circuited track contour the transverse section of which was passed by transverse section of  $\beta^{\text{th}}$  short-circuited track contour;

$E$  – half of the figure of short-circuited track contours with which the electromagnetic interaction of each superconductor train contour is considered;

$i^\rho, i^\mu \quad \forall \rho, \mu \in \overline{(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)}$  – short-circuited track contours currents;

$M_{\rho\beta}^\kappa \quad \forall \rho \in \overline{(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)}, \kappa = u \vee \kappa = l$  – mutual inductances between  $\beta^{\text{th}}$  superconductor train contour and coils of interaction with short-circuited track contours;

$t$  – time.

Owing to the accepted design measures [1], values of currents  $i_s^\lambda \quad \forall \lambda \in \overline{[1, K]}$ , are changed rather slowly, and in intervals commensurate with the time of observing the train traffic, may be considered equal and constant

$$i_s^\lambda = i_s = \text{const} \quad \forall \lambda \in \overline{[1, K]}, \quad (4)$$

where  $K$  – a number of superconductor train contours installed in magnetically levitated train. The value of  $E$  should be chosen in a way that on both sides of each  $\beta^{\text{th}}$  superconductor train contour in short-circuited track contour, preceding and following the quantities considered, the values  $\sigma_{\rho\beta}^\kappa \quad \forall \rho < \chi_\beta - E \vee \rho > \chi_\beta + E, \kappa = u \vee \kappa = l$  even in the non-equilibrium state of levitation module should be negligibly low.

Superconductor train contours and short-circuited track contour are mutually movable.

Therefore,  $L_{\rho\rho}, L_{\rho\mu}, M_{\rho\lambda}^\kappa \quad \forall \rho, \mu \in \overline{(\chi_\lambda - E), (\chi_\lambda + E)}, \lambda \in \overline{[1, K]}, \kappa = u \vee \kappa = l$  possesses cyclically varying values in time. This, in its turn, leads to non-stationary coefficients of equations (2), (3), and significantly decreases practical value of the version of the model. In order to eliminate this disadvantage, the realisation of elements of levitation force of MLT should be considered with

respect to coordinate systems, in each of which the considered superconductor train contour and interaction with it short-circuited track contour are conditionally mutually immovable. In this capacity, it is most convenient to accept [5] counting systems  $C_\lambda \eta^\mu \forall \lambda \in [\overline{1, K}], \mu \in [\overline{1, 3}]$ , each of which is rigidly connected with  $\lambda^{\text{th}}$  superconductor train contour. Generally,  $C_\lambda \eta^\mu \forall \lambda \in [\overline{1, K}], \mu \in [\overline{1, 3}]$  are not inertial. At the same time, it is highly desirable [10] that equations describing dynamics of electromagnetic component of interaction between superconductor train contour and short-circuited track contour should have tensor property. These equations may be obtained [11] out of equations of type (2) by their derivatives  $\frac{d}{dt}$

being replaced by absolute  $\frac{D}{dt}$ , as well as by means of transition in models (2), (3)

to coordinates  $\eta_\lambda^\mu \forall \lambda \in [\overline{1, K}], \mu \in [\overline{1, 3}]$ . The relation between the above-mentioned derivatives, as it is known, is given as follows [11]:

$$\frac{D}{dt} \eta_\alpha^\mu = \frac{d}{dt} \eta_\alpha^\mu + e_{\mu\alpha\nu} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta_\alpha^\nu \forall \mu, \nu \in [\overline{1, 3}], \quad (5)$$

where  $e_{\mu\alpha\nu} \forall \mu, \nu \in [\overline{1, 3}]$ ,  $\omega_\alpha$  – Levi-Civita symbol and angular rotating velocity vector  $C_\alpha \eta^\mu \forall \mu \in [\overline{1, 3}]$ .

After the mentioned replacement, relations obtained out of (2) acquire tensor character. Therefore, their form becomes invariant in relation to coordinates in which they are written, whereas transition to coordinates  $\eta_\alpha^\mu \forall \mu \in [\overline{1, 3}]$  is feasible according to the expressions:

$$\eta_\alpha^\mu = \mathcal{G}_\rho^\mu \cdot \varepsilon^\rho \forall \rho \in [(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]; \mu \in [\overline{1, 3}] \quad (6)$$

where  $\mathcal{G}_\rho^\mu$  – coordinate transformation matrix:

$$\mathcal{G}_\rho^\mu = \frac{\partial \eta_\alpha^\mu}{\partial \varepsilon^\rho} \forall \rho \in [(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]; \mu \in [\overline{1, 3}]. \quad (7)$$

On the axis  $\eta_\alpha^\mu \forall \mu \in [\overline{1, 3}]$  and  $\varepsilon^\rho \forall \rho \in [(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]$  any vector value may be projected, which characterise electrodynamics of interaction of superconductor train contour and short-circuited track contour in the counting systems respectively  $C_\alpha \eta^\mu \forall \mu \in [\overline{1, 3}]$  and  $Q \varepsilon^\rho \forall \rho \in [(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]$ . In particular, they can be vectors of currents, electromotive force and pole induction.

Expressions for connections

$$\eta_\alpha^\mu = \eta_\alpha^\mu (\varepsilon^\rho) \forall \rho \in [(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]; \mu \in [\overline{1, 3}] \quad (8)$$

may be obtained assuming that [5] during the process of the described coordinate transformation, its invariants are amplitudes of currents in the analysed contours and their electromotive force.

With the help of the matrix, though

$$\mathcal{G}_\mu^\rho = \frac{\partial \varepsilon^\rho}{\partial \eta_\alpha^\mu} = (\mathcal{G}_\rho^\mu)^T \quad \forall \rho \in [(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]; \mu \in [1, 3], \quad (9)$$

the irreversible transformation is feasible

$$\varepsilon^\rho = \mathcal{G}_\mu^\rho \cdot \eta_\alpha^\mu \quad \forall \rho \in [(\chi_\alpha - E), (\chi_\alpha + E)]; \mu \in [1, 3]. \quad (10)$$

In the expressions (3) for  $\sigma_{\rho\beta}^\kappa \quad \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \kappa = u \vee \kappa = l$ ,  $M_{\rho\beta}^\kappa \quad \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \kappa = u \vee \kappa = l$  they are rather dependent upon mutual location of the analysed  $\beta^{\text{th}}$  superconductor train contour and short-circuited track contour, the interaction with which is considered for it. Therefore,

$$M_{\rho\beta}^\kappa = M_{\rho\beta}^\kappa(w_\beta) \quad \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \kappa = u \vee \kappa = l, \quad (11)$$

where  $w_\beta$  – coordinate determining the current location of the analysed  $\beta^{\text{th}}$  superconductor contour in relation to the onset of magnetically levitated train movement along the axis of the track. In addition, since short-circuited track contour along the guidance is regularly located, last dependences have a galvanic character. At the same time, modern ways of measuring enable us, [12] by virtue of experimental and calculating methods, with quite acceptable accuracy to determine values of mutual induction of contours in magnetically connected electric circuits with their different location. This, in its turn, enables us, using the mentioned methods, to pointwise build the desired dependences (11) on the required net  $w_\beta$ . Furthermore, by means of polynomial regression [13], the realisation of which is affordable in a number of computer mathematics systems (for instance, Mathematica), the dependences of (11), with a preservation of quite a high accuracy of content, may be given a form of analytical expressions. Apart from that, considering equations (4), expressions (3) may be transformed into

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l; \quad \sigma_{\rho\beta}^\kappa = -i_s \cdot w_\beta \cdot \frac{d}{dw_\beta} M_{\rho\beta}^\kappa$$

$$\forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \kappa = u \vee \kappa = l, \quad (12)$$

where  $w_\beta$  – velocity of longitudinal (along the tangent to the axis) movement of the analysed  $\beta^{\text{th}}$  superconductor contour with relation to the guidance.

Values  $\frac{d}{dw_\beta} M_{\rho\beta}^\kappa \quad \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \kappa = u \vee \kappa = l$  for substitution

in the expressions (12) may be obtained using the described method in the form of analytical expressions, dependences of the (11). Thus, each of the vectors  $\beta$   $\sigma_{\rho\beta} \quad \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$  appears definite in the counting system  $Q\varepsilon^\rho$

$\forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})]$ . Using the interactions of the (6) – (8), each of such vectors may be determined in the system  $C_\beta \eta^\mu \forall \mu \in [1, 3]$  by projections  $\sigma_{\mu\beta} \forall \mu \in [1, 3]$ .

After transformation, the equations obtained form (2) and (3) by means of their transforming into trihedral  $C_\beta \eta^\mu \forall \mu \in [1, 3]$ , using the interactions (5) and (6) acquire the view of

$$\sigma_{\mu\beta} = L_{\mu\mu} \cdot \left( \frac{d}{dt} i^\mu + e_{\mu\beta\nu} \cdot \omega_\beta \cdot i^\nu \right) + L_{\mu\tau} \cdot \left( \frac{d}{dt} i^\tau + e_{\tau\beta\theta} \cdot \omega_\beta \cdot i^\theta \right) + r_\mu \cdot i^\mu$$

$$\forall \mu, \nu, \tau, \theta \in [1, 3]; \quad (13)$$

$$\sigma_{\mu\beta} = \mathcal{G}_\rho^\mu \cdot \sigma_{\rho\beta} \quad \forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})]; \mu \in [1, 3]$$

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l; \quad \sigma_{\rho\beta}^\kappa = -i_s \cdot \dot{w}_\beta \cdot \frac{d}{dw_\beta} M_{\rho\beta}^\kappa$$

$$\forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})], \kappa = u \vee \kappa = l. \quad (14)$$

Equations (13) possess constant coefficients, are considered tensorial and describe the dynamics of currents of levitation modules in MLT, in coordinates  $i^\mu \forall \mu \in [1, 3]$ . After their (as a rule, numerical) resolution with respect to these derivatives, the latter, with the use of interactions (10), are transformed into coordinates  $i^\rho \forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})]$ , the values of which are defined real currents in short-circuited contours circuits.

Magnetic circuit of levitation module is intended to be unsaturated [1]. Therefore it may be considered conditionally linear and, consequently, additivity may be applied to it. Based upon this, resulting field of currents in short-circuited track contour at any point of geometrical space  $O\Xi_\gamma \forall \gamma \in [1, 3]$ , where superconductor contour moves relatively to short-circuited track contour, may be described as sum of fields created in this point by currents of separate modules of short-circuited track contour:

$$B_{\gamma\beta} = B_{\gamma\rho\beta} \cdot e^\rho; \quad e^\rho = 1; \quad \forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})], \gamma \in [1, 3], \quad (15)$$

where  $B_{\gamma\beta}, B_{\gamma\rho\beta} \forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})], \gamma \in [1, 3]$  – space components of pole induction, created by all (those interacting with  $\beta^{\text{th}}$  superconductor track contour) modules of short-circuited track contour, and such separate modules in the analysed point of this space. In its turn, values of the components  $B_{\gamma\alpha\beta} \forall \gamma \in [1, 3]$  for each  $\alpha$  module of short-circuited track contour are determined by relations

$$B_{\gamma\alpha\beta}(i^\alpha) = B_{\gamma\alpha\beta}^u(i^\alpha) - B_{\gamma\alpha\beta}^l(i^\alpha) \quad \forall \gamma \in [1, 3], \quad (16)$$

where  $B_{\gamma\alpha\beta}^{\kappa} \forall \gamma \in \overline{[1,3]}, \kappa = u \vee \kappa = l$  – space components of induction of pole of coil currents in  $\alpha$  short-circuited track contour (interacting with  $\beta$  superconductor track contour).

Expression for determination of values of  $B_{\gamma\rho\beta}^{\kappa} (i^{\rho}) \forall \rho \in \overline{[(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]}, \gamma \in \overline{[1,3]}, \kappa = u \vee \kappa = l$  are of the form [14]:

$$\begin{aligned}
B_{1\rho\beta}^{\kappa} &= -\frac{t^{\rho}}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[ F_{12}(k_1', \varphi', \eta) + F_{12}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\substack{\varphi_2 = x_0 - l - d \\ \varphi_1 = x_0 - l}} - \right. \\
&\quad \left. - \left[ F_{12}(k_2', \psi', \eta) + F_{12}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\substack{\psi_2 = x_0 + l + d \\ \psi_1 = x_0 + l}} \right\} \left. \begin{array}{l} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{array} \right\} ; \\
B_{2\rho\beta}^{\kappa} &= -\frac{t^{\rho}}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[ F_{12}(k_1, \varphi, \eta) + F_{12}(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\substack{\varphi_2 = x_0 + l + d \\ \varphi_1 = x_0 + l}} - \right. \\
&\quad \left. - \left[ F_{12}(k_2, \psi, \eta) + F_{12}(k_3, \psi, \eta) \right]_{\substack{\psi_2 = y_0 + a + d \\ \psi_1 = y_0 + a}} \right\} \left. \begin{array}{l} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{array} \right\} ; \\
\left\{ F_{12}(k, \varphi, \eta) \right\}_{\substack{\eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h}} &= \left\{ \eta \cdot \operatorname{arctg} \frac{k \cdot \varphi - \eta^2}{\eta \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}} - \right. \\
&\quad \left. - \varphi \cdot \operatorname{ar sh} \frac{k + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \eta^2}} - \frac{k}{\sqrt{2}} \cdot \operatorname{ar sh} \frac{k + 2 \cdot \varphi}{\sqrt{k^2 + 2 \cdot \eta^2}} \right\} \left. \begin{array}{l} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{array} \right\} ; \\
B_{3\rho\beta}^{\kappa} &= -\frac{t^{\rho}}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[ f_3^0(k_1, \varphi, \eta) + f_3^0(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\substack{\varphi_2 = y_0 - a - d \\ \varphi_1 = y_0 - a}} - \right. \\
&\quad - \left[ f_3^0(k_2, \psi, \eta) + f_3^0(k_3, \psi, \eta) \right]_{\substack{\psi_2 = y_0 + a + d \\ \psi_1 = y_0 + a}} + \\
&\quad \left. + \left[ f_{31}(k_1', \varphi', \eta) + f_{31}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\substack{\varphi_2 = x_0 - l - d \\ \varphi_1 = x_0 - l}} - \right. \\
&\quad \left. - \left[ f_{31}(k_2', \psi', \eta) + f_{31}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\substack{\psi_2 = x_0 + l + d \\ \psi_1 = x_0 + l}} \right\} \left. \begin{array}{l} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{array} \right\} \\
&\quad \forall \rho \in \overline{[(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]}, \kappa = u \vee \kappa = l ;
\end{aligned}$$

$$f_{31}(k, \varphi, \eta) = -\eta \cdot \operatorname{ar sh} \frac{k + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \eta^2}} + \varphi \cdot \operatorname{arctg} \frac{(k + \varphi) \cdot \eta}{\varphi \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}} ;$$

$$f_{32}(k, \varphi, \eta) = \sqrt{2} \cdot \eta \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + 2 \cdot \varphi}{\sqrt{k^2 + 2 \cdot \eta^2}} - k \cdot \operatorname{arctg} \frac{(k + 2 \cdot \varphi) \cdot \eta}{k \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}};$$

$$f_3^0(k, \varphi, \eta) = f_{31}(k, \varphi, \eta) + f_{32}(k, \varphi, \eta);$$

$$k_1' = -k_1 = [(y_0 - a) - (x_0 - l)];$$

$$k_2' = -k_2 = [(y_0 + a) - (x_0 + l)];$$

$$k_3' = k_3 = -[(y_0 + a) + (x_0 - l)];$$

$$k_4' = k_4 = -[(y_0 - a) + (x_0 + l)], \quad (17)$$

where  $i^\rho \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$  – current density in coils of short-circuited track contour;

$2 \cdot h, d$  – height and thickness of each of this coil;

$2 \cdot l, 2 \cdot a$  – size of its internal space;

$x_0, y_0, z_0$  – coordinates of space point, in which the pole is described;

In expressions (17) besides there are:

$$i^\rho = 0,5 \cdot i^\rho \cdot q \cdot (h \cdot d)^{(-1)} \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)], \quad (18)$$

where  $q$  – number of windings of short-circuited track contour coil.

Then, in (18) the values of currents  $i^\rho \forall \rho \in [(\chi_\beta - E), (\chi_\beta + E)]$  are put and, according to (15) – (17), the components  $B_{\gamma\beta} \forall \gamma \in [1, 3]$  of pole induction are located, which is created by currents of short-circuited track, considered in interaction with  $\beta$  superconductor track contour.

Space of the system  $O\Xi_\gamma \forall \gamma \in [1, 3]$  – Euclidean. Therefore, instant value of vector of module of full induction of pole, whose components have been determined, may be expressed as follows:

$$B_\beta = \sqrt{B_{\gamma\beta}^{(2)} \cdot e^\gamma}; e^\gamma = 1 \forall \gamma \in [1, 3]. \quad (19)$$

Relation of the mentioned values of components  $B_{\gamma\beta} \forall \gamma \in [1, 3]$  determines the direction of vector  $\overline{B_\beta}$ .

Since geometrical size of the elements of windings of superconductor track contour are determined by their construction, and the direction of vector of currents of such elements may be considered congruous with their longitudinal axis, all values become known, which are included in expression for determination of levitation force of magnetically-levitated train. Thus it results in design of this sought model of force.

## Result

The integrative paradigm of simulation of levitation force of magnetically-

levitated train has been created. It assimilates advantages of circuit and field theories, yet is free of their drawbacks. The mathematical model of such levitation force has been designed, which does not possess any drawbacks of previous version of the model. This is what has solved the present part of the study.

### **Scientific Novelty and Practical Significance of the Studies**

The scientific novelty of the studies is represented by priority of creating an integrative holistic paradigm of simulation of levitation force of magnetically-levitated train as well as the corresponding version of the model of realisation of levitation force. The core significance of the studies is, in case it is implemented, significant increase of efficiency of dynamics research of MLT with a simultaneous decrease of their resource-intensity.

### **Conclusion**

The holistic and integrative model that has been created enabled us to significantly enhance the quality of the model of MLT's LF, created by virtue of such a paradigm. Its application during researches of MLT will enable us to increase their efficiency and decrease their resource-intensity.

### **References**

1. Dzenzerskij V. A., Omel'janenko V. I., Vasil'ev S. V., Matin V. I. & Sergeev S. A. *Vysokoskorostnoj magnitnyj transport s jelektrodinamicheskoj levitaciej* [High-speed Magnetic Levitation Transport with Electrodynamic Levitation]. Kiev, 2001. 479 p.
2. Dumitrescu M., Ștefan V., Pleșcan C., Bobe C. I., Dragne G. M., Badea C. N. & Dumitru G. *Bulletin of the Transylvania University of Brașov*, 2015, vol. 8 (57), no. 1, pp. 233–244.
3. Wairagade A. K. R., Balapure M. B. H. & Ganer P. *Journal for Research*, 2015, vol. 01, iss. 08, pp. 1–5.
4. Tandan G. K., Sen P. K., Sahu G., Sharma R. & Bohidar S. *International Journal of Research in Advent Technology*, 2015, vol. 03, no. 12, pp. 14–17.
5. Sipajlov G. A., Kononenko E. V. & Hor'kov K. A. *Jelektricheskie mashiny (special'nyj kurs)* [Electric Machines (Special Course)]. Moscow, 1987. 287 p.
6. L'vovich A. Ju. *Jeletromehaničeskie sistemy* [Electromechanical Systems]. Leningrad, 1989. 296 p.
7. Kopylov I. P. *Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskikh mashin* [Mathematical Modeling of Electrical Machines]. Moscow, 2001. 327 p.



8. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: Jelektricheskie cepi* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electrical Circuits]. Moscow, 1996. 578 p.
9. Armenskiy Ye. V. & Kuzina I. V. *Yedinaya teoriya elektricheskikh mashin* [Unified Theory of Electrical Machines]. Moskva, 1975. 256 p.
10. Kron G. *Primenenie tenzornogo analiza v jelektrotehnike* [The Use of Tensor Analysis in Electrical Engineering]. Moscow, Leningrad, 1955. 275 p.
11. Rashevskij P. K. *Rimanova geometrija i tenzornyj analiz* [Riemann Geometry and Tensor Analysis]. Moscow, 1967. 644 p.
12. Panfilov V. A. *Elektricheskie izmereniya* [Electrical measurements]. Moscow, 2006. 288 p.
13. Korn G. & Korn Ye. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers]. Moscow, 1973. 831 p.
14. Birjukov V. A. & Danilov V. Y. *Zhurnal tehnichekoj fiziki – Technical Physics*, 1961, vol. XXXI, no. 4, pp. 428–435.

**Information about the authors:**

Vladislav A. POLYAKOV: Ph. D. of Engineering Sciences; Senior Research Officer; Senior Research Officer; Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's National Academy of Sciences

E-mail: p\_v\_a\_725@mail.ru

Nicholas M. HACHAPURIDZE: Ph. D. of Engineering Sciences; Senior Research Officer; Deputy Director for Science; Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's National Academy of Sciences

E-mail: itst@westa-inter.com

**В. В. Никитин, В. М. Стрепетов**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
(Санкт-Петербург, Россия)

## **ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ БОРТОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЛЕВИТАЦИИ И ТЯГИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ**

Дата поступления 24.07.2017

Решение о публикации 26.10.2017

### ***Аннотация:***

**Введение.** Комбинированная система левитации и тяги (КСЛТ) на переменном токе представляет собой разновидность системы электродинамического подвеса, в которой сила тяги и левитации создается одним комплектом бортовых электромагнитов, причем подъемная сила обеспечивается при любых скоростях движения экипажа, включая нулевую. Недостатками системы являются низкий энергетический фактор и сложность управления пуско-тормозными режимами. Областью применения подобной системы могут быть пассажирские перевозки внутри крупных городов и городских агломераций на расстояния до 100 км со скоростями до 150-200 км/ч.

**Цель.** Целью работы является решение комплексной задачи обеспечения бортовых электромагнитов КСЛТ электроэнергией с повышенным энергетическим фактором и возможностью управления всеми режимами движения.

**Метод (методология).** Использовано математическое моделирование электромагнитных и электромеханических процессов с последующей оценкой технико-экономических параметров КСЛТ.

**Результаты.** Предложен практически реализуемый вариант системы энергообеспечения бортовых электромагнитов КСЛТ.

**Практическая значимость.** Предложенный вариант системы энергообеспечения обладает существенными преимуществами перед ранее рассматривавшимися: возможностью гибко управлять всеми режимами движения КСЛТ при повышенном энергетическом факторе.

**Заключение.** Система энергообеспечения КСЛТ на переменном токе от тяговой сети постоянного напряжения 3...5 кВ с размещением на борту экипажа автономных инверторов позволяет уменьшить массу бортового электрооборудования на 10-20%, минимизировать потребление неактивной мощности и гибко управлять всеми режимами движения экипажа.

**Ключевые слова:** комбинированная система левитации и тяги, система энергообеспечения, пуско-тормозные режимы, полупроводниковые преобразователи.

### **Введение**

В настоящее время возрождается интерес к разработке и созданию магнитолевитационных транспортных систем различного назначения [1 –

5], обусловленный стремлением повысить технико-экономические и экологические показатели транспортных систем. Одна из устойчивых тенденций заключается в разработке комбинированных систем, в которых рабочие электромагнитные усилия в направлениях различных координатных осей создаются одним источником магнитного поля.

Комбинированная система левитации и тяги на переменном токе (КСЛТ) представляет собой разновидность системы электродинамического подвеса, в которой тяговое и подъемное усилия создаются одним комплектом бортовых электромагнитов, питающихся переменным током (рис. 1). На борту экипажа КСЛТ размещены  $N$  однотипных электромагнитов, которые питаются однофазным переменным током, при этом намагничивающая сила (НС) бортовых электромагнитов первоначально подчиняется условию:

$$wI_m(t) = \sqrt{2} wI_0 \cos[\Omega t + \pi(m - 1)], \quad m = 1, \dots, N.$$

где  $wI_0$  – действующее значение НС бортового электромагнита;  
 $\Omega$  – циклическая частота напряжения питания электромагнитов.

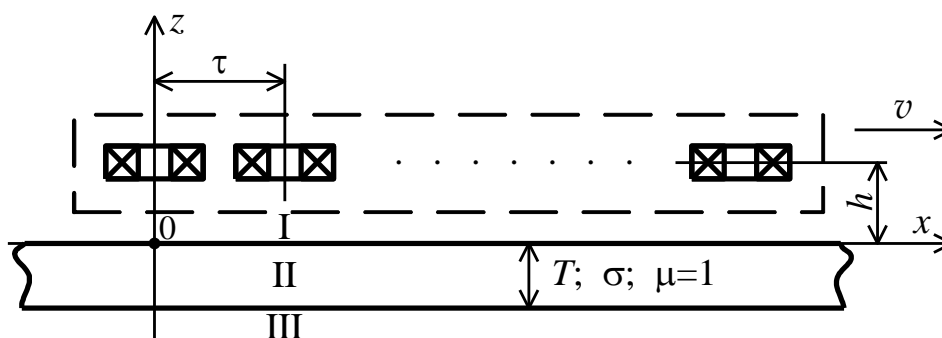


Рис. 1. Комбинированная система левитации и тяги на однофазном переменном токе.

I, III – непроводящие немагнитные области, II – область немагнитной проводящей путевой полосы,  $T$  – толщина путевой полосы,  $h$  – высота подвеса экипажа.

При таком условии система бортовых электромагнитов представляет собой переменнo-полюсную магнитную систему, благодаря чему подъемная сила  $F_z$  создается при любой скорости движения  $v$ , включая нулевую. Это выгодно отличает данную систему от традиционного электродинамического подвеса с использованием электромагнитов с постоянной НС, при котором, как известно [6], подъемная сила возникает при скоростях движения не менее  $v=80...100$  км/ч. При этом КСЛТ сохраняет такие важные преимущества систем электродинамического подвеса как большую высоту подвеса (100 – 150 мм), что весьма существенно в тяжелых климатических условиях, и естественную вертикальную устойчивость экипажа. Исследования показали, что наиболее целесообразно использование КСЛТ в пассажирских перевозках в городах

и в пределах городских агломераций на относительно небольшие расстояния 70...100 км со скоростями до 150...200 км/ч.

Недостатками КСЛТ, питающейся однофазным переменным током, является отсутствие пускового усилия  $F_x|_{v=0} = 0$ , низкое значение коэффициента мощности, а также необходимость глубокого охлаждения бортовых электромагнитов [7, 8].

### Способы создания пускового усилия КСЛТ

Для создания пускового (или тормозного), усилия КСЛТ необходимо обеспечить пространственно-временной сдвиг НС бортовых электромагнитов, что позволит создать на период разгона (или торможения) магнитолевитационного экипажа прямую (обратную) бегущую волну магнитного поля. Одним из вариантов технического решения данной проблемы является конденсаторный способ пуска КСЛТ [9, 10]. Способ основан на подключении к обмоткам бортовых электромагнитов одной из переменного-полюсных систем активно-емкостных элементов (рис. 2) таким образом, чтобы их НС определялась соотношением

$$wI_m(t) = \sqrt{2} wI_0 \cos \left[ \Omega t + \frac{\pi}{2} (m - 1) \right], \quad m = 1, \dots, N.$$

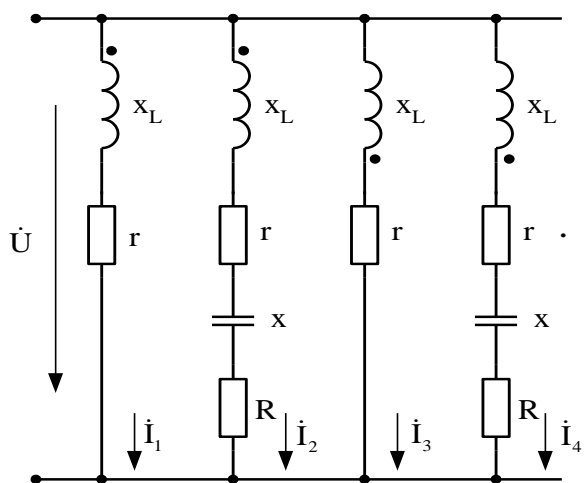


Рис. 2.  
Подключение пусковых активно-емкостных элементов при конденсаторном способе пуска КСЛТ.

Однако исследования показали недостаточную энергетическую эффективность предложенного способа: в пусковых активно-емкостных элементах будут возникать значительные потери мощности. Кроме этого, увеличатся массогабаритные показатели бортового электрооборудования.

Более выгодным техническим решением является применение на экипаже бортового полупроводникового преобразователя [11, 12], что позволит не только свести к минимуму потери мощности в пуско-тормозных режимах, но и

минимизировать или вовсе исключить потребление реактивной мощности из тяговой сети. Кроме этого, при питании бортовых электромагнитов от полупроводникового преобразователя появляется возможность

обеспечения бегущего характера магнитного поля, что позволит улучшить характеристики транспортной установки с КСЛТ.

В этом случае изменение НС бортовых электромагнитов во времени подчиняется условию:

$$wI_m(t) = \sqrt{2} wI_0 \cos[\Omega t + \zeta(m - 1)], \quad m = 1, \dots, N.$$

где  $\zeta$  – фазовый сдвиг между НС соседних электромагнитов.

Заметим, что  $\zeta=\pi$  определяет исходный стационарный режим движения КСЛТ, а  $\zeta=\pi/2$  соответствует конденсаторному способу пуска КСЛТ. Практический интерес представляют зависимости удельных (приходящихся на один электромагнит) сил тяги  $f_x$  и левитации  $f_z$  от угла  $\zeta$  на разных частотах  $f_c$  питающего напряжения. Такие зависимости представлены на рис. 3 и рис. 4 для следующих основных параметров транспортной установки с КСЛТ: НС бортового электромагнита  $wI_0=5 \cdot 10^4$  А; удельное сопротивление путевой проводящей полосы  $1/\sigma=3,2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м; толщина путевой полосы  $T=0,02$  м; отношение половины ширины электромагнита к расстоянию между центрами соседних электромагнитов  $a/\tau=0,6$ . Отношение половины длины электромагнита к расстоянию между центрами соседних электромагнитов обозначено  $b/\tau$ .

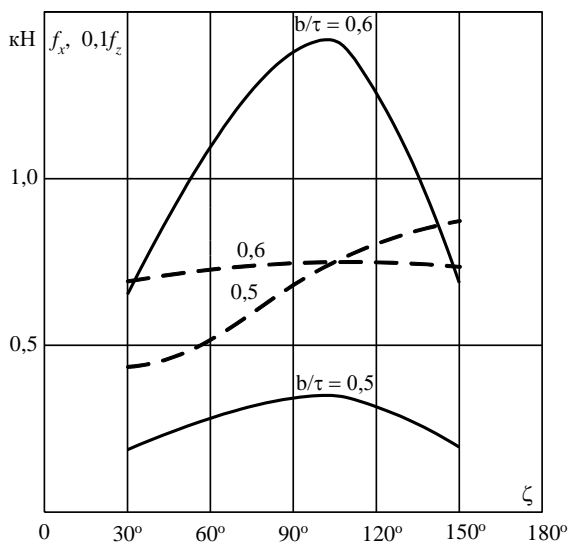


Рис.3.

Зависимости удельных сил тяги (сплошные линии) и левитации (пунктирные линии) от угла регулирования  $\zeta$  при частоте  $f_c=5$  Гц различных значениях параметра  $b/\tau$ .

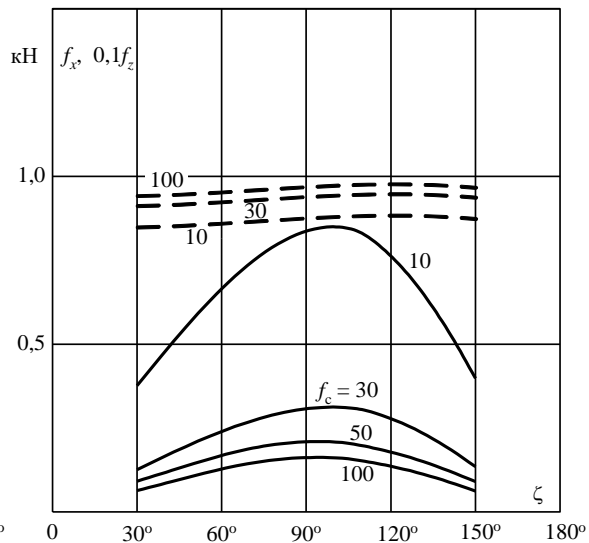


Рис. 4.

Зависимости удельных сил тяги (сплошные линии) и левитации (штриховые линии) от угла регулирования  $\zeta$  при различных частотах питания  $f_c$  и  $b/\tau=0,6$ .

## Системы питания бортовых электромагнитов КСЛТ

Для обеспечения безопасности и удовлетворительных эксплуатационных свойств транспортной установки с КСЛТ система питания бортовых электромагнитов должна соответствовать ряду общих требований: бесперебойность питания, плавность регулирования скорости, тягового и тормозного усилия, минимальные искажения формы тока бортовых электромагнитов, минимальное содержание гармоник в токе тяговой сети, высокая энергоэффективность.

Размещение статических преобразователей энергии на экипаже КСЛТ характеризуется рядом преимуществ по сравнению с вариантом стационарного размещения преобразователей: обеспечивает гибкое и независимое управление экипажами, что облегчает задачу регулирования объемов движения при колебаниях пассажиропотоков, упрощаются и удешевляются преобразовательные агрегаты тяговых подстанций, бортовые преобразователи обеспечивают возможность управления всеми режимами движения – пуском, движением по участку, торможением. Рассмотрены два варианта энергообеспечения бортовых электромагнитов: электроснабжение от сети постоянного напряжения  $U_c=3 \dots 5$  кВ и сети переменного напряжения такого же уровня. Поскольку реализуемые скорости движения относительно невелики (до 150 – 200 км/ч), предполагается использование подвижного токосъема с контактного рельса. Принципиальные схемы обоих вариантов представлены на рис. 5 и рис. 6.

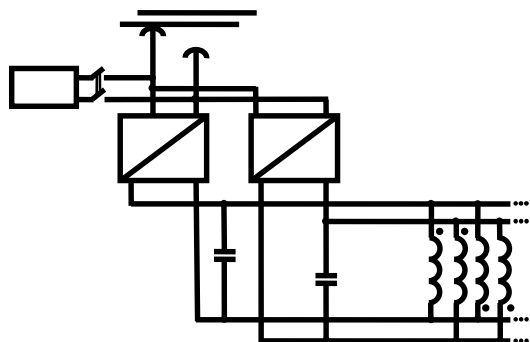


Рис. 5.

Система питания бортовых электромагнитов КСЛТ от сети постоянного напряжения.

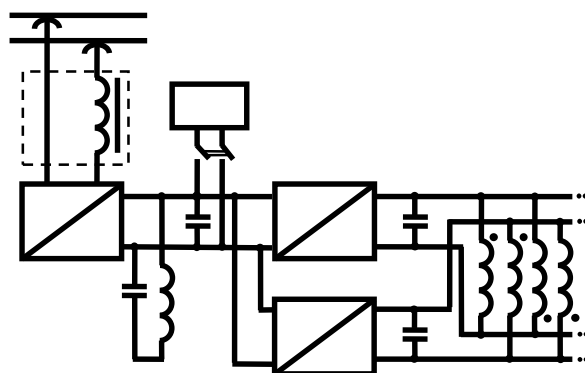


Рис. 6.

Система питания бортовых электромагнитов КСЛТ от сети переменного напряжения.

Предварительные оценки, выполненные авторами [12], показали, что для маршрутов движения протяженностью до 100 км со скоростями до 150-200 км/ч этим требованиям в наибольшей мере (при минимальных массе и габаритах бортового электрооборудования) соответствует система питания транспортной установки с КСЛТ в виде тяговой сети постоянного

напряжения и двух бортовых автономных инверторов на экипаже. Один из инверторов питает бортовые электромагниты, образующие переменноплюсную систему, с нечетными номерами, другой – с четными номерами. Это позволяет обеспечивать требуемый угол сдвига  $\zeta$  между волнами НС бортовых электромагнитов в режимах пуска, установившегося движения и электрического торможения. Такой вариант энергообеспечения бортовых электромагнитов КСЛТ обеспечивает гибкое, независимое управление экипажами и при необходимости облегчает задачу регулирования объемов движения. Наличие звена постоянного тока (тяговой сети) в системе электроснабжения минимизирует потребление неактивной мощности и снижает потери мощности в тяговой сети. Кроме этого, обеспечивается меньшая кратность преобразования энергии, меньшие массогабаритные характеристики бортового оборудования, упрощаются условия использования бортового источника резервного питания (ИРП), обеспечивающего бесперебойность питания электромагнитов тяги и левитации при нарушениях токосъема от стационарной тяговой сети.

### **Заключение**

Введение в структуру системы энергообеспечения бортовых электромагнитов КСЛТ статических преобразователей позволит гибко управлять движением экипажей по заданному маршруту в режимах пуска, установившегося движения и торможения. Система энергообеспечения со статическими преобразователями обеспечит снижение массы бортового оборудования экипажа на 10-20% по сравнению с системой, использующей конденсаторный способ пуска. Наиболее целесообразно энергообеспечение бортовых электромагнитов от сети постоянного напряжения 3...5 кВ при использовании двух бортовых автономных инверторов напряжения с регулируемой величиной, частотой и начальной фазой основной гармоники выходного напряжения.

### **Библиографический список**

1. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев; под ред. В. А. Гапановича. – М.: Физматлит, 2014. – 476 с.
2. 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. 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.

6. Сика З. К. Электродинамическая левитация и линейные синхронные двигатели транспортных систем / З. К. Сика, И. И. Куркалов, Б. А. Петров. – Рига: Зинатне, 1988. – 258 с.

7. Байко А. В. Система левитации и тяги на переменном токе / А. В. Байко, В. М. Кочетков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1985. – № 11. – С. 24–31.

8. Байко А. В. Электродинамические характеристики комбинированной системы левитации и тяги на переменном токе в пусковых режимах работы / А. В. Байко, В. М. Стрепетов // Электричество. – 2006. – № 10. – С. 42–46.

9. Байко А. В. Конденсаторный способ пуска ВСНТ с комбинированной системой левитации и тяги на переменном токе / А. В. Байко, А. И. Хожайнов // Электричество. – 1991. – № 4. – С. 30–41.

10. Устройство тяги на переменном токе транспортного средства / Хожайнов А. И., Середа Г. Е., Милютин В. А., Стрепетов В. М. Свидетельство на полезную модель № 11513. Выдано российским агентством по патентам и товарным знакам; заявлено 07.04.1999 г., опубл. в Бюлл. изобр., №10 – 16.10. 1999.

11. Bayko A. V., Strepetov V. M. Estimation of influence of entrance converter of the A.C. levitation and traction combined system of system power supply // Proc. of the 6-th international conference on unconventional electromechanical and electrical system «UEES-04», 24-29 September 2004. Alushta. Ukraine. pp. 805-810.

12. 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.

**Сведения об авторах:**

НИКИТИН Виктор Валерьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Теоретические основы электротехники", Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I"

E-mail: victor-nikitin@nm.ru

СТРЕПЕТОВ Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Теоретические основы электротехники", Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I"

E-mail: strepetov.vm@mail.ru



UDC 621.3.031:629.3.06

**Victor V. Nikitin, Vladimir M. Strepetov**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
(St. Petersburg, Russia)

**VEHICLE ELECTROMAGNETS ENERGY SUPPLY OF A. C. COMBINED  
LEVITATION AND TRACTION SYSTEM**

Date of receipt 24.07.2017

Decision to publish on 26.10.2017

***Abstract:***

**Introduction.** The combined levitation and traction system (CLTS) with alternating current represents a kind of electrodynamic suspension system in which the traction and levitation force are created by one set of onboard electromagnets, and the lifting force is provided at any speeds of the crew, including the zero speed. The disadvantages of the system are the low energy factor and the complexity of controlling the start-brake regimes. The scope of such a system can be passenger transportation within large cities and urban agglomerations for distances up to 100 km with speeds up to 150-200 km / h.

**Goal.** The aim of the work is the solution of the complex problem of providing CLTS onboard electromagnets with electric power with an increased energy factor and the ability to control all driving regimes.

**Method (methodology).** Mathematical modeling of electromagnetic and electromechanical processes with subsequent evaluation of technical and economic parameters of the CLTS were used.

**Results.** A practically realizable version of the power supply system for the on-board electromagnets CLTS is proposed.

**Practical significance.** The proposed version of the power supply system has significant advantages over previously considered ones: the ability to flexibly control all modes of CLTS traffic with an increased energy factor.

**Conclusion.** The system of power supply of the CLTS with alternating current from the traction network of constant voltage 3 ... 5 kV with placement of autonomous inverters onboard the crew allows to reduce the mass of the on-board electrical equipment by 10-20%, to minimize the consumption of inactive power and to flexibly control all modes of the crew's movement.

**Key words:** combined levitation and traction system, power supply system, starting and braking regimes, semiconductor converters.

## **Introduction**

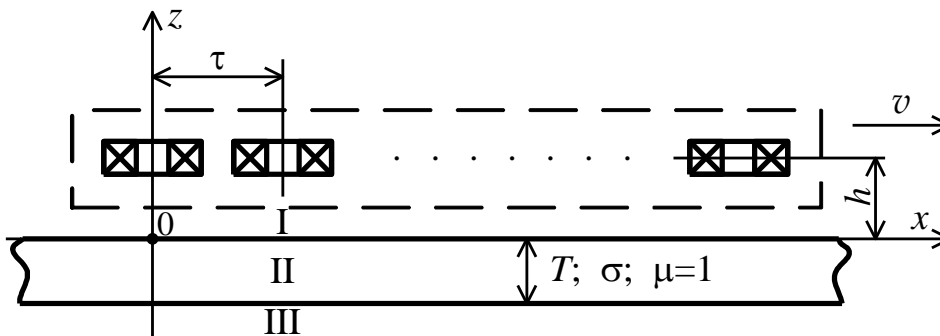
At present, interest in development and creation of magnetic levitation transport systems of different functions [1 – 5] is being revived. This interest is caused by a tendency to increase technical and economic, ecological features of transport systems. One of the sustainable tendencies consists in design of combined systems in which electromagnetic forces in different coordinate axes directions are generated by one source of magnetic field.

The combined levitation and traction system (CLTS) with alternating current represents a type of electromagnetic suspension system in which traction and lifting forces are created by virtue of one set of onboard electromagnets, powered by alternating current (pic. 1). The crew car of CLTS is equipped with  $N$  single-type magnets, powered by single-phase alternating current, where magnetomotive force (MF) initially follows the condition:

$$wI_m(t) = \sqrt{2} wI_0 \cos[\Omega t + \pi(m - 1)], \quad m = 1, \dots, N.$$

where  $wI_0$  – acting figure of MF of onboard electromagnet;

$\Omega$  – angular frequency of the power of electromagnets.



Pic. 1.

The combined levitation and traction system (CLTS) with alternating current.

I, III – non-conductive non-magnetic areas, II – area of non-magnetic conductive guidance,  $T$  – thickness of guidance,  $h$  – height of car suspension.

Under this condition, the onboard electromagnetic system is an alternating-pole magnetic system, which makes it possible for the lifting force  $F_z$  to be generated at any speed  $V$ , including zero speed. This favourably distinguishes this system from the conventional electrodynamic suspension with the permanent MF, in which, as it is known [6], lifting force occurs at minimum speeds of  $v=80\dots100$  km/h. Furthermore, CLTS preserves such important advantages of electrodynamic suspension systems as a large suspension height (100 - 150 mm), which is crucial in harsh climate conditions, and the natural vertical stability of the crew. Researches have shown that it would be most advisable to apply CLTS in urban passenger transportation and within urban agglomerations for relatively short distances of 70-100 km, with speeds of 150-200 km/h.

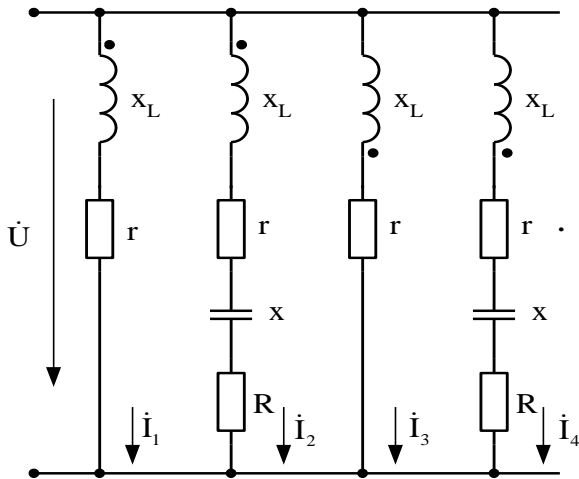
The disadvantages of CLTS, which is powered by single-phase alternating current, are the lack of starting force  $F_x|_{v=0} = 0$ , low power coefficient, as well as the necessity of deep cooling of onboard electromagnets [7, 8].

### Ways of Producing Starting Force in CLTS

In order to produce starting (or braking) force of CLTS, it is necessary to ensure a space-time shift of MF of onboard electromagnets, which will enable creating a direct (reverse) travelling wave of magnetic field for the period of

acceleration (or braking). One of the options of technical solution of this problem is a capacitor start of CLTS [9, 10]. The option is based upon onboard electromagnet windings' connecting to one of alternating-pole systems of active-capacitive elements (pic. 2) in a way that their MF is determined by correlation

$$wI_m(t) = \sqrt{2} wI_0 \cos \left[ \Omega t + \frac{\pi}{2} (m - 1) \right], \quad m = 1, \dots, N.$$



Pic. 2.

Connection of starting active-capacitive elements in capacitor start of CLTS option.

Yet studies have shown insufficient energy efficiency of the proposed option: starting active-capacitive elements will face significant loss of power. Besides, there will also be increase of weight and dimension parameters of onboard equipment.

A more profitable technical solution is application of onboard semiconductor converter [11, 12], which enables not only to minimise loss of power in start-and-brake modes, but also to minimise or totally

exclude the consumption of reactive power in electric traction network.

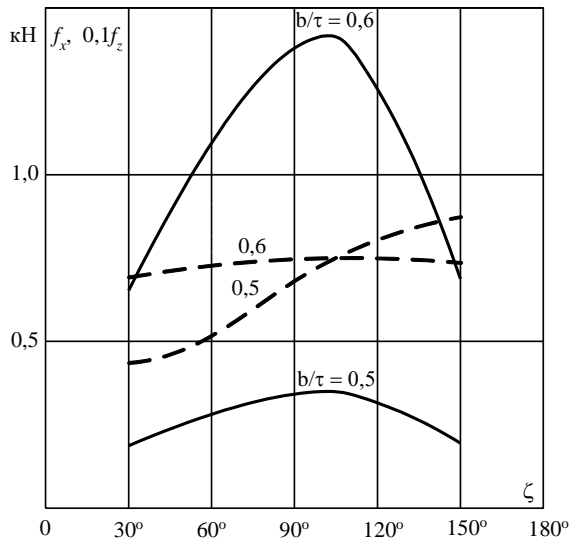
Besides, in case onboard electromagnets are powered by semiconductor converter, the possibility of ensuring a travelling magnetic wave arises, making it feasible to improve properties of transport with CLTS.

In this case, the alteration of MF of onboard electromagnets in time follows the condition:

$$wI_m(t) = \sqrt{2} wI_0 \cos[\Omega t + \zeta(m - 1)], \quad m = 1, \dots, N.$$

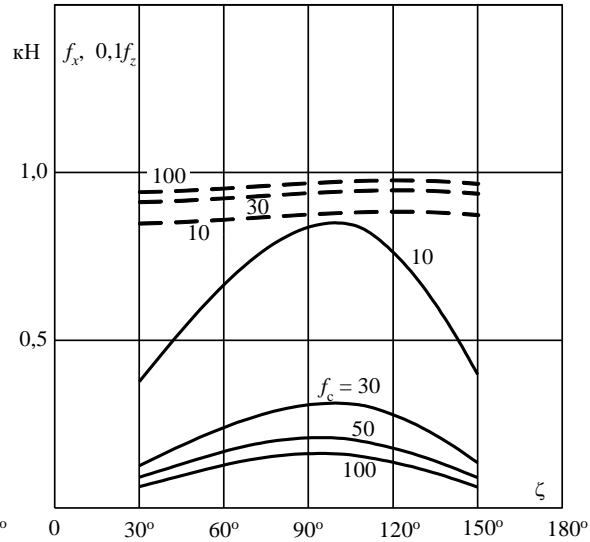
where  $\zeta$  – phase shift between MF neighbouring electromagnets.

It should be noted that  $\zeta=\pi$  determines the initial stationary mode of CLTS motion, and  $\zeta=\pi/2$  corresponds to the capacitor start mode of CLTS. Practical interest is represented by dependence of specific (those falling on one electromagnet) forces of traction  $f_x$  and levitation  $f_z$  on the angle  $\zeta$  at different frequencies  $f_c$  of supply voltage. Such dependences may be seen in pictures 3 and 4 for the following basic parameters of transport with CLTS: MF of onboard electromagnet  $wI_0=5 \cdot 10^4$  A; specific resistance of the guidance  $1/\sigma=3,2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м; thickness of the guidance is  $T=0,02$  м; the ratio of half a thickness of electromagnet to the distance between the centres of neighbouring electromagnets  $a/\tau=0,6$ . The ratio of half of the thickness of electromagnet to the distance between the centres of neighbouring electromagnets is marked by  $b/\tau$ .



Pic.3.

Dependence of specific forces of traction (solid lines) and levitation (dashed lines) on control angle  $\zeta$  at frequency of  $f_c=5$  Hz of different figures of parameter  $b/\tau$ .



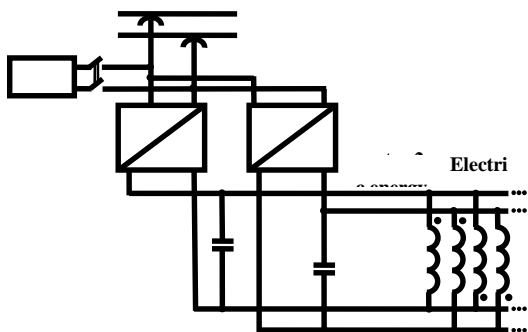
Pic. 4.

Dependence of specific forces of traction (solid lines) and levitation (dashed lines) on control angle  $\zeta$  at different frequencies of supply  $f_c$  and  $b/\tau=0,6$ .

### Systems of Supply of Onboard Electromagnets of CLTS

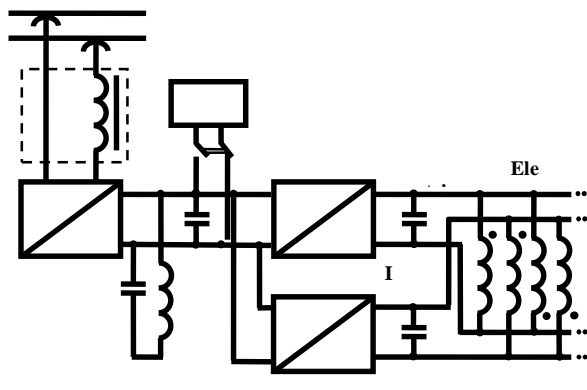
In order to provide security and satisfying operation properties of transport with CLTS, the system of supply of onboard electromagnets should meet a number of common requirements: uninterrupted power supply, smoothness of speed control, traction and braking force, minimum deviation of current waveform of onboard electromagnets, minimum harmonic motion content in the traction network current, high energy efficiency.

Deployment of static converters of energy on the crew car of CLTS is characterised by a range of advantages in comparison with a stationary deployment of converters: it ensures flexible and independent operation of crew cars, making it easier to control traffic volume during changes of passenger traffic, it results in converter aggregates of traction substation becoming more simplified and cheaper, onboard converters ensure the possibility of operation of all modes of traffic – start, movement and braking. The two options of power supply of onboard electromagnets are considered: power supply from a direct current network  $U_c = 3-5$  kV and an alternating current network of the same level. Since the speeds being realised are relatively low (up to 150-200 km/h), there is an intention to use a movable current collector from a third rail. The schemes of the both options are represented in the pictures 5 and 6.



Pic. 5.

System of power supply of onboard electromagnets from a direct current network



Pic. 6.

System of power supply of onboard electromagnets of CLTS from an alternating current network

Pre-estimates made by the authors [12] have shown that for traffic routes up to 100 km with speeds up to 150-200 km/h, these requirements are most closely (given the minimum weight and dimensions of the onboard equipment) met by the system of power of transport with CLTS as a traction network of direct current and two onboard autonomous inverters in crew car. One of the inverters powers onboard electromagnets with odd numbers, forming an alternating pole system, the other – that with even numbers. This allows providing a required angle of shift  $\zeta$  between waves of MF of onboard electromagnets in starting, moving (action) and electric braking modes. Such type of power supply of onboard electromagnets of CLTS ensures flexible, independent control of crew cars and, if needed, facilitates control of traffic volume. Having a DC link (traction network) in the electric power supply system minimises consumption of inactive power and reduces loss of power in traction network. Moreover, lower energy conversion rates are provided, as well as smaller weight and dimension properties of onboard equipment. The conditions of application of onboard uninterruptible power supply (UPS) are simplified, which ensures uninterruptible power supply of traction and levitation electromagnets in case of failure of current collector of stationary traction network.

### Conclusion

Implementation of static converters into the structure of onboard electromagnets power supply system of CLTS will allow to flexibly operate traffic of crew car on the set route in starting, action and braking modes. System of power supply with static converters will ensure reduce of onboard equipment weight by 10-20 per cent compared to the system with a capacitor start. It is most expeditious to use power supply of electromagnets of direct current network of 3-5 kV with

two onboard autonomous inverters with a controlled value, frequency and starting phase of basic harmonic output voltage.

## References

1. Antonov Yu. F. & Zaitsev A. A. Magnitolevitatsionnaya transportnaya tehnologia [Magnetic Levitation Transport Technology]. Moscow, 2014. 476 p.
2. Antonov Yu. F. & Zaitsev A. A. Magnitolevitatsionnyi transport: nauchnye problemy i technicheskie reshenia [Magnetic Levitation Transport: scientific problems and technical decisions]. 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., Zaitsev A. A., Korchagin A. D. & Yudkin V. F. Magnitolevitatsionnaya tehnologia kak transportnaya strategiya gruzovykh i passaghirskikh perevozok (Magnetic levitation technology as transport strategy for freight and passenger transportation) *Magnitolevitatsionnye transportnye systemy i tehnologii: trudy II mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Proc. 2nd Int. Scientific Conf. "Magnetic Levitation Transport Systems and Technologies"]. St. Petersburg, 2014, pp. 22-49.
6. Sika Z. K., Kurkalov I. I. & Petrov B. A. Elektrodinamicheskaya levitatsia i lineinye sinchronnye dvigateli transportnykh sistem [Electrodynamic levitation and linear synchronous motors of transport systems]. Riga, 1988. 258 p.
7. Baiko A. V. & Kochetkov V. M. Izvestia vysshikh uchebnykh zavedenii. Electromekhanika – News of higher educational institutions. Electromechanics, 1985, No 11, pp. 24-31.
8. Baiko A. V. & Strepetov V. M. *Elektrichestvo – Electricity*, 2006, no. 10, pp. 42-46.
9. Baiko A. V. & Khozhainov A. I. *Elektrichestvo – Electricity*, 1991, no. 4, pp. 30-41.
10. Khozhainov A. I., Sereda G. E., Milutin V. A. & Strepetov V. M. Traction Unit with Alternating Current for Transport System. Certificate of utility model No. 11513. Declared 07.04.1999, published in Bulletin of inventions, no. 10, 16.10.1999.
11. Bayko A. V. & Strepetov V. M. Estimation of influence of entrance converter of the A.C. levitation and traction combined system of system power supply. Proc. of the 6-th international conference on unconventional electromechanical and electrical system «UEES-04», 24-29 September 2004. Alushta. Ukraine. pp. 805-810.

12. Nikitin V. V., Strepetov V. M. & Voluvach A. S. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – News of higher educational institutions. The problems of Power Engineering*, 2010, no. 3-4, pp. 54-62.

**Information about authors:**

Victor V. NIKITIN, Dr. Sc. (Tech), associate professor, professor of Theoretical fundamentals of electrical engineering department of Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

E-mail: victor-nikitin@nm.ru

Vladimir M. STREPETOV, Cand. Sc. (Tech), associate professor, associate professor of Theoretical fundamentals of electrical engineering department of Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

E-mail: strepetov.vm@mail.ru

УДК 656.21

**В. В. Костенко, Н. С. Белых, М. В. Четчуев, А. С. Шепель, В. П. Федоров**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
(Санкт-Петербург, Россия)

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ГРУЗОВОГО МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТЕРМИНАЛА**

Дата поступления 01.06.2017

Решение о публикации 26.10.2017

**Аннотация:** На основании схем грузовых магнитолевитационных станций, разработанных специалистами кафедры «Железнодорожные станции и узлы» ПГУПС, и технологии транспортировки грузов на дискретно-непрерывных принципах создана модель, позволяющая производить динамические эксперименты для определения существенных параметров проектирования и показателей работы магнитолевитационных терминалов.

**Цель:** Определение зависимостей основных эксплуатационных параметров грузовых терминалов, необходимых для их проектирования и выбор рациональной производительности основных элементов и устройств.

**Метод:** Для решения этой задачи предлагается использовать метод имитационного моделирования, по средствам программного комплекса AnyLogic.

**Результаты:** Разработан технологический алгоритм грузовой станции, на основании которого в программной среде AnyLogic российской компании The AnyLogic Company, построена имитационная модель и получены необходимые отчётные данные – потребное количество и производительность погрузочно-выгрузочного оборудования, годовой грузооборот терминала, среднее время нахождения платформ на станции и непроизводительные простои магнитолевитационных платформ.

**Практическая значимость:** Верификация модели показала, что предложенный метод имитационного моделирования позволяет определить и обосновать искомые параметры грузовых терминалов магнитолевитационных линий, что обеспечит рациональное расходование средств на их строительство и требуемую перерабатывающую способность.

**Ключевые слова:** магнитная левитация, грузовые терминалы, магнитолевитационная транспортная система, имитационное моделирование, AnyLogic.

### **Введение**

В современном мире задачам в области магнитной левитации уделяется повышенное внимание, что определяется преимуществами этого инновационного вида транспорта. Основными из них являются отсутствие прямого механического взаимодействия подвижного состава с путевой структурой, высокие скорости движения, экологичность.



По информации центра инновационного развития ОАО «РЖД», к 2030г. компания может создать собственный поезд на основе магнитной левитации. В настоящее время в России активно изучается возможность строительства дороги с использованием магнитной левитации, так например, сотрудниками института экономического развития ОАО «РЖД» совместно с коллегами из Петербургского университета путей сообщения и ПАО «Ленгипротранс» разрабатывается возможный маршрут транспортной линии на основе магнитной левитации Усть-Луга – Белый Раст [1], протяженностью 720 км. Аналогичный проект существует и для порта Бронка со строительством магнитолевитационной линии между терминалом Бронка и Гатчиной [1].

В системе магнитолевитационного транспорта устанавливается тенденция специализации линий по роду движения на грузовое и пассажирское [2, 3, 4], при этом для грузовых перевозок наиболее перспективным является контейнерное магнитолевитационное сообщение. Для этого рода сообщений линии должны иметь в обоих концах терминалы, которые будут выполнять начально-конечные грузовые операции, а также заниматься текущим обслуживанием и ремонтом подвижного состава.

## **1. Принципы имитационного моделирования магнитолевитационного терминала**

При большой поточности транспортировки на линиях магнитолевитационного транспорта [5, 6], станции расположенные на таких линиях должны обладать соответствующей перерабатывающей способностью. Поэтому организация транспортировки грузов в контейнерных магнитолевитационных транспортных системах (МЛТС) будет происходить по принципам, которые должны иметь промежуточное положение между рельсовыми системами с дискретным движением объединенных в поезда транспортных единиц и системами постоянного перемещения грузов, такими как, конвейерами, трубопроводами, канатными дорогами и т.п. Таким образом, контейнерные МЛТС являются дискретно-непрерывными, что должно принято к сведению при разработке принципиальных схем объектов инфраструктуры и их технологии.

Для того чтобы построить первые линии, использующие магнитную левитацию, необходимо решить ряд технических и организационных вопросов, которые позволят организовать технологический процесс. При решении поставленных задач использовался наиболее подходящий метод расчета транспортных систем в данном случае – имитационное моделирование (ИМ) [7-11].

Применение ИМ обусловлено следующими преимуществами:

- Имитационные модели позволяют найти решение задачи, когда аналитическое моделирование и линейное программирование не способно на это;
- Структура имитационной модели естественным образом отображает структуру моделируемой системы;
- Имитационные модели позволяет отслеживать все объекты системы, учтенные в выбранном уровне абстракции;
- Возможно визуализировать модельный эксперимент во времени.

Существует три подхода к ИМ: системная динамика, дискретно-событийное и агентное моделирование. Каждый метод применяется в некотором диапазоне уровней абстракции. Системная динамика предполагает очень высокий уровень абстракции и используется для стратегического моделирования. Дискретно-событийное моделирование поддерживает средний и низкий уровни абстракции. Между ними находятся агентные модели, которые могут быть как очень детализированными, когда агенты представляют физические объекты, так и предельно абстрактными, когда с помощью агентов моделируются конкурирующие компании или правительства государств.

Для моделирования магнитолевитационного терминала использовался агентный и дискретно-событийный подходы, которые часто используются в моделировании транспортных систем. Например, каждая платформа, прибывающая в терминал, является агентом со своим набором индивидуальных характеристик (наличие/отсутствие неисправности, номер позиции выгрузки/погрузки и др.). Процесс передвижения платформ по терминалу задан дискретно-событийными элементами (рис. 1): Move To (движение до определенной точки), Delay (остановка/ожидание), Queue (очередь) и т.д.

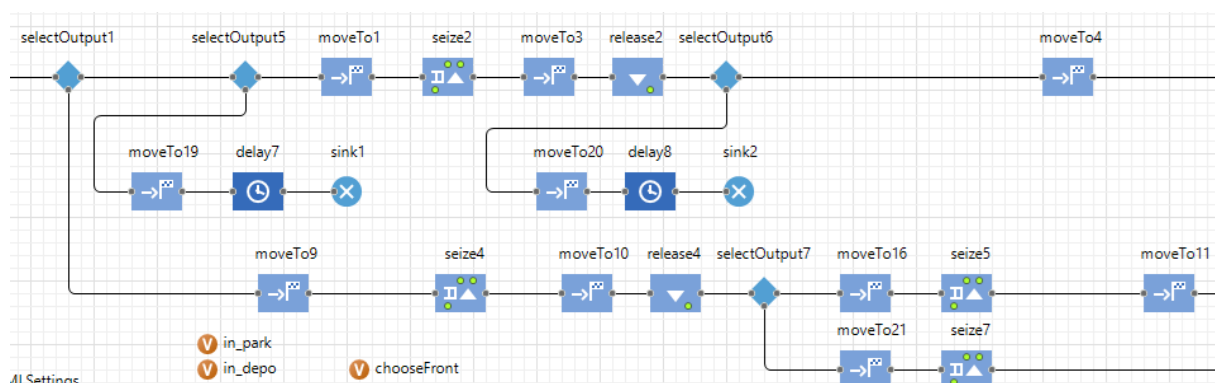


Рис. 1. Участок логики с дискретно-событийными элементами

Создать такую достаточно сложную модель как магнитолевитационный терминал с помощью готовых элементов логики и соединением их друг с другом невозможно, поэтому для описания многих деталей процесса должен использоваться язык программирования Java. В частности, были созданы функции и переменные, а дополнительные элементы логики сопровождаются программным кодом.

## 2. Технология работы терминала магнитолевитационной линии

На *рисунке 2* представлена принципиальная схема терминала оборота магнитолевитационных платформ, перевозящих контейнеры. Общий вариант технологии работы терминала без рассмотрения буферных зон (депо терминала и путей отстоя) заключается в трех этапах:

1. Вход заявки в систему. По прибытию платформы проходят техническое обслуживание (ТО);
2. Обработка заявки. Платформы движутся на выгрузку, где порталные краны передают контейнер погрузчикам; затем происходит передвижение на погрузочные позиции и погрузка;
3. Выход заявки из системы. В заключении платформы проходят ТО повторно перед отправлением на магистраль. Передвижение между путями осуществляется за счет трансбордеров, которые перемещают подвижной состав между параллельными путями. Так же на схеме присутствуют пути отстоя для платформ, ожидающих погрузки и депо для их ремонта.

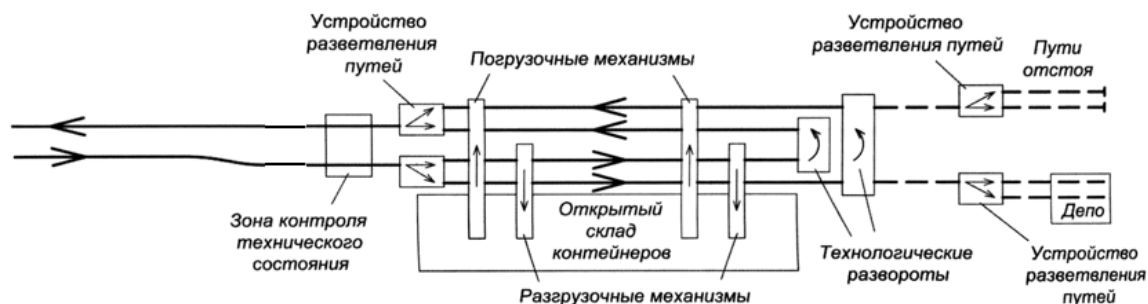


Рис. 2. Схема грузового магнитолевитационного терминала

## 3. Результаты модельных экспериментов

Данная схема была перенесена в «мир моделей», по средствам программы AnyLogic [12]. Для моделирования этого объекта использовался агентный и дискретно-событийный подходы, которые подходят для моделирования транспортных систем. В модели присутствуют 2D, 3D (рис. 3) окна, а также окно сбора статистики (рис. 4).

Статистика зависит от тех параметров, которые исследователь задает перед запуском эксперимента, а именно:

- интервал поступления платформ на станцию с учётом его колебаний;
- интенсивность поступления контейнеров на терминал, подлежащих погрузке на платформы;
- количество погрузо-разгрузочных механизмов и их производительность;
- время на каждую элементарную операцию (передвижка с пути на путь, время на контроль технического состояния и т.п.).

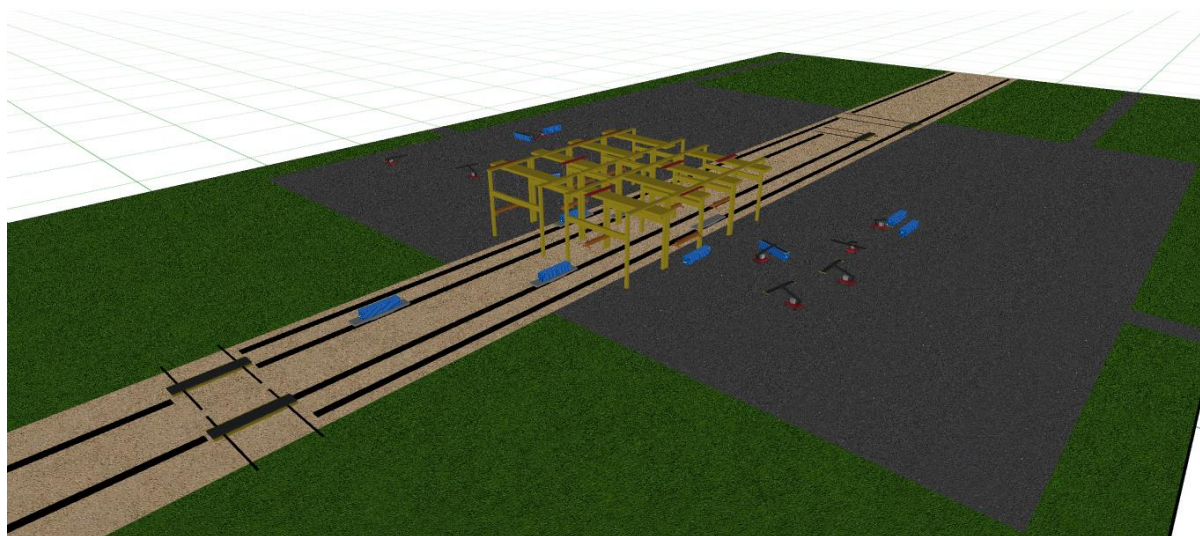


Рис. 3. 3D окно

При динамической верификации модели (пример на *рис. 4*) были определены исходные параметры для функционирования магнитолевитационного терминала:

- время технического обслуживания – 1 минута;
- среднее время погрузки/выгрузки – 3 минуты;
- время движений трансбордера – от 1 до 2 минут (в зависимости от ширины междупутья);
- интервал прибытия платформ – 2,6 минуты;
- среднее время занятия ричстакера одним контейнером – 5 минут.

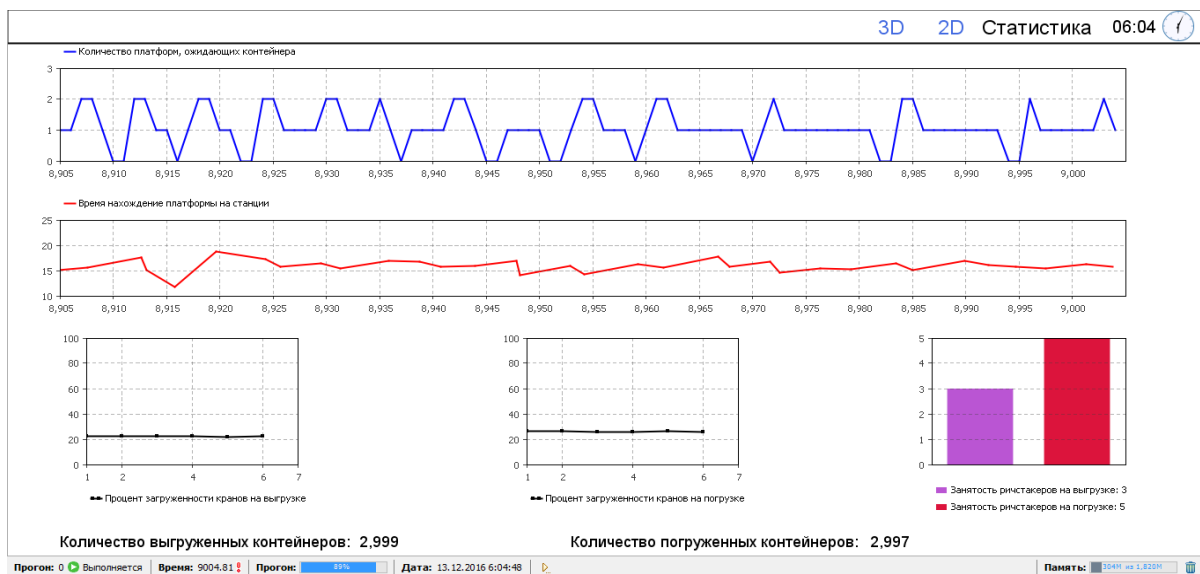


Рис. 4. Окно сбора статистики

При моделировании таких исходных данных получились следующие результаты:

- загруженность порталных кранов: на выгрузке – 34%, на погрузке – 39%;
- потребное количество погрузчиков: на выгрузке – 5 шт., на погрузке – 6 шт.;
- грузооборот за год – 371760 TEU;
- максимальное количество платформ, ожидающих погрузки – 3 шт.;
- среднее время нахождения каждой платформы на станции – 20 минут.

### Заключение

Используя полученную модель магнитолевитационного терминала, можно оптимизировать следующие данные для дальнейшего проектирования:

- число параллельно работающих погрузочных и выгрузочных линий;
- потребное количество погрузочно-разгрузочных механизмов при заданной производительности;
- перерабатывающую способность терминала;
- производительный и непроизводительный простой магнитолевитационных платформ;
- потребный парк магнитолевитационных платформ на линии.

## Библиографический список

1. Иголкин Г. В. Оптимизация параметров пролетного строения под магнитолевитационный транспорт, предназначенный для контейнерных перевозок / Г. В. Иголкин, И. О. Потапов // Сборник трудов LXXVI юбил. Всерос. науч.-технич. конф. «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы». – С-Пб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 403 с.
2. Зайцев А. А. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе магнитной левитации / А. А. Зайцев, Ю. Ф. Антонов // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии: труды 2-й Междунар. научн. конф., Санкт-Петербург, 17–20 июня 2014. – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 11–23.
3. Rose C. R., Peterson D. E., Leung E. M. «Implementation of Cargo MagLev in the United States». – URL: [http://www.researchgate.net/publication/228994479\\_Implementation\\_of\\_cargo\\_MagLev\\_in\\_the\\_United\\_States](http://www.researchgate.net/publication/228994479_Implementation_of_cargo_MagLev_in_the_United_States) (25.05.2017)
4. Костенко В. В. Сравнительная характеристика высокоскоростных пассажирских наземных линий на основе системы «колесо-рельс» и «магнитный подвес» / В. В. Костенко, М. В. Четчуев, В. П. Федоров // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии: труды 1-й Междунар. научн. конф., Санкт-Петербург, 29-31 октября 2013. – СПб: ООО PUDRA, 2013. – С. 95–98.
5. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев; под ред. В. А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
6. Зайцев А. А. Магнитолевитационные транспортные системы и технологии / А. А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73.
7. Шепель А. С. Определение зависимостей между параметрами станционных горловин / А. С. Шепель // Сборник трудов LXXVI юбил. Всерос. науч.-технич. конф. «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы». – СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2015. – С. 245–251.
8. Моделирование работы транспортных систем: инструкция пользователя / Ю. А. Бобров, В. А. Лосева. – СПб.: ОАО «Ленгипротранс», 2008. – 45 с.
9. Войцеховская В. Программные комплексы, разработанные специалистами ОАО «Ленгипротранс» / В. Войцеховская, Ю. Бобров // Транспорт Российской Федерации. – СПб.: Т-ПРЕССА, 2009. – № Прил. – С. 58–59
10. Козлов П. Оценка инфраструктурных транспортных проектов методом моделирования / П. Козлов, А. Александров // Транспорт Российской Федерации. – СПб.: Т-ПРЕССА, 2006. – №5. – С. 43–44.

11. Расчет железнодорожных станций и узлов с помощью имитационной системы ИСТРА. – URL <http://www.trans-expert.net/istra.htm> (22.05.2017).

12. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. – 496с.

**Сведения об авторах:**

ЧЕТЧУЕВ Максим Владимирович, к.т.н., доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, E-mail: maxetion@mail.ru

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

БЕЛЫХ Никита Сергеевич, студент факультета «Управление перевозками и логистика», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, E-mail: aktikin\_be@icloud.com

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

ШЕПЕЛЬ Александр Сергеевич, ассистент кафедры «Железнодорожные станции и узлы», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, E-mail: alexandr.wm@yandex.ru

**V. V. Kostenko, N. S. Belykh, M. V. Chetchuev, A. S. Shepel, V. P. Fedorov**  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
DEVELOPMENT OF MODEL OF FREIGHT MAGNETIC LEVITATION  
TERMINAL

Date of receipt 01.06.2017

Decision to publish on 26.10.2017

**Abstract:** On the basis of schemes of cargo magnetic levitation stations, developed by the specialists of the Department of "Railway stations and junctions" of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, and the technology to transport goods over discrete-continuous principles created a model that allows to perform dynamic experiments to identify significant design parameters and performance of magnetic levitation terminals.

**Goal:** To identify dependencies of key operating parameters of freight terminals required for their design and choice of rational performance of basic elements and devices.

**Method:** In order to solve this problem, it is proposed to use a simulation method by means of a programme AnyLogic.

**Results:** The technological algorithm of a freight station was developed, on the basis of which in the software environment of AnyLogic of the Russian company "the AnyLogic Company" the simulation model was built, and necessary report data were obtained – the required number and capacity of loading and unloading equipment, annual turnover of terminal, the average time spent on the platforms at the station and unproductive downtime of magnetic levitation platforms.

**Practical importance:** The model verification has shown that the proposed simulation method allows to determine and justify the required parameters of the freight terminal of magnetic levitation lines, which will ensure rational spending of the funds for their construction and required processing ability.

**Keywords:** magnetic levitation, freight station, magnetic levitation transport system, imitation simulation, AnyLogic.

## **Introduction**

In the today's world, the magnetic levitation issues are given increased attention, which is determined by benefits of this cutting-edge mode of transport. The core benefit consists in the absence of direct mechanical contact between rolling stock and the track structure, high traffic speeds and sustainability.

According to the JSC "RZD" Centre for Innovative Development, by 2030 the holding may construct its own magnetic levitation technology-based train. At present, Russia is arduously studying the possibility of construction of magnetic levitation railway. Thus, the representatives of RZD's Institute of Economy and Transport Development together with their colleagues from Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University and PJSC "Lengiprotrans" are now working out possible route of magnetic levitation transport line Ust-Luga – Bely



Rast [1], with the length of 720 km. The same project is considered for the port Bronka with the projected maglev line between Bronka terminal and Gatchina [1].

In the system of maglev transport, there grows a tendency to divide lines, in accordance with the type of the subject transported, into freight and passenger ones [2, 3, 4], whereby the most promising for freight transportation is container maglev transport. For this kind of transportation the lines should have terminals on their both ends, which will perform initial and final freight operations as well as provide technical maintenance and repair of rolling stock.

## **1. Principles of Imitation Simulation of Magnetic Levitation Terminal**

Dealing with a heavy transportation flow on maglev lines [5, 6] the stations on these lines should have a required processing capacity. Therefore, the organisation of goods transportation in container maglev transport systems (MLTS) will be done accordance with the principles which should have intermediate position between rail systems with discrete traffic of transport units (trains) and the system of constant freight transportation, such as conveyors, pipelines, ropeways, etc. Thus, container MLTS are of discrete and uninterruptable type, which is to be taken into account while developing schemes of infrastructure objects and their technologies.

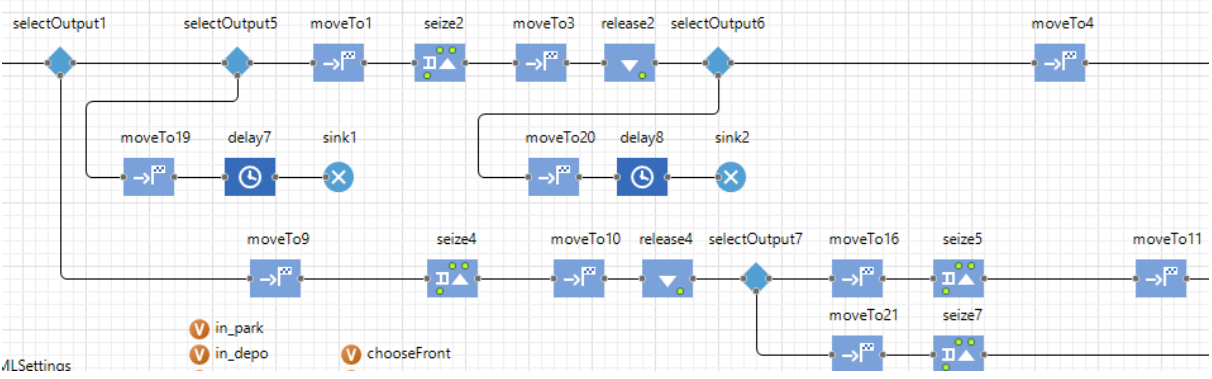
In order to build first lines using magnetic levitation, a number of technical and organisational issues should be settled, which will enable us to organise technological process. While solving the set tasks, the most suitable in this case method of calculation of transport systems was used – the imitation simulation (IS) [7-11].

The application of the IS is justified by the following advantages:

- Imitation models enable us to find the solution of a task when analytical simulation and linear programming are incapable of it;
- Structure of the imitation model naturally reflects the structure of the simulated system;
- Imitation models enable us to track all objects of the system taken into account in the selected level of abstraction;
- Possibility of visualisation of a model experiment in the time.

There three approaches to the IS: system dynamics, discrete-event and agent-based simulations. Each of the methods is applied in a range of abstraction levels. System dynamics predisposes a very high level of abstraction and is used for strategic simulation. Discrete-event supports a medium and a low level of abstraction. Between them, there are agent-based models, which may be both highly detailed, when the agents represent physical objects, and maximally abstract, when by virtue of agents competing companies or governments are simulated.

For simulation of a maglev terminal the agent-based and discrete-event approaches were used, which are frequently used in transport systems simulations. For example, every platform arriving in a terminal is considered a agent possessing its own range of characteristics (presence/absence of failures, number of position of unloading/loading, and others). The process of moving platforms along the terminal is specified by discrete-event elements (pic. 1): Move to (moving to the determined point), Delay (stop/waiting), Queue (line) and others.



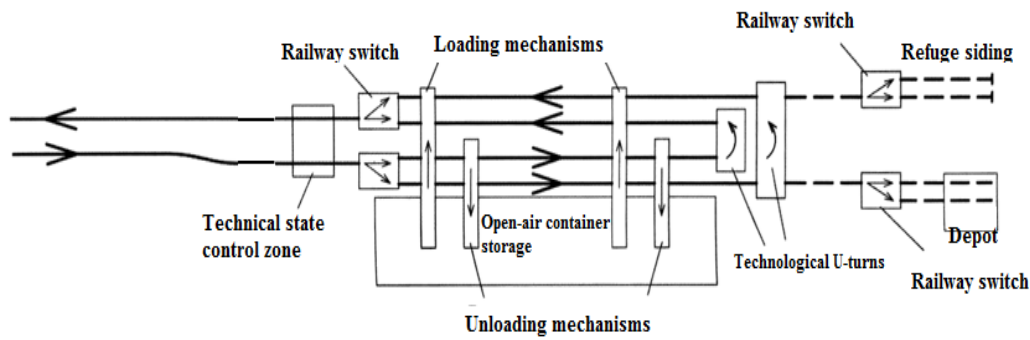
Pic. 1. Section of logics with discrete-event elements

To create such a sophisticated model as a maglev terminal by virtue of prepared elements of logics and connecting them to each other is impossible, therefore for description of many details of the process the programming language Java should be used. In particular, functions and variables were set, whereas additional elements of logics are followed by a programme code.

**2. Technology of Operation of Maglev Terminal Line**

The picture 2 shows scheme of terminal processing of maglev platforms carrying containers. Common variant of the technology of terminal performance without considering buffer zones (terminal depots and refuge siding) consists of three stages:

- Entrance of the request into the system. On arrival, platforms undergo technical maintenance (TM);
- Processing of the request. Platforms are moved to the unloading site, where port cranes carry the container to a loader; then comes transportation to the loading site, and finally loading process;
- Request output. In the end, platforms again undergo TM before being sent to the line. Transportation between the lines is carried out by means of traverser, which moves rolling stock between parallel lines. In a scheme there are also refuge sidings for platforms waiting to be loaded, and depots for repair.



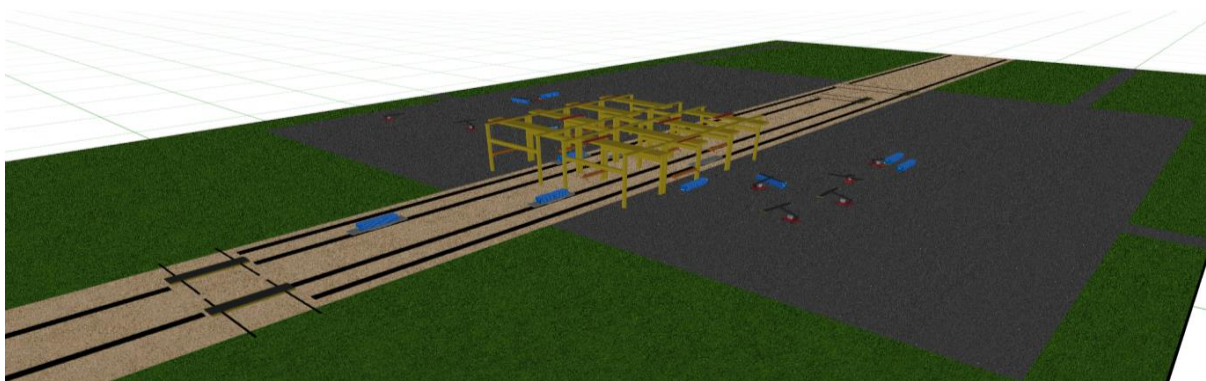
Pic. 2. Scheme showing freight maglev terminal

### 3. Results of Model Experiments

The scheme was taken into “the world of models” by means of the programme AnyLogic [12]. For simulation of this object, the agent-based and discrete-event approaches were used, which are suitable for simulation of transport systems. In the model, there are 2D and 3D windows (pic. 3) and also a window for collection of statistics (pic. 4).

The statistics depends upon those parameters which are set by a researcher before starting the experiment, namely:

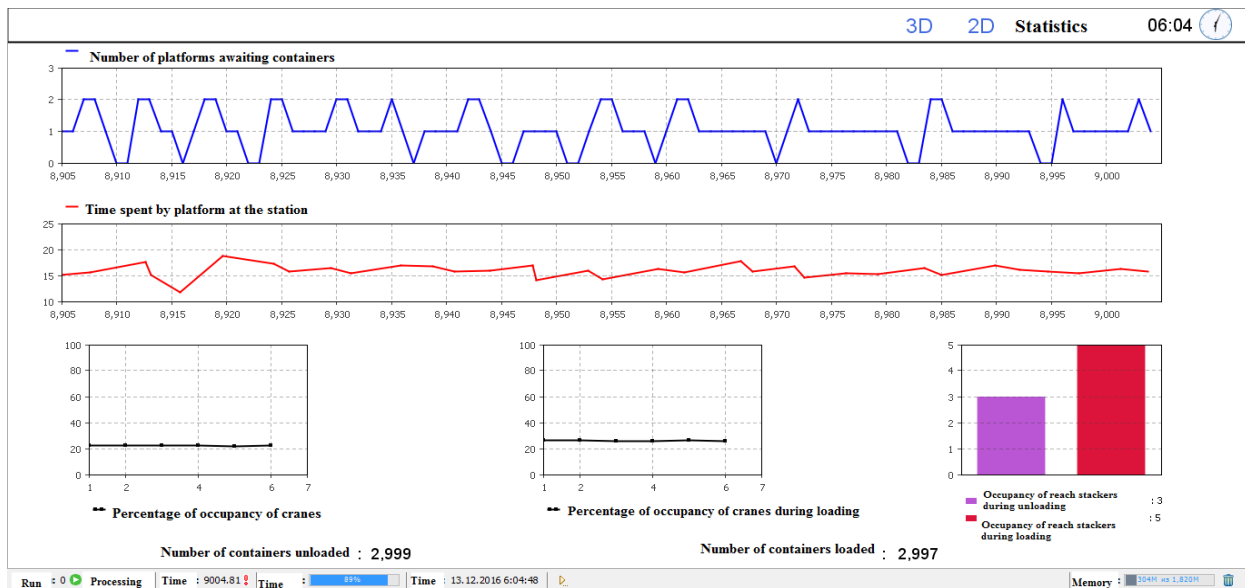
- interval of arrival of the platforms at the station, taking into account its fluctuation;
- intensity of arrival of containers at the terminal with their further loading onto platforms;
- number of loading and unloading mechanisms and their capacity;
- time spent for each single operation (moving from one line onto another, time for control of technical state, and others).



Pic. 3. 3D window

During dynamic verification of the model (example in pic. 4) source parameters for maglev terminal functioning were defined:

- time of technical maintenance – 1 minute;
- average time for loading/unloading – 3 minutes;
- time spent for traverser – from 1 to 2 minutes (depending on the width of the intertrack space);
- platform arrival interval – 2.6 minutes;
- average time spent for one container by a reach stacker – 5 minutes.



Pic. 4. Window for collection of statistics

Simulation of these data resulted in the following:

- load of port cranes: 34 per cent at unloading, 39 per cent at loading;
- necessary number of loaders: 5 at unloading, 6 at loading;
- cargo turnover per year – 371760 TEU;
- maximum number of platforms waiting to be loaded – 3;
- average time spent by each platform at the station – 20 minutes.

## Conclusion

Using the acquired model of the maglev terminal we may optimise the following data for further design:

- number of simultaneously working loading/unloading lines;
- necessary number of loading/unloading mechanisms at a given capacity;
- processing capacity of the terminal;
- production and non-production downtime of maglev platforms;
- required yard of maglev platforms on the line;

## References

1. Igolkin G. V. & Potapov O. I. Optimizaciya parametrov proleznogo stroeniya pod magnitolevitacionnyj transport, prednaznachennyj dlya kontejnernih perevozok [Optimization of the parameters of the span structure for magneto-levitation transport intended for container transportations]. *Sbornik trudov LXXVI yubil. Vseros. nauch.-tekhnich. konf. "Transport: problemy, idei, perspektivy"* (Proceedings of works LXXVI Vseros. scientific-technical. Conf. "Transport: problems, ideas, prospects"). St. Petersburg, 2016. 403 p.
2. Zaitsev A. A. & Antonov F. Y. Kontejnernyj most Sankt-Peterburg – Moskva na osnove magnitnoj levitacii [Container bridge St. Petersburg - Moscow based on magnetic levitation]. *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Scientific Conference "Magneto-Levitational Transport Systems and Technologies"). St. Petersburg, 2014, pp. 11–23.
3. Rose C. R., Peterson D. E. & Leung E. M. "Implementation of Cargo MagLev in the United States". URL: [http://www.researchgate.net/publication/228994479\\_Implementation\\_of\\_cargo\\_MagLev\\_in\\_the\\_United\\_States](http://www.researchgate.net/publication/228994479_Implementation_of_cargo_MagLev_in_the_United_States). (25/05/2017)
4. Kostenko V. V., Chechev M. V. & Fedorov V. P. Sravnitel'naya harakteristika vysokoskorostnyh passazhirskih nazemnyh linij na osnove sistemy "koleso-rel's" i "magnitnyj podves" [Comparative characteristics of high-speed passenger land lines based on the system "wheel-rail" and "magnetic suspension"]. *Trudy 1-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Scientific Conference "Magneto-Levitational Transport Systems and Technologies"). St. Petersburg, 2013, pp. 95–98.
5. Antonov Yu. F. & Zaitsev A. A. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magnetic levitation transport technology]. Moscow, 2014. 476 p.
6. Zaitsev A. A. *Zheleznodorozhnyj transport - Railway transport*, 2014, vol. 5, pp. 69–73.
7. Shepel A. S. Opredelenie zavisimostej mezhdu parametrami stacionnyh gorlovin [Determination of dependencies between the parameters of the station necks]. *Sbornik trudov LXXVI yubil. Vseros. nauch.-tekhnich. konf. "Transport: problemy, idei, perspektivy"* (Proceedings of works LXXVI Vseros. scientific-technical. Conf. "Transport: problems, ideas, prospects"). St. Petersburg, 2015, pp. 245–251.
8. Bobrov Yu. A. & Loseva V. A. *Modelirovanie raboty transportnykh sistem: instruktsiya pol'zovatelya* [Modeling of transport systems: user guide]. St. Petersburg, 2008. 45 p.
9. Voitsekhovskaya V. & Bobrov Yu. *Transport Rossiyskoi Federatsii - Transport of the Russian Federation*. St. Petersburg, 2009, pp. 58–59.

10. Kozlov P. & Aleksandrov A. *Transport Rossiyskoi Federatsii - Transport of the Russian Federation*. St. Petersburg, 2006, vol. 5, pp. 58–59.

11. Raschet zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov s pomoshch'yu imitatsionnoi sistemy ISTRА [Calculation of railway stations and junctions by using a simulation system ISTRА]. URL: <http://www.trans-expert.net/istra.htm> (22/08/2016).

12. Katalevsky D. Y. *Osnovi imitacionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii* [The Fundamentals of simulation and systems analysis in management]. Moscow, 2015. 496 p.

**Information about authors:**

Maksim V. CHETCHUEV, Ph. D. (Tech.), associate professor of the department «Railway stations and junctions», Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, E-mail: maxetion@mail.ru

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

Nikita S. Belykh, student of the faculty «Management of transportation and logistics», Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, E-mail: aktikin\_be@icloud.com

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

Alexander S. SHEPEL, assistant of the department «Railway stations and junctions», Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, E-mail: alexandr.wm @yandex.ru

УДК 656.34

**Е. Ю. Сундуков, С. М. Кочергин, Л. Ф. Селиванов**

Сыктывкарский лесной институт

Филиал ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный

лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

(Сыктывкар, Россия)

## **АРОЧНАЯ ЭСТАКАДА С МАГНИТНЫМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДВЕШИВАНИЕМ МАЛОГАБАРИТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МОДУЛЕЙ**

Дата поступления: 25.07.2017

Решение о публикации: 26.10.2017

**Аннотация:** Предлагаются технологии малогабаритного магнитолевитационного транспорта в эстакадном исполнении.

**Цель работы:** определить возможные варианты использования маглев-технологий на Севере России.

**Методы:** системного анализа, сравнения, аналогии.

**Результат:** рекомендованы к реализации магнитолевитационные эстакадные технологии.

**Практическая значимость работы:** могут быть реализованы транспортные связи от газоперерабатывающих заводов на побережье Обской губы к железнодорожной линии Обская – Бованенково, преодолен разрыв автомобильной магистрали Усинск – Нарьян-Мар, обеспечена защита путепроводов и транспортных средств от повышения уровней водотоков и других природных явлений.

**Заключение:** арочная эстакада может использоваться для перемещения: малогабаритных грузовых и пассажирских транспортных модулей; специальных емкостей (бочек, баллонов, миницистерн и др.) для перевозки жидких углеводородов; автомобилей нормальных габаритов, оборудованных источниками магнитного поля.

**Ключевые слова:** Север России, магнитолевитационные технологии, малогабаритные транспортные системы, арочная эстакада, «езда по потолку»

UDC 656.34

**E. Yu. Sundukov, S. M. Kochergin, L. F. Selivanov**

The Syktyvkar forest institute (branch) of FGBOU VO “The St. Petersburg state forest university of S. M. Kirov”

(Syktyvkar, Russia)

## **APPLICATION OF MAGLEV TECHNOLOGIES IN THE EUROPEAN NORTHEAST AND THE CISURAL NORTH OF RUSSIA**

**Abstract:** Technologies of small-sized maglev transport in trestle execution are offered.

**Work purpose:** to define possible options of use of maglev-technologies in the north of Russia.

**Methods:** system analysis, comparison, analogy.

**Result:** magnetolevitation trestle technologies are recommended for realization.

**Practical importance of work:** transport communications from gas processing plants on the coast of Gulf of Ob to a railway line of Obskaya-Bovanenkovo can be realized, the rupture of an automobile highway Usinsk – Naryan-Mar can be eliminated, protection of overpasses and vehicles against increase in levels of water currents can be provided.

**Conclusion:** the trestle of arch type can be used for conveyance: small-sized cargo transport modules (and passenger transport modules); special vessels (barrels, cylinders, minitanks, etc.) for transportation of liquid hydrocarbons; cars of normal dimensions if all of them are equipped with sources of magnetic field.

**Keywords:** North of Russia, maglev technologies, small-sized transport systems, trestle of arch type, "driving on a ceiling"

## Введение

Предлагаются технологии малогабаритного магнитолевитационного транспорта для Севера России. В частности, эстакады арочного типа позволят обеспечить защиту путепроводов и транспортных средств от повышения уровней водотоков и других природных явлений. Особенностью таких эстакад является перемещение транспортного средства относительно внутренней верхней поверхности эстакады – «езда по потолку». Для преодоления водных преград арочные эстакады могут подвешиваться на тросах (канатах) между высотными опорами. Для преодоления болот такие эстакады могут устанавливаться на гати и понтоны.

### Арочная эстакада и возможные варианты её применения

В настоящее время в России предлагается к реализации ряд технологий перевозки пассажиров и грузов на основе магнитной левитации [1].

В условиях Севера России путепроводы магнитолевитационных систем следует строить в эстакадном исполнении [2]. Использование малогабаритных транспортных модулей потребует, соответственно, и конструктивные элементы эстакад меньших размеров. Эстакады традиционных типов обеспечивают защиту путевых сооружений и движущихся транспортных средств от повышения уровня водотоков, а также снежных заносов. Однако, для выполнения этих функций зачастую требуется поднятие путепровода на значительную высоту, что, в свою очередь, вызывает явление парусности и требует защиты от порывов ветра, а также исключение возможности переворачивания транспортных модулей.

Защитить путепровод и малогабаритные транспортные средства от атмосферных явлений позволит эстакада арочного типа.



Эстакада арочного типа представляет собой конструкцию из прочного материала, имеющую арку в поперечном сечении, на внутренней поверхности которого размещены либо рельсы из сверхпроводящего материала для магнитного подвешивания транспортного модуля, либо витки статорной обмотки ограничителя перемещений [3], обеспечивающей электромагнитное подвешивание транспортного модуля, оборудованного магнитными источниками, а также витки статорной обмотки ускоряющего электромагнита [4]. Вывод транспортного модуля на магнитную опору может быть осуществлен известным способом [5].

Общий вид арочной эстакады с подвешенным малогабаритным транспортным модулем показан на рис. 1.

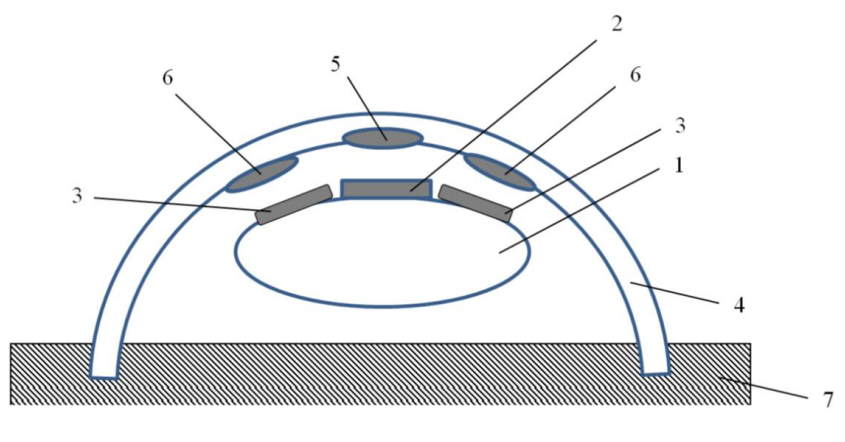


Рис. 1. Арочная эстакада с подвешенным малогабаритным транспортным модулем

На рис. 1 обозначены: 1 – малогабаритный транспортный модуль, 2 – магнитный источник транспортного модуля для взаимодействия с обмоткой ускоряющего электромагнита, 3 – магнитные источники транспортного модуля для взаимодействия с обмоткой электромагнитного ограничителя перемещений, 4 – несущая конструкция арочной эстакады, 5 – виток обмотки ускоряющего электромагнита, 6 – витки обмотки электромагнитного ограничителя перемещений, 7 – опорная поверхность.

Простейший макет арочной эстакады показан на рис. 2-4.

Несущая конструкция макета арочной эстакады выполнена из немагнитного материала – пластика. В качестве модели транспортного модуля используется модель автомобиля, внутри которой установлен источник постоянного магнитного поля. Магнитное подвешивание модели осуществляется при помощи постоянного ферромагнита (в данном случае кольцевой формы), который расположен сверху несущей конструкции. При перемещении кольцевого магнита, например, рукой – модель автомобиля перемещается вместе с ним относительно внутренней поверхности арочной эстакады (рис. 2, 3).

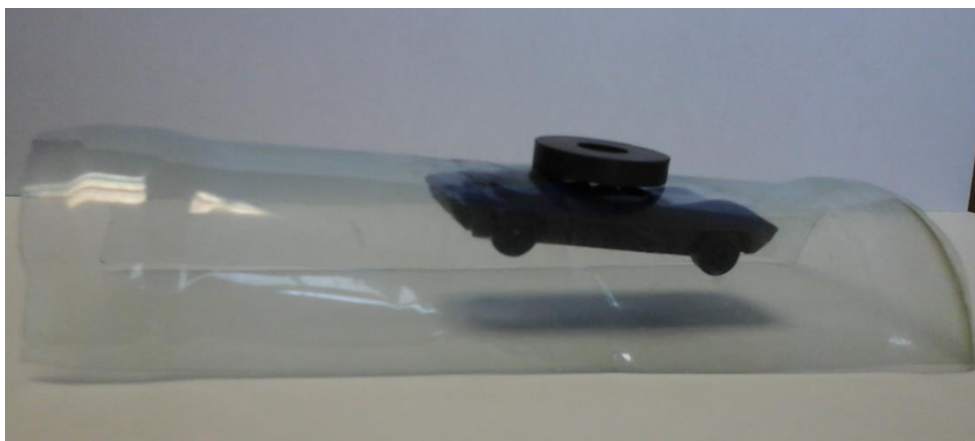


Рис. 2. Макет арочной эстакады с подвешенной моделью автомобиля

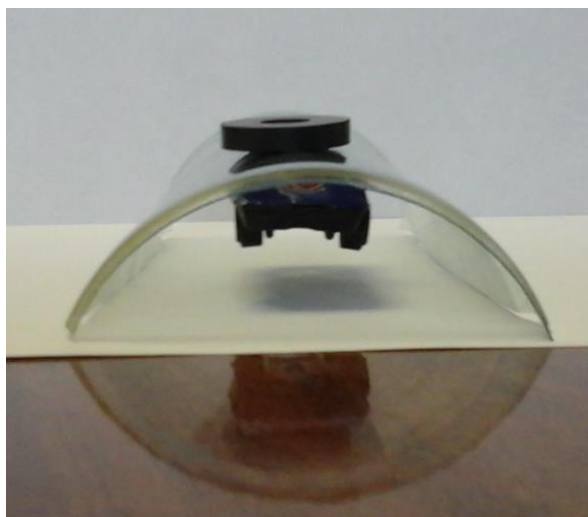


Рис. 3. Макет арочной эстакады (вид сборки)



Рис. 4. Макет арочной эстакады с неподвешенной моделью автомобиля

Если изменить перевернуть кольцевой магнит (поменять полярность), перемещение будет осуществляться относительно опорной поверхности за счет отталкивания кольцевым магнитом магнитного источника внутри модели автомобиля (рис. 4).

### **Транспортировка углеводородов с использованием арочной эстакады**

Разработка газоконденсатных месторождений на полуострове Ямал обуславливает необходимость увеличения объемов транспортировки сжиженного природного газа (СПГ), в том числе и сухопутным способом. Сухопутная транспортировка углеводородов осуществляется либо по трубопроводам, либо в железнодорожных цистернах [6]. Для сжижения газ охлаждается до температуры – 163 °С и сжимается в 600 раз на специальных заводах.

Предлагается использовать для перевозки СПГ малогабаритные емкости (бочки, баллоны, миницистерны или др.) При этом, если разместить в стенках этих емкостей сверхпроводящие элементы, низкая температура перевозимого СПГ может быть использована для приведения таких элементов в сверхпроводящее состояние. При заполнении бочки станут магнитами, которые будет удобно перемещать с использованием эстакад арочного типа.

В настоящее время к крупнейшим месторождениям природного газа – Новопортовскому и Южно-Тамбейскому, где планируется строительство завода по производству СПГ, трубопроводы и железнодорожные пути не проложены. Мощность самого завода по производству СПГ составит 16,5 млн тонн в год.

Предлагается вместо трубопроводов и железнодорожных путей строить малогабаритные эстакадные путепроводы арочного типа на основе магнитной (электромагнитной) подвески от заводов по производству СПГ до железнодорожных станций Бованенково и Паюта. На указанных станциях построить терминалы для перегрузки наполненных миницистерн с малогабаритной эстакады в специальные вагоны, а пустых емкостей – из вагонов на эстакаду. Перемещение магнитноподвешенных миницистерн относительно эстакады будет осуществляться в автоматическом режиме.

### **Преодоление разрывов автомобильных магистралей**

В условиях Севера России значительная часть территорий не охвачена круглогодичной транспортной доступностью. В холодное время года транспортное сообщение с такими территориями может осуществляться по зимним автомобильным дорогам – зимникам. Наиболее важный зимник на Европейском Северо-Востоке зимник Усинск – Нарьян-Мар, обеспечивающий транспортную связь Ненецкого автономного округа

(НАО) и Республики Коми. Расстояние Усинск – Нарьян-Мар по трассе составляет 416 км, из них 86 км – зимник, соединяющий автомобильную дорогу от поселка Харьягинский с Лаявожской дорогой с четырьмя ледовыми переправами через реки Шапкина, Лаявож, Лая и Харьяха.

В летнее время зимник закрывается и целый субъект РФ с центром г. Нарьян-Маром остается без связи с сетью автомобильных дорог страны. Более того, согласно окружному закону, передвижение по землям, занятым оленьими пастбищами, на гусеничной технике и ином грузовом транспорте в период отсутствия устойчивого снежного покрова влечет наложение административного штрафа.

В данном случае круглогодичное транспортное сообщение с НАО может быть обеспечено при помощи арочной эстакады от поселка Харьягинский до Лаявожской дорогой.

Арочная эстакада позволит обеспечить перемещение автомобилей нормальных габаритов, в верхней части которых закреплены источники магнитного поля, что показано на рис. 5.



Рис. 5. Замена автозимника арочной эстакадой

Для переправы через реки конструктивные элементы арочной эстакады могут подвешиваться на тросах (канатах) между высотными опорами, как это показано на рис. 6, где фрагмент арочной эстакады 4 подвешен между опорами 9 при помощи троса 10.

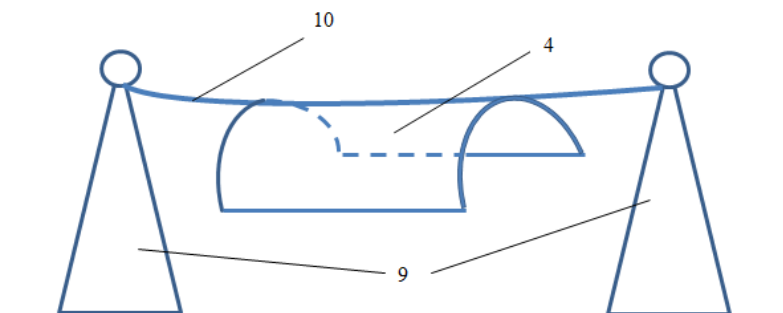


Рис. 6. Подвешивание арочной эстакады между опорами

Для обеспечения безопасности транспортного модуля арочная эстакада может дополняться желобом, а транспортный модуль – колесными опорами [7]. На рис. 7 показано, что транспортный модуль 1 дополнен колесными опорами 12, а несущая конструкция эстакады дополнена поддоном 11. В случае нарушения условий магнитного подвешивания (например, пропадания сверхпроводимости) транспортный модуль стаёт колесными опорами на поддон и перемещается под управлением либо ускоряющего электромагнита, либо другого движителя (например, аккумулятора).

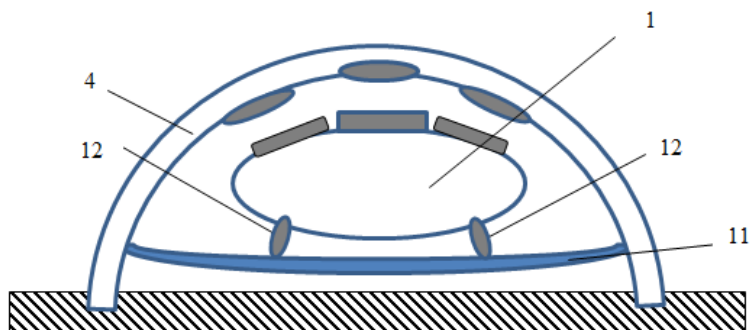


Рис. 7. Арочная эстакада, дополненная поддоном, и транспортный модуль, дополненный колесными опорами

Своеобразным прототипом арочной эстакады может служить подвесная трамвайная монорельсовая дорога в городе Вупперталь в Германии (рис.8) [8]. За 116 лет существования на этой дороге произошла одна-единственная авария – вагон сошел с рельса и свалился в канал. Не обошлось без человеческих жертв.

Применение предлагаемых в данной статье технических решений позволит исключить подобные происшествия.



Рис. 8. Монорельсовая подвесная дорога в городе Вупперталь

### Заключение

Эстакады арочного типа могут использоваться для перемещения оборудованных источниками магнитного поля:

- малогабаритных грузовых и пассажирских транспортных модулей;
- специальных емкостей (бочек, баллонов, миницистерн и др.) для перевозки жидких углеводородов;
- автомобилей нормальных габаритов.

### Библиографический список

1. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев; под ред. В. А. Гапановича. – М.: Физматлит, 2014. – 476 с.
2. Киселенко А. Н. Возможности магнитолевитационного транспорта для повышения связности транспортной сети Европейской и Приуральской Арктики и в логистических процессах / А. Н. Киселенко, Е. Ю. Сундуков // Транспортные системы и технологии: сетевой электронный журнал. – СПб: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2016. – № 2 (4). – С. 14–17. – URL: <http://www.transssyst.ru/files/2-kiselenko-an-syndykov-ey-pdf.pdf> (22.07.2017).
3. С2 2199451 RU 6 В 60 L 13/00 Ограничитель перемещений транспортного средства / Евдокимов Б. П., Сундуков Е. Ю., Свойкин В. Ф. – 99123534/28; Заявл. 09.11.1999 // Изобретения (Заявки и патенты). – 2003. – № 64.
4. С1 2123946 RU 6 В 60 L 13/10 Транспортная система / Сундуков Е. Ю. – 961245/28; Заявл. 27.12.1996 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1998. – № 36.
5. А1 1184169 SU 5 В 60 L 13/00 Способ вывода объекта на магнитную сверхпроводящую опору / Козорез В. В., Симикин К. М.,

Чеборин О. Г. – 3432449/11; Заявл. 30.04.1982 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1993. – № 45–46.

6. Вербо А. М. Инновации в области морской перевозки сжиженного природного газа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – №3. – С. 38–44.

7. U1 168039 RU 6 B 60 L 13/10 Транспортная система с шаговым электромагнитным двигателем и колесными опорами / Сундуков Е.Ю., Малащук П.А., Тарабукина Н.А. – 2016100487; Заявл. 11.01.2016 // Полезные модели (Заявки и патенты). – 2017. – № 2.

8. Трамвай наоборот: Вуппертальская подвесная дорога // Информационный портал «LiveJournal». – URL: <http://masterok.livejournal.com/2185600.html> (30.05.2017).

### References

1. Antonov Yu. F. & Zajcev A. A. Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya [Magnetolevitation transport technology]. Moscow, 2014. 476 p.

2. Kiselenko A. N. & Sundukov E. Yu. *Transportnye sistemy i tekhnologii – Transport Systems and Technologies*, 2016, no. 2(4), pp. 14–17. URL: <http://www.transstyst.ru/files/2-kiselenko-an-syndykov-ey-pdf.pdf> (27.04.2017).

3. S2 2199451 RU 6 B 60 L 13/00 Ogranichitel' peremeshchenij transportnogo sredstva [Limiter of movements of the vehicle]. Evdokimov B. P., Sundukov E. Yu., Svojkin V. F. 99123534/28; Zayavl. 09.11.1999. *Izobreteniya (Zayavki i patenty) – Inventions (Applications and patents)*, 2003, no. 64.

4. Sundukov E. Yu. C1 2123946 RU 6 B 60 L 13/10 Transportnaya sistema [Transport system]. 961245/28; Zayavl. 27.12.1996. *Izobreteniya (Zayavki i patenty) – Inventions (Applications and patents)*, 1998, no. 36.

5. Kozorez V. V., Simikin K. M. & Cheborin O. G. A1 1184169 SU 5 B 60 L 13/00 Sposob vyvoda ob'ekta na magnitnyu sverhprovodjashuyu oporu [The way of a conclusion of an object to a magnetic superconducting support]. 3432449/11; Zayavl. 30.04.1982 *Izobreteniya (Zayavki i patenty) – Inventions (Applications and patents)*, 1993, no. 45–46.

6. Verbo A. M. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) – Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2008, no. 3, pp. 38–44.

7. Sundukov E. Yu., Malashchuk P. A. & Tarabukina N. A. U1 168039 RU 6 B 60 L 13/10 Transportnaya sistema s shagovym ehlektromagnitnym dvigatelem i kolesnymi oporami [Transport system with the step electromagnetic engine and wheel support]. 2016100487; Zayavl. 11.01.2016. *Poleznye modeli (Zayavki i patenty) – Useful Models (Applications and Patents)*, 2017, no. 2.

8. *Informacionnyi portal «LiveJournal». Tramvai naoborot: Vuppertal'skaja podvesnaja doroga* (Information Portal "LiveJournal").

Trump on the Contrary: Wuppertal pendant road), URL: <http://masterok.livejournal.com/2185600.html> (30/05/2017).

**Сведения об авторах:**

СУНДУКОВ Евгений Юрьевич, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры "Физика и автоматизация технологических процессов и производств", Сыктывкарский лесной институт – филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С. М. Кирова

E-mail: jek-sun@mail.ru

КОЧЕРГИН Сергей Михайлович, старший преподаватель кафедры "Физика и автоматизация технологических процессов и производств", Сыктывкарский лесной институт – филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С. М. Кирова

E-mail: atpp@sfi.komi.com

СЕЛИВАНОВ Леонид Фёдорович, пенсионер

E-mail: l.seliwanov@yandex.ru

**Information of author:**

Evgeny U. SUNDUKOV, Cand. Sc. (Econ), associate professor, associate professor of Physics and automation of technological processes and productions department of Syktyvkar forest institute – branch of Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S. M.Kirov

E-mail: jek-sun@mail.ru

Sergej M. KOCHERGIN, senior teacher of Physics and automation of technological processes and productions department of Syktyvkar forest institute – branch of S. Kirov's St. Petersburg State Forest Technical University under

E-mail: atpp@sfi.komi.com

Leonid SELIVANOV, pensioner

E-mail: l.seliwanov@yandex.ru



**И. Г. Емельянов**<sup>1,2</sup>, **А. В. Кузнецов**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт машиноведения Уральского отделения РАН  
(Екатеринбург, Россия)

<sup>2</sup> Уральский государственный университет путей сообщения  
(Екатеринбург, Россия)

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК**

Дата поступления 22.09.2017

Решение о публикации 17.10.2017

### ***Аннотация:***

**Введение.** С развитием численных методов и вычислительных комплексов произвести оценку напряженного состояния тонкостенных конструкций, в виде тел вращения достаточно просто. Однако при решении таких задач методом конечных элементов необходимо выбрать такую сетку конечных элементов, чтобы «схватить» все возможные сингулярности напряженного состояния. Чтобы корректно их учитывать, необходимо уменьшать размер конечных элементов. Уменьшение размеров элементов приводит к увеличению требуемых вычислительных мощностей.

**Постановка проблемы.** При решении прикладных задач даже при достаточно грубой сетке количество элементов может превышать сотни тысяч. При решении задач для реальных конструкций в трехмерной постановке, объем вычислений может быть достаточно велик и далеко не всякий даже суперкомпьютер сможет обработать такое решение.

**Цель работы.** Цель данной работы использовать известный подход, применяемый в теории оболочек, который позволяет свести трехмерную задачу к решению одномерной задачи, что существенно снижает требования к вычислительным мощностям.

**Метод (методология).** Рассматривается задача об определении напряженного состояния оболочечных конструкций в виде тел вращения. Подход основан на интегрировании уравнений теории оболочек и разложении функций в ряды Фурье для разделения переменных. В работе использовано разложение в дискретный ряд Фурье по косинусам и синусам, которое описывает произвольные несимметричные механические нагрузки.

**Результаты.** Рассмотрена тонкостенная цилиндрическая конструкция, шарнирно закрепленная по торцам. Конструкция нагружена в трех местах распределенной силой, действующей по нормали к поверхности оболочки. После интегрирования системы уравнений для оболочки найденное напряженно-деформированное состояние оболочки определяется компонентами напряжений на внешней и внутренней поверхностях оболочки и компонентами перемещений. В работе приводится сравнение результатов расчета с помощью предлагаемой методики и метода конечных элементов.

**Заключение.** Показано, что использование методов теории оболочек, и предложенное разложение разрешающих функций и нагрузки в ряд Фурье, позволяет решать задачи с использованием небольших вычислительных ресурсов. При этом

обеспечивается необходимая точность вычисления по всем компонентам напряженно-деформированного состояния конструкции.

**Ключевые слова:** напряженное состояние, оболочка вращения, метод дискретной ортогонализации, ряд Фурье, метод конечных элементов.

UDC 539.3

**L. G. Emel'yanov**<sup>1,2</sup>, **A. V. Kuznetsov**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Scientific Institution "Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences", (Ekaterinburg, Russia)

<sup>2</sup> Ural State University of Railway Transport, (Ekaterinburg, Russia)

## DETERMINATION OF THE STRESSED STATE OF THIN-CONSTRUCTION STRUCTURES USING THE METHODS OF THE THEORY OF SHELLS

### *Annotation:*

**Introduction.** With the development of numerical methods and computational complexes, it is quite easy to evaluate the stress state of thin-walled structures in the form of rotation bodies. However, when solving such problems by the finite element method, it is necessary to choose such finite element grid to "grasp" all possible singularities of the stressed state. To correctly take them into account, you must reduce the size of the finite elements. Reducing the size of the elements leads to an increase in the required computing power.

**Formulation of the problem.** When solving applied problems, even with a sufficiently coarse grid, the number of elements can exceed hundreds of thousands. When solving problems for real constructions in a three-dimensional setting, the amount of computation can be quite large and not every supercomputer can even handle such a solution.

**Objective.** The purpose of this paper is to use the well-known approach used in shell theory, which allows us to reduce the three-dimensional problem to the solution of a one-dimensional problem, which substantially reduces the requirements for computing power.

**Method (methodology).** The problem of determining the stress state of shell structures in the form of bodies of revolution is considered. The approach is based on the integration of the equations of the theory of shells and the expansion of functions into Fourier series for separation of variables. The expansion into a discrete Fourier series in cosines and sines is used in this paper, which describes arbitrary asymmetric mechanical loads.

**Results.** A thin-walled cylindrical structure hinged at the ends is considered. The structure is loaded in three places by a distributed force acting normal to the surface of the shell. After integrating the system of equations for the shell, the found stress-strain state of the shell is determined by the stress components on the outer and inner surfaces of the shell and the displacement components. The paper compares the calculation results with the proposed methodology and the finite element method.

**The conclusion.** It is shown that the use of methods of shell theory, and the proposed expansion of resolving functions and loads in a Fourier series, allows solving problems using small computing resources. At the same time, the necessary accuracy of calculation for all components of the stress-strain state of the structure is ensured.

**Key words:** stress state, shell of rotation, discrete orthogonalization method, Fourier series, finite element method.

## Введение

В настоящее время при определении напряженного состояния различных конструктивных элементов широко используются вычислительные комплексы, основанные на методе конечных элементов. Произвести оценку напряженного состояния тонкостенных конструкций, в виде тел вращения используя такие комплексы как ANSYS, COSMOS [1, 2] и др. не представляет труда даже в геометрически и физически нелинейной постановке. Напряженное состояние может быть найдено в одномерной, двумерной или трехмерной постановке в зависимости от типа и цели задачи и располагаемой вычислительной мощности. Однако существует класс задач, где заложенная в данных вычислительных комплексах универсальность, теряет свою эффективность. Это происходит при решении задач с подвижными границами, т.е. контактных задач для конструкций, взаимодействующих с жесткими или упругими телами. При решении задач методом конечных элементов для тонкостенных конструкций, взаимодействующих с другими телами, необходимо выбрать такую сетку конечных элементов, чтобы «схватить» все возможные сингулярности напряженного состояния, но при этом использовать минимально возможную размерность задачи. Этого не всегда легко добиться, поскольку, например, при контакте оболочечных конструкций возникают локализованные нагрузки на границе области контакта [3, 4, 5]. Чтобы корректно их учитывать, необходимо уменьшать размер конечных элементов. Уменьшение размеров элементов приводит к увеличению требуемых вычислительных мощностей. При решении реальных прикладных задач даже при достаточно грубой сетке количество элементов может превышать сотни тысяч. Например, при определении не осесимметричного напряженного состояния (двумерная задача) оболочки вагона-цистерны потребовалось около 100 тыс. оболочечных конечных элементов типа shell [6]. При решении такой задачи в одномерной постановке (осесимметричное напряженное состояние) необходимо около 1 тыс. элементов. При решении данной задачи в трехмерной постановке (в рамках теории упругости) необходимо не менее  $2 \times 10^6$  объемных конечных элементов типа solid для случая если толщина оболочки будет аппроксимирована одним конечным элементом (при необходимом соблюдении соотношений между размерами конечного элемента). Если для увеличения точности расчета толщина оболочки будет аппроксимирована тремя элементами, то число элементов возрастет до  $1 \times 10^7$  конечных элементов. Если толщина оболочки будет аппроксимирована шестью элементами необходимо не менее  $8 \times 10^7$  элементов. Если для первого расчетного случая для получения решения необходимо около суток, то для третьего случая речь пойдет уже о месяцах, к тому же объем вычислений

будет достаточно велик и далеко не всякий компьютер сможет такое решение обработать. Эти оценки приведены для решения задачи для оболочки вагона-цистерны на суперкомпьютере «Уран» ИММ УрО РАН. Следовательно, решение такой задачи в трехмерной постановке становится затруднительным даже при использовании суперкомпьютеров. Поэтому вопрос об уменьшении размерности задачи для решения прикладных задач для тонкостенных конструкций является весьма актуальным.

### Постановка задачи

Одним из эффективных методов понижения размерности задачи для тонкостенных конструкций в виде тел вращения является использования методов теории оболочек и применение рядов Фурье. Известно, что в методе конечных элементов для тел вращения при аппроксимации внешних нагрузок также используют разложение в ряд Фурье по окружной координате [7, 8]. Однако при этом размерность задачи не понижается.

В данной работе рассматривается подход, который позволяет свести трехмерную задачу к решению к одномерной задачи, что существенно снижает требования к вычислительным мощностям. Рассматривается задача об определении напряженного состояния тонкостенных оболочечных конструкций в виде тел вращения. Подход основан на интегрировании уравнений теории оболочек (понижение размерности задачи на единицу) и разложении разрешающих функций в ряды Фурье (понижение размерности еще на единицу). В работе использовано разложение в дискретный ряд Фурье по косинусам и синусам, которое описывает произвольные несимметричные механические нагрузки. Такой путь решения позволяет не наносить на поверхность оболочки сетку конечных элементов, от которых зависит объём задачи (размер матрицы жесткости конструкции). В работе используется сетка виртуальных элементов [9], количество которых не увеличивает объём задачи.

Если для описания тонкостенной конструкции использовать оболочечные модели, основанные на различных гипотезах, то напряженное состояние в ортогональной криволинейной системе координат  $\alpha O\beta$ , описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных [10, 11, 12]

$$\frac{\partial \bar{N}}{\partial \alpha} = \sum_{m=0}^n A_m(\alpha) \frac{\partial^m \bar{N}}{\partial \beta^m} + \bar{f}(\alpha, \beta). \quad (1)$$

Здесь  $n$  – порядок производных, зависящий от принятых допущений;  $A_m$  - матрицы, элементы которых определяются через геометрические и жесткостные параметры оболочки;  $\bar{f}$  - вектор, компоненты которого зависят от приложенных к оболочке поверхностных нагрузок и интегральных характеристик температурного поля. Для классической теории оболочек

искомый вектор  $\bar{N}$  имеет восьмой порядок, а для уточненных моделей – десятый (модель с учетом гипотезы Тимошенко), двенадцатый (модель с учетом сдвига и обжатия) и др.

Система (1) дополняется граничными условиями на контуре  $\alpha = const$ . Поскольку рассматриваются оболочки вращения замкнутые в направлении  $O\beta$ , то граничные условия в этом направлении заменяются условиями периодичности. Краевая задача системы (1) за счет периодичности позволяет для всех искомым функций представить решения в виде рядов Фурье по координате  $\beta$ .

### Материалы и методы исследования

В данной работе будем использовать классическую теорию оболочек, основанную на гипотезах Кирхгофа-Лява [10]. Координатную поверхность оболочки вращения отнесем к криволинейной ортогональной системе  $s, \theta$ . На рис. 1 показаны:  $s$  - длина дуги меридиана,  $\theta$  - центральный угол в круге, перпендикулярном оси вращения  $z$ . Следовательно, задача определения напряженного состояния оболочки сводится к системе [13]

$$\frac{\partial \bar{Y}}{\partial s} = \sum_{m=0}^4 A_m(s) \frac{\partial^m \bar{Y}}{\partial \theta^m} + \bar{f}(s, \theta) + \lambda E \bar{q}_c(s, \theta), \quad (2)$$

$$\bar{Y} = \{ N_r, N_z, \hat{S}, M_s, u_r, u_z, v, \vartheta_s \}, \quad (3)$$

$$\bar{q}_c = \{ q_r, q_z, q_\theta, 0, 0, 0, 0, 0 \}^T, \quad \lambda(s, \theta \in \Omega) = 1, \quad \lambda(s, \theta \notin \Omega) = 0,$$

где  $\bar{Y}$  - вектор разрешающих функций;  $N_r, N_z$  - радиальное и осевое усилия;  $u_r, u_z$  - радиальное и осевое перемещения;  $\hat{S}$  - сдвигающее усилие;  $M_s$  - меридиональный изгибающий момент;  $v$  - окружное перемещение;  $\vartheta_s$  - угол поворота нормали;  $E$  - единичная матрица,  $\Omega$  - область контакта.

В отличие от уравнения (1) в правую часть уравнения (2) добавлено еще одно слагаемое, которое учитывает действие контактной нагрузки  $q_c$  (по радиальному, осевому и окружному направлению), если оболочка контактирует с основанием.

Внешнюю нагрузку, действующую на оболочку вращения можно представить в виде компонент распределенной нагрузки действующих по касательной к образующей  $q_s$  и направляющей  $q_\theta$  и по нормали  $q_r$  к поверхности оболочки. Поскольку обычно для оболочки вращения легко можно подобрать поперечную ось, относительно которой внешние нагрузки будут симметричны или антисимметричны, то их компоненты можно представить в виде разложения [7, 10].

$$q_s(s, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} q_s(s) \cos k\theta,$$

$$q_\theta(s, \theta) = \sum_{k=1}^{\infty} q_\theta(s) \sin k\theta, \quad (4)$$

$$q_\gamma(s, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} q_\gamma(s) \cos k\theta,$$

где  $k$  - номер гармоники.

В силу периодичности компонент поверхностной нагрузки все функции вектора  $\bar{Y}$  можно разложить в ряд Фурье по окружной координате  $\theta$ . Для симметричных компонент вектора  $N_r, N_z, M_s, u_r, u_z, \mathcal{G}_s$  имеем

$$\Phi^{sim}(s, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_i^{sim}(s) \cos k\theta \quad (5)$$

а, для антисимметричных компонент  $\hat{S}, v$

$$\Phi^{ans}(s, \theta) = \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_i^{ans}(s) \sin k\theta \quad (6)$$

Индексом *sim* отмечены симметричные а, индексом *ans* – антисимметричные компоненты вектора.

Учитывая (4) - (6) система в частных производных (2) сводится к ряду систем обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме восьмого порядка [10]

$$\frac{d\bar{Y}}{ds} = A_k(s)\bar{Y}_k + \bar{g}_k(s), \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

$$A_k(s) = \|a_{ij}^{(k)}(s)\|, \quad (i, j = 1, \dots, 8), \quad s_0 \leq s \leq s_L, \quad \bar{g}_k = \{g_{1k}, \dots, g_{8k}\}, \quad (7)$$

с граничными условиями

$$B_1 \bar{Y}(s_0) = \bar{b}_1$$

$$B_2 \bar{Y}(s_L) = \bar{b}_2.$$

Здесь  $B_1, B_2$  - заданные матрицы,  $\bar{b}_1, \bar{b}_2$  - заданные векторы. Вектор нагрузок  $\bar{g}_k$  состоит из компонентов внешней и контактной нагрузки. Компоненты контактной нагрузки должны быть заранее найдены из решения контактной задачи. Методы решения одномерных и двумерных контактных задач и нахождение вектора  $\bar{g}_k$  подробно рассмотрены в работе [13].

Для решения краевой задачи системы (7) будем использовать метод дискретной ортогонализации [14]. Поскольку система (7) содержит амплитудные значения разрешающих функций, то все нагрузки и функции (4) - (6) будем строить на дискретном множестве точек, т.е. применять дискретные ряды Фурье [15].

Таким образом, для интегрирования уравнения (7) учитывая (4) значение нагрузки должно быть представлено в виде разложения в дискретный ряд Фурье [15, 16].

$$q_f = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N (a_k \cos k\theta + b_k \sin k\theta) \quad (8)$$

Поскольку используем подход, основанный на применении дискретных рядов Фурье для функций, то для этого на поверхность оболочки нанесем криволинейную сетку с равным шагом по меридиану и окружности. Таким образом, получим множество виртуальных оболочечных элементов. На рис. 1 показан виртуальный элемент с размерами  $a_s$  и  $a_\theta$  по меридиану и окружности, нагруженный распределенной нагрузкой  $q$ . Таким образом, будем считать, что на любом виртуальном элементе известно значение компонент внешней и контактной нагрузки.

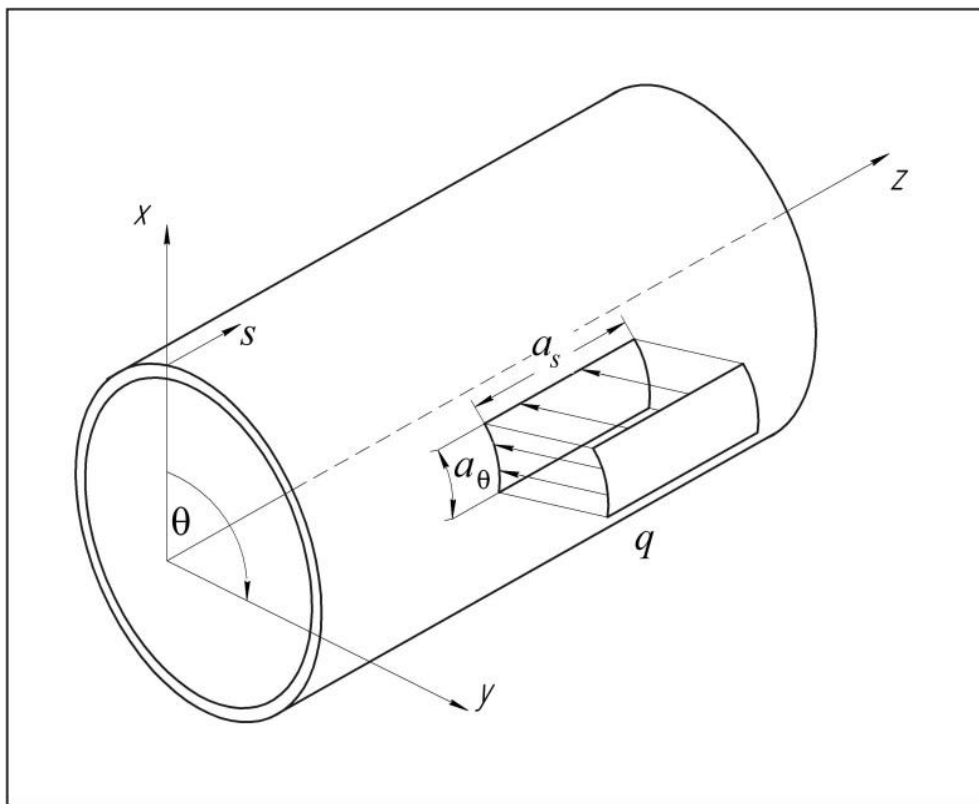


Рис. 1. Цилиндрическая оболочка, нагруженная внешней нагрузкой  $q$  распределенной на виртуальном элементе

При решении задач с использованием теории оболочек [10] обычно рассматриваются нагрузки симметричные относительно поперечной оси. Следовательно, при вертикальной оси симметрии  $X$ , показанной на рис.1, можно использовать разложение (4).

При решении некоторых задач для тел вращения могут встречаться нагрузки не симметричные относительно поперечной оси. Примером таких нагрузок могут быть ветровые нагрузки, силы инерции при землетрясениях, когда земля получает ускорение и другие виды нагрузок. Следовательно, необходимо аппроксимировать нагрузки, распределенные произвольным образом, которые можно представлять в виде [8].

$$\begin{aligned}
q_s(s, \theta) &= \sum_{k=0}^{\infty} q_s^{sim}(s) \cos k\theta + \sum_{k=1}^{\infty} q_s^{ans}(s) \sin k\theta, \\
q_\theta(s, \theta) &= -\sum_{k=1}^{\infty} q_\theta^{sim}(s) \sin k\theta + \sum_{k=0}^{\infty} q_\theta^{ans}(s) \cos k\theta, \\
q_\gamma(s, \theta) &= \sum_{k=0}^{\infty} q_\gamma^{sim}(s) \cos k\theta + \sum_{k=1}^{\infty} q_\gamma^{ans}(s) \sin k\theta.
\end{aligned} \tag{9}$$

Разрешающие функции должны при этом быть дополнены слагаемыми - для симметричных компонент  $N_r, N_z, M_s, u_r, u_z, \vartheta_s$

$$\Phi^{ans}(s, \theta) = \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_i^{ans}(s) \sin k\theta, \tag{10}$$

и, для антисимметричных компонент  $\hat{S}, \nu$

$$\Phi^{sim}(s, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_i^{sim}(s) \cos k\theta. \tag{11}$$

Следовательно, напряженно-деформированное состояние оболочки будет определяться суммой компонент вектора разрешающих функций (3)

$$\bar{Y} = \bar{Y}_1 + \bar{Y}_2, \tag{12}$$

где  $\bar{Y}_1$  - вектор разрешающих функций при разложении (5), (6), а  $\bar{Y}_2$  при разложении (10), (11).

Таким образом, поскольку функция нагрузки известна на множестве виртуальных элементов, периодическая с периодом  $N$ , то ее необходимо разложить в ряд Фурье по косинусам и синусам. Среди разнообразных разложений в ряд Фурье дискретных функции будем использовать коэффициенты, дающие хорошую точность аппроксимации [17].

$$\begin{aligned}
a_k &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} q_i \cos \frac{2\pi ki}{N}, \\
b_k &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} q_i \sin \frac{2\pi ki}{N}, \quad k = 0, \dots, \frac{N}{2},
\end{aligned} \tag{13}$$

где  $q_i$  - значение нагрузки на каждом виртуальном элементе.

Для демонстрации рассмотренного выше подхода рассмотрим тонкостенную цилиндрическую конструкцию, шарнирно закрепленную по торцам. Конструкция нагружена в трех местах распределенной силой  $q$ , действующей по нормали к поверхности оболочки. На рис. 1. показан один нагруженный виртуальный элемент.

При расчете принималось - длина оболочки  $L=2.40$  м, внешний радиус  $R = 1,50$  м, толщина  $h = 0,006$  м, модуль упругости  $E = 2,1 \times 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ . Граничные условия приняты

$$\begin{aligned}
N_r = N_z = M_s = \hat{S} = 0, \quad \text{при } s = 0, \\
N_r = N_z = M_s = \hat{S} = 0, \quad \text{при } s = L.
\end{aligned}$$



Окружность разбивалась углом равным  $\theta = 2^\circ$ , который стягивает виртуальный элемент длиной  $a_\theta$ , т.е. длина окружности оболочки аппроксимирована 180 виртуальными элементами. Длина оболочки аппроксимирована 10 виртуальными элементами с длиной  $a_s = 0.24$  м.

Рассмотрен случай, когда на оболочку действуют три силы  $P_1 = 1000$  Н,  $P_2 = 1000$  Н и  $P_3 = 3000$  Н, равномерно распределенных на трех виртуальных элементах. Координаты центра нагруженных элементов  $s = L/2$  и  $\theta = \pi/3$ ,  $s = L/2$  и  $\theta = \pi/2$ ,  $s = L/2$  и  $\theta = 2\pi/3$  соответственно. При действии такой нагрузки не представляется возможным подобрать поперечную ось оболочки, чтобы использовать стандартную процедуру разложения в ряд (4) при действии симметричных нагрузок. Поэтому для решения этой задачи необходимо использовать суперпозицию двух решений (12), рассмотренную выше. При этом численным экспериментом установлено, что в разложении в ряд Фурье (8) необходимо удерживать  $k = N/2$  гармоник.

После интегрирования системы (7) найденное напряженно-деформированное состояние оболочки определяется компонентами напряжений ( $\sigma_s$  - меридиональное,  $\sigma_\theta$  - окружное,  $\tau_{s\theta}$  - касательное напряжение) на внешней и внутренней поверхностях оболочки и компонентами перемещений срединной линии [10].

Точность решения задачи зависит от используемой модели оболочки (1), от точности интегрирования системы уравнений (7) и от точности аппроксимирующей нагрузки (13). Эта точность может быть определена сопоставлением с решением аналогичной задачи другим численным методом или с экспериментом. В настоящее время, как отмечено выше, наиболее универсальным численным методом исследования тонкостенных конструкции является метод конечных элементов. Поэтому результаты различных компонентов напряженно-деформированного состояния для исследуемой оболочки сравнивались с результатами, полученными с помощью вычислительного комплекса ANSYS [1], основанного на методе конечных элементов.

## Результаты

На рис.2 сплошной линией показано изменение по окружности радиального перемещения оболочки  $u_r$  в зоне приложения сил. На рис.2 штриховой линией показано изменение радиального перемещения  $u_r$ , полученное при использовании программы ANSYS. Максимальное отклонение результатов расчета, вычисленное как  $\delta = |\Delta u_r| \times u_{rcp}^{-1} \times 100\%$  (где  $u_{rcp}$  - среднее значение перемещения) не превышает 6.7%. На рисунке видны

три характерных локальных прогиба оболочки в местах приложения нагрузки при  $\theta = \pi/3$ ,  $\theta = \pi/2$ ,  $\theta = 2\pi/3$ . При нагрузке  $P_3$  прогиб, естественно, увеличенный.

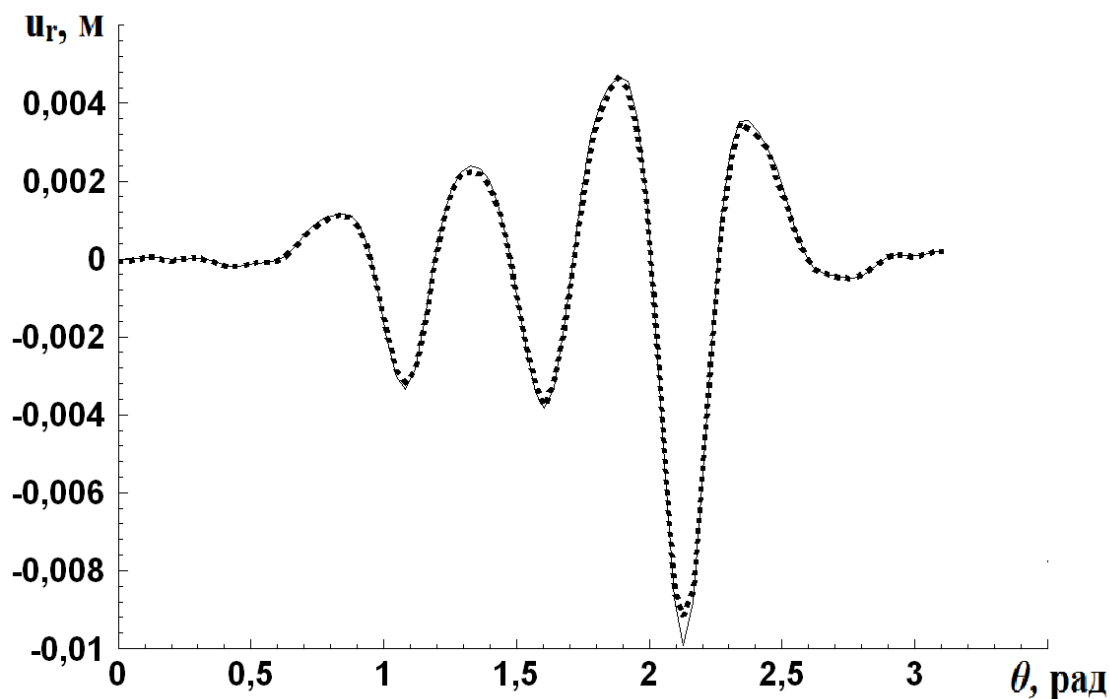


Рис.2. Изменение радиального перемещения оболочки

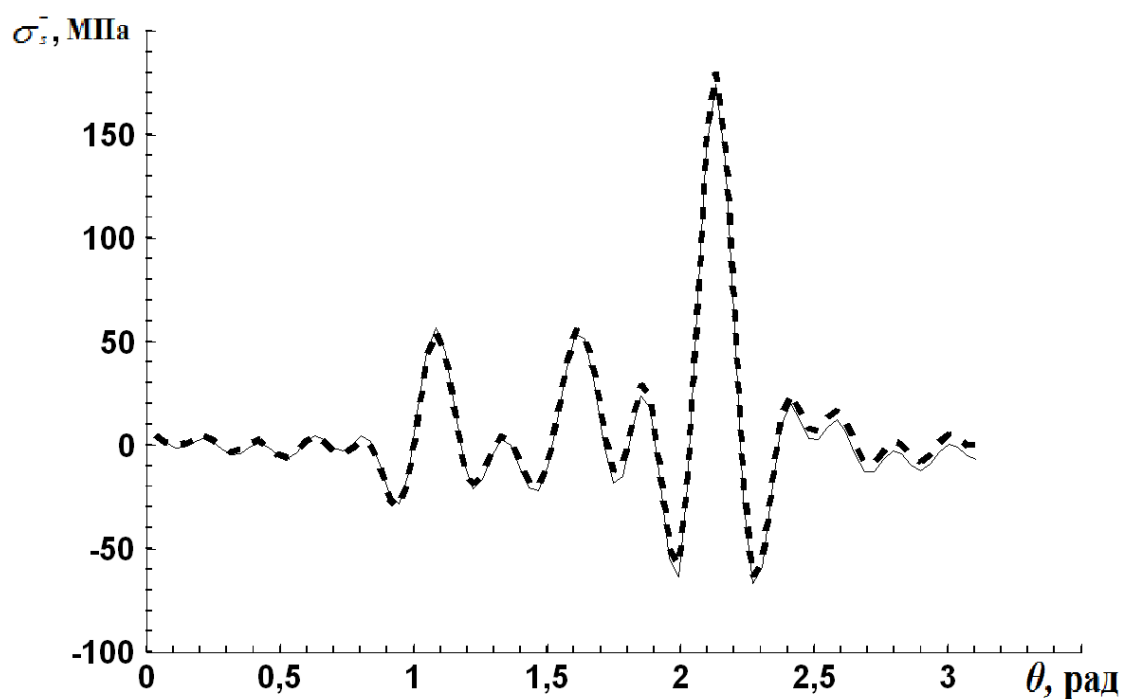


Рис. 3. Изменение меридионального напряжения  $\sigma_s^-$  на внутренней поверхности оболочки

На рис.3 сплошной линией показано изменение меридионального напряжения по окружности на внутренней поверхности оболочки  $\sigma_s^-$  в зоне приложения сил. На рис.3 штриховой линией показано изменение меридионального напряжения, полученное при использовании программы ANSYS. Максимальное отклонение результатов расчета, вычисленное как  $\delta = |\Delta\sigma_s^-| \times \sigma_{s\text{cp}}^{-1} \times 100\%$  (где  $\sigma_{s\text{cp}}^-$  - среднее значение напряжения) не превышает 5.5%.

На рис.4 сплошной линией показано изменение окружного напряжения на внутренней поверхности оболочки  $\sigma_\theta^-$  по окружности в зоне приложения сил. На рис.4 штриховой линией показано изменение окружного напряжения на внутренней поверхности оболочки, полученного при использовании программы ANSYS. Максимальное отклонение  $\delta = |\Delta\sigma_\theta^-| \times \sigma_{\theta\text{cp}}^{-1} \times 100\%$  (где  $\sigma_{\theta\text{cp}}^-$  - среднее значение напряжения) не превышает 0.6%.

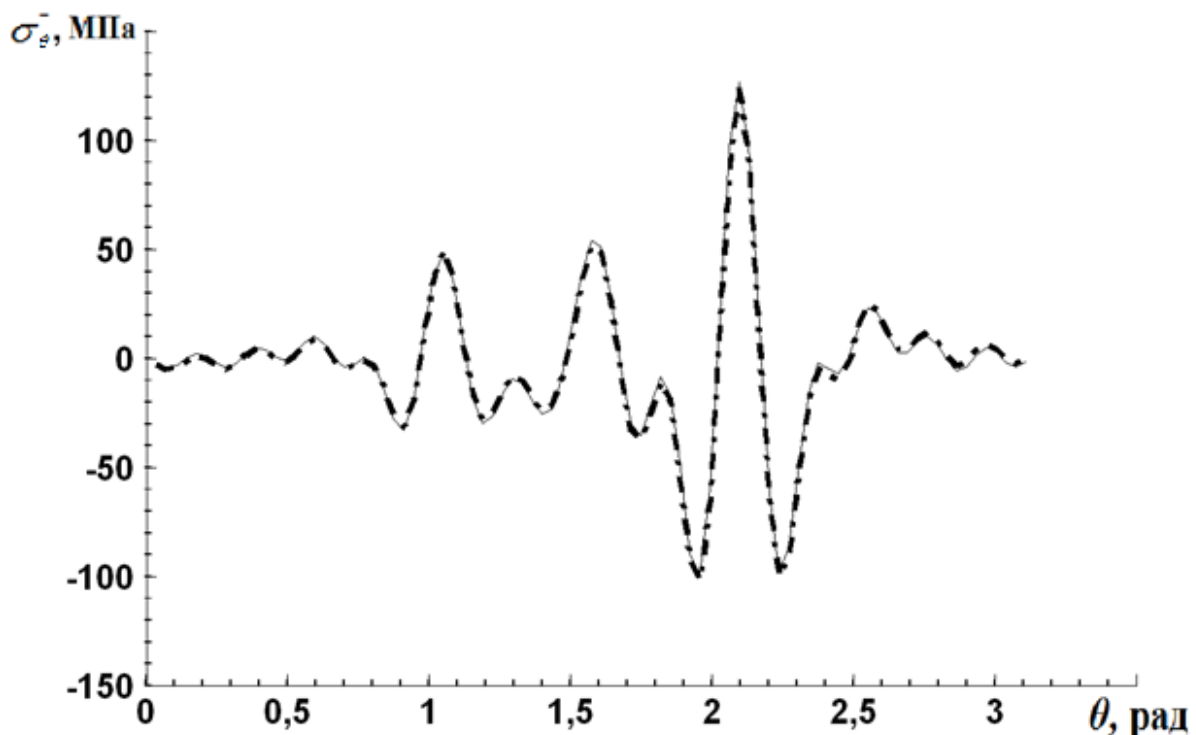


Рис. 4. Изменение окружного напряжения  $\sigma_\theta^-$  на внутренней поверхности оболочки

Из рисунков 2 - 4 видно, что характер напряженно-деформированного состояния исследуемой оболочки вычисленный, с использованием двух различных численных методов полностью совпадает.

## Обсуждение результатов

При расчете методом конечных элементов окружность аппроксимирована 180 четырех узловыми элементами shell-181. Поскольку точки выдачи напряженного состояния в методе конечных элементов предусмотрена по узлам, а в предложенной методе в середине элемента, то происходит сдвигка в представлении информации, что приводит к расхождению результатов в некоторых точках до 6.7%. Следует так же отметить, что данное расхождение находится в пределах допустимой погрешности (7-8%), характерной для метода конечных элементов [1].

## Заключение

Таким образом, использование методов теории оболочек, и предложенное разложение разрешающих функций и нагрузки в ряд Фурье, позволяет понизить размерность задачи и, следовательно, решать задачи с использованием небольших вычислительных ресурсов. При этом обеспечивается необходимая точность вычисления по всем компонентам напряженно-деформированного состояния для тонкостенных конструкций.

## Библиографический список

1. Басов К. А. ANSYS: Справочник пользователя / К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
2. Алямовский А. А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
3. Григолюк Э. И. Контактные задачи теории пластин и оболочек / Э. И. Григолюк, В. М. Толкачев. – М.: Машиностроение, 1980. – 411 с.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
5. Моссаковский В. И. Контактное взаимодействие элементов оболочечных конструкций / В. И. Моссаковский, В. С. Гудрамович, Е. М. Макеев. – Киев: Наукова думка, 1988. – 288 с.
6. Емельянов И. Г. Определение напряженного состояния и ресурса оболочечной конструкции / И. Г. Емельянов, В. И. Миронов, А. В. Кузнецов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2007. – №5. – С. 57–65.
7. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред / О. К. Зенкевич, И. Чанг. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
8. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 428с.

9. Емельянов И. Г. Применение виртуальных элементов при определении напряженного состояния оболочек вращения / И. Г. Емельянов, А. В. Кузнецов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7. – № 3. – С. 245–252.

10. Григоренко Я. М. Методы расчета оболочек: Теория оболочек переменной жесткости / Я. М. Григоренко, А. Т. Василенко. – Киев: Наукова думка, 1981. – Т. 4. – 544 с.

11. Григоренко Я. М. Численно-аналитическое решение задач механики оболочек на основе различных моделей / Я. М. Григоренко, Г. Г. Влайков, А. Я. Григоренко. – Киев: Академперіодика, 2006. – 472 с.

12. Василенко А. Т. Расчет параметров напряженного состояния конструктивных элементов из композиционных материалов на основе оболочечных моделей / А. Т. Василенко, Г. П. Голуб, Я. М. Григоренко // Расчеты на прочность. Вып. №30. – М.: Машиностроение, 1989. – С. 87–96.

13. Емельянов И. Г. Контактные задачи теории оболочек / И. Г. Емельянов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 185с.

14. Годунов С. К. О численном решении краевых задач для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений / С. К. Годунов // Успехи математических наук. – 1961. – Вып. 16. – № 3. – С. 171–174.

15. Григоренко Я. М. Решение краевых задач о напряженном состоянии упругих тел сложной геометрии и структуры с применением дискретных рядов Фурье / Я. М. Григоренко // Прикладная механика. – 2009. – Вып. 45. – №5. – С. 3–51.

16. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

17. Ба-хуссейн А. А. Дискретное преобразование Фурье. – URL: <http://ilab.xmedtest.net/?q=node/3740> (01.02.2015).

## References

1. Basov K. A. *ANSYS: Spravochnik pol'zovatelya*. [ANSYS: User's reference]. Moscow, 2005. 640 p.

2. Alyamovskiy A. A. *SolidWorks . COSMOSWorks. Inzhenernyy analiz metodom konechnykh elementov*. [SolidWorks. COSMOSWorks. Engineering analysis by the finite element method]. Moscow, 2004. 432 p.

3. Grigolyuk E. I. & Tolkachev V. M. *Kontaknyye zadachi teorii plastin i obolochek* [Contact problems of the theory of plates and shells]. Moscow, 1980. 411 p.

4. Dzhonson K. *Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya*. [The mechanics of contact interaction]. Moscow, 1989. 510 p.

5. Mossakovskiy V. I., Gudramovich V. S. & Makeyev Ye. M. *Kontaknoye vzaimodeystviye elementov obolocheknykh konstruksiy*. [Contact interaction of elements of shell structures]. Kiyev, 1988. 288 p.

6. Yemel'yanov I. G., Mironov V. I. & Kuznetsov A. V. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin – Problems of machine building and reliability of machines*, 2007, no. 5, pp. 57–65.

7. Zenkevich O. K. & Chang I. *Metod konechnykh elementov v teorii sooruzheniy i mekhanike sploshnykh sred* [The finite element method in the theory of structures and the mechanics of continuous media]. Moscow, 1974. 240 p. 8.

Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy* [Finite element method. Basics]. Moscow, 1984. 428p.

9. Yemel'yanov I. G. & Kuznetsov A. V. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred – Computational mechanics of continuous media*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 245–252.

10. Grigorenko Ya. M. & Vasilenko A. T. *Metody rascheta obolochek: Teoriya obolochek peremennoy zhestkosti* [Methods for calculating shells: The theory of shells of variable rigidity]. Kiyev, 1981, T. 4. 544 p.

11. Grigorenko Ya. M., Vlaykov G. G. & Grigorenko A. Ya. *Chislenno-analiticheskoye resheniye zadach mekhaniki obolochek na osnove razlichnykh modeley* [Numerically-analytical solution of the problems of shell mechanics on the basis of different models]. Kiyev, 2006. 472 p.

12. Vasilenko A. T., Golub G. P. & Grigorenko Ya. M. *Raschety na prochnost' – Strength calculations*, Moscow, 1989, vol. 30, pp. 87–96.

13. Yemel'yanov I. G. *Kontaknyye zadachi teorii obolochek* [Contact problems in the theory of shells]. Yekaterinburg, 2009. 185 p.

14. Godunov S. K. *Uspekhi matematicheskikh nauk – Success in Mathematical Sciences*, 1961. vol. 16, no. 3, pp. 171–174. (In Russian)

15. Grigorenko Ya. M. *Prikladnaya mekhanika – Applied Mechanics*, 2009, no. 5, pp. 3–51.

16. Korn G. & Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [A Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers]. Moscow, 1968. 720 pp.

17. Ba-khusseyyn A. A. *Diskretnoye preobrazovaniye Fur'ye* [Discrete Fourier Transform]. URL: <http://ilab.xmedtest.net/?q=node/3740> (01/02/2015).

#### **Сведения об авторах:**

ЕМЕЛЬЯНОВ Игорь Георгиевич, главный научный сотрудник Института машиноведения УрО РАН, профессор Уральского государственного университета путей сообщения. Тел.: +7(922)2073447.

E-mail: emelyanov@imach.uran.ru

КУЗНЕЦОВ Алексей Викторович, научный сотрудник Института машиноведения УрО РАН. Тел.: +7(922)2912357.

E-mail: Alekseikuz031082@rambler.ru

**Information about authors:**

Igor G. EMELIANOV, chief research officer of Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, professor of the Ural State University of Railway Transport. Tel.: +7 (922) 2073447.

E-mail: emelyanov@imach.uran.ru

Alexey V. KUZNETSOV, Research Fellow, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Tel.: +7 (922) 2912357.

E-mail: Alekseikuz031082@rambler.ru

УДК 66.083.2

**Я. Д. Коган<sup>1</sup>, Н. В. Богданова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>AR Materials Solution, Inc.

(Тарзана, Калифорния, США)

<sup>2</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

(Санкт-Петербург, Россия)

**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ ХОЛОДНОЙ  
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Дата поступления 19.10.2017

Решение о публикации 26.10.2017

***Аннотация:***

**Постановка задачи.** Выбор материалов и технологии изготовления неразъемных механических соединений трубопроводов (фитинга и трубы), формируемых методом холодной пластической деформации.

**Метод.** Теоретический анализ выбора материалов контактирующих пар на основе упругого последствие материалов трубы и фитинга. Упругое последствие материала трубы должно превосходить упругое последствие материала фитинга.

**Результаты.** Приведены рекомендации по материалам неразъемных соединений, формируемых при различных методах пластической деформации.

***Ключевые слова:*** неразъемные соединения, радиальная пластическая деформация, упругое последствие, рекомендуемые материалы

UDC 66.083.2

**J. D. Kogan<sup>1</sup>, N. V. Bogdanova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>AR Materials Solution, Inc.

(Tarzana, California, United States)

<sup>2</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

(St. Petersburg, Russian Federation)

**MATERIALS AND TECHNOLOGY FOR FABRICATING MECHANICAL  
CONNECTORS BY COLD PLASTIC DEFORMATION**

Of the date of receipt 19.10.2017

Of the decision to publish 26.10.2017



**Abstract:**

**Formulation of the problem.** Choice of materials and technologies for fabrication mechanical attached fittings (MAF) performed by cold plastic deformation.

**Method.** Theoretical analysis based on mechanical properties fitting and tubing materials. Springback tubing materials shall exceed springback tubing materials.

**Results.** Describes recommendations for materials of contact connections, formed with various methods of plastic deformation.

**Keywords:** non-detachable contact connections, radial plastic deformation, springback fitting and tubing materials, contentfeatured materials

## Введение

В статье анализируются материалы и современные технологии производства неразъемных механических соединений методом холодной пластической деформации.

Формирование механических соединений методом холодной пластической деформации является альтернативным методом традиционным технологиям соединения различных материалов и компонентов, производимых путем сварки, пайки и нарезанием резьбы.

Анализируемые типы соединений, получившие известность как MAF-соединения (mechanically attached fitting), широко применяются в авиации, судостроении, производстве гидравлических систем, линий высоковольтных передач и заземлений.

### Типы и методы изготовления механических соединений (MAF)

Следующие типы механических соединений, формируемые методом холодной пластической деформации, получили наибольшее распространение:

- радиально сжатые соединения;
- аксиально сжатые соединения;
- радиально – аксиально сжатые соединения.

Рассмотренные механические соединения образуются путем холодной пластической деформации трубы и фитинга, которые работают в непосредственном контакте. Обычно используется стандартная технология, которая основана на деформации контактирующих пар в специальных пресс-формах, в которых размеры компонентов изменяются под действием сжимающей нагрузки [1 - 6].

Приведенные ниже методы пластического деформирования для изготовления механических соединений являются наиболее распространенными:

### Радиальное сжатие

Механические соединения высокого качества производятся методом радиального обжатия, которое приводит к радиальной деформации определенной величины (радиально сжатые МАФ соединения).

Эта технологическая схема используется для производства неразъемных соединений трубопроводов. Радиальная деформация достигается одновременным обжатием фитинга и трубы по всей длине окружности ( $360^\circ$ ).

Контактное взаимодействие поверхностей фитинга и трубы обеспечивает высокую адгезию (сцепление) между ними и гарантирует отсутствие течи в процессе эксплуатации систем трубопроводов (рис. 1).



Рис. 1. Механическое соединение, полученное радиальным сжатием

### Осевое сжатие

Пластическая деформация достигается путем перемещения специального V-образного кольца (наконечника) по поверхности фитинга в осевом направлении, что создает радиальные сжимающие напряжения во взаимодействующих зонах фитинга и трубопровода, и таким образом обеспечивает необходимую герметичность контакта (аксиально сжатые МАФ) (рис. 2).



Рис. 2. Механическое соединение, полученное аксиальным сжатием

Радиально-осевое сжатие (аксиальное обжатие концевой части фитинга с раструбом торцевой части трубы)

Эта технология используется для изготовления фитингов, установленных на конце трубы. В этом случае пластическая деформация достигается за счет осевого перемещения фитинга и трубы в специальной пресс-форме, что делает возможным образование сжимающих радиальных

напряжений в фитинге и в концевой части трубы. Расширенный конец трубы (раструб) обеспечивает высокую герметичность соединения (рис. 3).

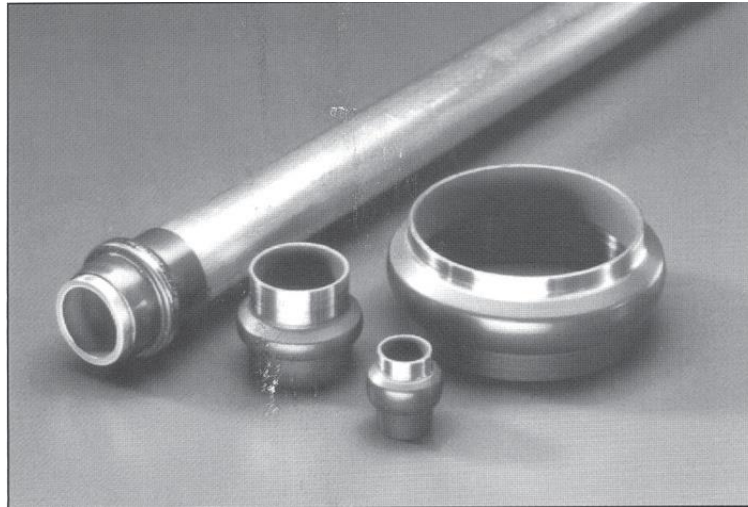


Рис. 3. Механическое соединение, полученное радиально-аксиальным сжатием

Рассмотренные механические соединения гарантируют воздухонепроницаемое состояние в зонах контакта, обеспечивая тем самым высокую производительность соединений в гидравлических трубах под высоким давлением (до 4000 - 5000 psi).

Эта технология используется в производстве новых трубопроводов, а также для ремонта эксплуатационных линий трубопроводов.

Экономическая эффективность соединений обусловлена простотой их монтажа, осмотра, а также возможностью использования труб из различных металлических материалов.

Согласно Subtek [2], производительность рассматриваемой технологии более, чем в два раза выше по сравнению с методом сварки. Кроме того, трудоемкость изготовления таких соединений сокращается на 50%.

### **Теоретические основы формирования механических соединений**

Технология основана на различии механических свойств (упругое последствие) материалов, используемых в контактирующих деталях.

Степень упругого последствия фитинга и трубы, которое возникает после снятия сжимающей нагрузки отвечает за формирование плотного стыка металл-металл. Упругое последствие трубы должно быть больше, чем упругое последствие фитинга в области произведенного обжатия.

Рис. 4 показывает образование механического соединения под действием радиальной сжимающей нагрузки, и упругие последствия контактирующих материалов когда упругое последствие трубы выше упругого последствия фитинга. Поперечные сечения фитинга - трубы представлены на разных этапах формирования механического соединения.

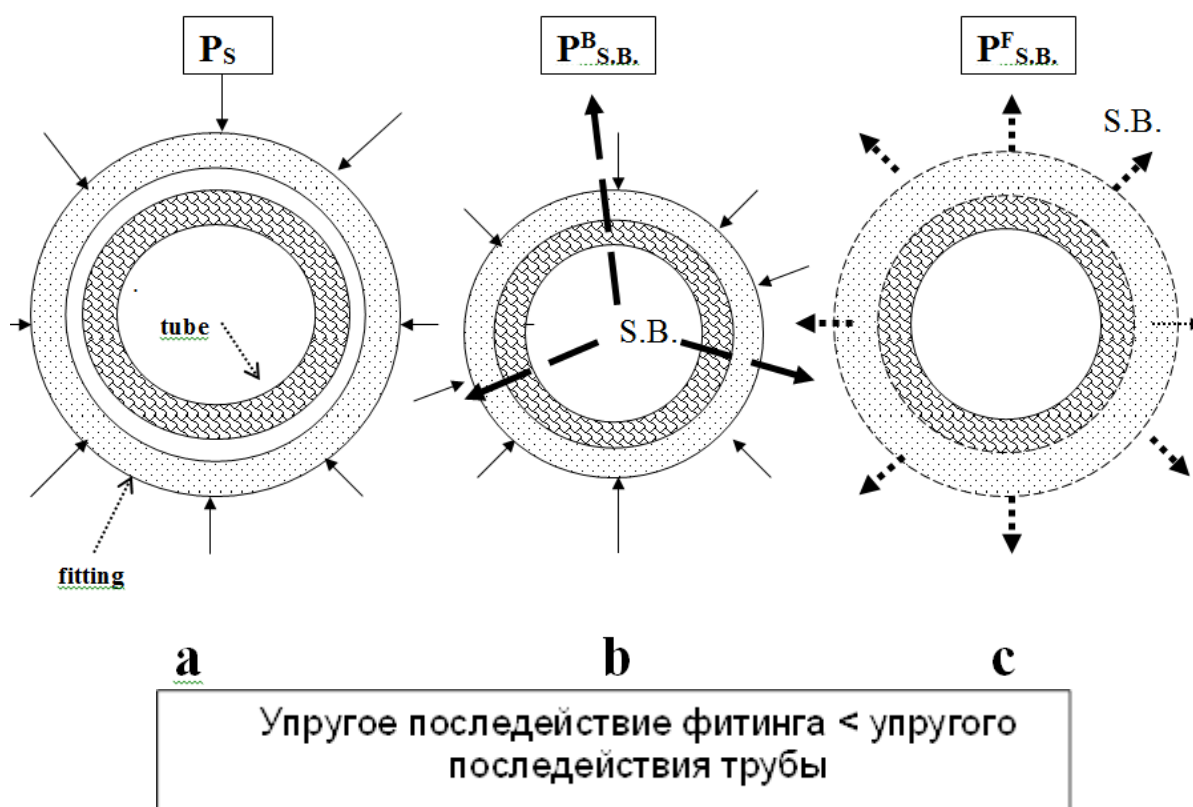


Рис. 4. Взаимосвязь упругого последствия трубы и фитинга

Позиция "а" показывает начальную стадию деформации, в которой фитинг и труба не имеют прямого контакта, и сжимающая нагрузка ( $P_s$ ) равномерно распределена по внешней поверхности фитинга.

Деформация фитинга, которая сопровождается его сжатием, приводит к непосредственному контакту внутреннего диаметра фитинга и внешнего диаметра трубы. Дальнейшее действие сжимающей нагрузки вызывает деформацию трубы. В этом случае сопротивление сжимаемых материалов действию внешней нагрузки растет и возникает эффект упругого последствия материалов фитинга и трубы ( $P^B_{S.B.}$ ). Рисунок 4 (позиция "б") показывает контактирующей пары на этой стадии деформации.

После того, как действие внешней сжимающей нагрузки прекращается упругое последствие внутренних напряжений материалов фитинга и трубы приводит к обратному перемещению деформированных слоев деталей, которое сопровождается расширением фитинга и трубы.

Когда упругое последствие материала фитинга ниже упругого последствия материала трубы, возникает прямой контакт внутренней поверхности фитинга и внешней поверхности трубы, что приводит к высокой адгезии (сцеплению) контактирующих поверхностей (положение "с").

Изменение размеров в результате упругого последействия может быть определено согласно методу, представленному в работе [7]. Степень упругого последействия пропорциональна отношению  $YS / (t \cdot E)$ , где  $YS$  - предел прочности,  $E$  - модуль упругости и  $t$  - толщина стенки детали [7].

Для контактирующих деталей упругое последействие является функцией предела величин предела текучести и модуля упругости материалов, используемых в трубе и фитинге. При этом, степень уплотнения определяется, по формуле (1):

$$I = \frac{YS_t}{YS_f} \cdot \frac{E_f}{E_t} \quad (1)$$

Где:  $I$  - степень уплотнения;

$YS_t$  - предел текучести материала трубы;

$YS_f$  - предел текучести материала фитинга;

$E_f$  - модуль упругости материала фитинга;

$E_t$  - модуль упругости материала трубы

### **Рекомендуемые материалы для формирования механических соединений**

Для производства фитингов рекомендуется использовать нержавеющую сталь (преимущественно аустенитного класса), алюминиевые сплавы, технически чистый титан, титановые сплавы с 6% алюминия и 4% ванадия.

Из алюминиевых сплавов, главным образом, используется сплав АД 33 по ГОСТ 4784-97 (6061-T6, AMS 4127J и AMS 4150L), из аустенитных нержавеющих сталей используется сталь 03X17H14M3 по ГОСТ 5632-72 (21-6-9 AMS 5595 и 316L, AMS 5524 и AMS 5507), из дисперсионно твердеющих сталей - сталь 07X16H4Д4Б, ГОСТ 5632-72 (17-4PH, AMS 5622 и AMS 5643).

Химический состав материалов, а также их термообработка должны обеспечить максимальную пластичность материала при холодной деформации; поэтому, в соответствии со стандартом SAE AS4459 (4) для материала фитингов введен контроль диапазона текучести при растяжении, а для технически чистого титана - содержания водорода.

Для алюминиевого сплава АД 33 (ГОСТ 4784-97) значение предела текучести при растяжении должно находиться в диапазоне от 193 до 227 МПа, что достигается при применении дополнительной термической обработки (перестаривание).

Аустенитные нержавеющие стали должны быть в отожженном состоянии и их предел текучести не должен превышать 448 МПа для 21-6-9SS и 310 МПа для стали 316L.

Предел текучести технически чистого титана (CP) должен соответствовать диапазону от 482 до 655 МПа. Кроме того, операция отжига заготовок фитинга должна проводиться в вакууме, с тем, чтобы максимальное содержание водорода не превышало 10 ppm

Независимо от схемы пластической деформации, наилучшие результаты для образования плотного контакта "металл-металл" обеспечивают следующие комбинации материалов для фитингов и труб:

- для титанового фитинга (BT1-0) использовать трубы из титанового сплава Ti-3Al-2.5V (AMS4944, AMS4945).

- для алюминиевого фитинга использовать трубы из алюминиевого сплава АД 33 по ГОСТ 4784-97, для фитинга из нержавеющей стали 07X21Г7, ГОСТ 5632-72 (сталь 21-6-9, AMS5561) использовать трубы из следующих материалов: алюминиевый сплав АД33, ГОСТ 4784-97 (6061-T6 Al), или сталь 07X21Г7, ГОСТ 5632-72 ( 21-6-9 SS, AMS 5561), или титановый сплав Ti-3Al-2.5V, или сталь 08 X18 H10, ГОСТ 5949-75 (304 1/8HD SS)

Более подробная информация о сочетании материалов фитингов и труб для различных схем пластической деформации представлены в таблицах 1- 3 [8-12].

Табл. 1. Материалы для радиально сжатых соединений

Вид материала фитинга	Материал фитинга*	Материал трубы*	Максимальное рабочее давление, psi (МПа)**
Нержавеющая сталь	07X21Г7, ГОСТ 5632-72  (21-6-9, AMS5656)	07X21Г7, ГОСТ 5632-72 (21-6-9, AMS5561)	3000 (20,70)
		08 X18 H10, ГОСТ 5949-75 (304 1/8HD, AMS5564)	
		Титановый сплав (Ti-3Al-2.5V, AMS4944)	
	АД33, ГОСТ 4784-97 (6061-T6, AMS4083)		
	03X17H14M3 ГОСТ 5632-72	08 X18 H10, ГОСТ 5949-75 (304 1/8HD, AMS5564)	3000 (20,70)

	(316L, AMS5648)		
		08X18H12T, 08X18H10T, ГОСТ 5632-72 (321, AMS5556)	3000 (20,7)
Алюминиевый сплав	АД33, ГОСТ 4784-97 (6061-T6, overage)	АД33, ГОСТ 4784-97 (6061-T6, AMS4083)	1500 (10,3)
Титан	Титан (CP-Titanium, AMS 4941)	Титановый сплав (Ti-3Al-2.5V, AMS4944)	4000 (27,6)

\* в скобках приведена маркировка США

\*\* Определяется в зависимости от наружного диаметра и толщины стенки трубы

Табл. 2. Материалы для аксиально обжатых МАФ-соединений

Вид материала фиттинга	Материал фиттинга*	Материал трубы*	Максимальное рабочее давление, psi (МПА) **
Нержавеющая сталь	07X21Г7, ГОСТ 5632-72  (21-6-9, AMS5656)	07X21Г7, ГОСТ 5632-72 (21-6-9, AMS5561)	4000 (27,6)
		08 X18 H10, ГОСТ 5949-75 (304 1/8HD, AMS5564)	3000 (20,7)
		Титановый сплав (Ti-3Al-2.5V, AMS4944)	5000 (34,5)
		АД33, ГОСТ 4784-97 (6061-T6, AMS4083)	1500 (10,3)
Алюминиевый сплав	АД33, ГОСТ 4784-97 (6061-T6, overage)	АД33, ГОСТ 4784-97 (6061-T6, AMS4083)	1500 (10,3)
Титан	Титановый сплав (Ti-6Al-4V, AMS 4928)	Титановый сплав (Ti-3Al-2.5V, AMS4944)	4000 (27,6)

\* в скобках приведена маркировка США

\*\* Определяется в зависимости от наружного диаметра и толщины стенки трубы

Табл. 3. Материалы для радиально-аксиально сжатых соединений

Вид материала	Материал фиттинга*	Материал трубы*	Максимальное рабочее давление, psi (МПа) **
Нержавеющая сталь	07X16H4Д4Б, ГОСТ 5632-72 (17 – 4PH, AMS5643)	Титановый сплав (Ti-3Al-2.5V, AMS4945)	2000 – 4000 (13,8 – 27,6)
	07X21Г7, ГОСТ 5632-72 (21-6-9, AMS5656)	07X21Г7, ГОСТ 5632-72 (21-6-9, AMS5561)	3000 (20,7)
		304 1/8HD (AMS5564)	1500 – 3000 (10,3 -20,7)
		Титановый сплав (Ti-3Al-2.5V, AMS4945)	500 – 5000 (3,4-34,4)
		Титан (CP-Titanium, ASTM B338)	750 (5,2 )
	АД33, ГОСТ 4784-97 (6061-Т6, AMS4083)	500 – 1500 (3,4-10,3)	
Титан	Титановый сплав (Ti-6Al-4V, AMS 4928)	Титановый сплав (Ti-3Al-2.5V, AMS4945)	3000 (20,7)

\* в скобках приведена маркировка США

\*\* Определяется в зависимости от наружного диаметра и толщины стенки трубы

## Выводы

1. Представлен анализ материалов и современных технологий производства неразъемных соединений методом холодной пластической деформации

2. Обсуждены теоретические основы формирования механических соединений и роли фактора упругого последствия.

3. Представлен анализ сочетаний материалов для контактирующих пар, используемых для формирования механических соединений, которые гарантируют высокую надежность гидравлических трубопроводов высокого давления (27,6-34,5 МПа).

## Библиографический список

1. ASTM F1387-99 Standard Specification for Performance of Piping and Tubing Mechanically Attached Fittings. 2005.
2. Lokring technology. – URL: <http://www.sabtek.co.uk> (19.10.2017).
3. Products. – URL: <http://www.dmcusa.com> (19.10.2017).
4. SAE AS4459, Fittings, Tube, Fluid System Aerospace Standard. Externally Swaged.



5. Zhen L., Cui Y. X. & Shao W. Z. *Materials Science and Engineering* / L. Zhen, Y. X. Cui, W. Z. Shao. – 2002. – vol. 336, – Iss. 1-2, pp.135-142.
6. Радкевич М. М. Технология упрочняющей программной механико-термической обработки / М. М. Радкевич. – СПб: Издательство Политехнического университета, 2011. – 263 с.
7. ASM Handbook, vol. 20, Materials Selection and Design. 293 p.
8. ASTM Designation: A370-07a Standard Test Methods and Definition for Mechanical Testing of Steel Products
9. ASTM Designation: E8-04 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
10. ASM International. Metals Handbook.
11. Сорокин В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
12. Смирнягин А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы. Справочник / А. П. Смирнягин. – М.: Издательство "Металлургия". – С. 1–974.

## References

1. ASTM F1387-99 Standard Specification for Performance of Piping and Tubing Mechanically Attached Fittings. 2005.
2. Lokring technology. – URL: <http://www.sabtek.co.uk> (19/10/2017).
3. Products. – URL: <http://www.dmcusa.com> (19/10/2017).
4. SAE AS4459, Fittings, Tube, Fluid System Aerospace Standard. Externally Swaged.
5. Zhen L., Cui Y. X. & Shao W. Z. *Materials Science and Engineering*, vol. 336, Issues 1-2, 2002, p.135-142.
6. Radkevich M. M. *Tekhnologiya uprochnyayushchej programmnoj mekhaniko-termicheskoj obrabotki* [Technology of hardening programmed mechanical heat treatment]. St. Petersburg, 2011. 263 p. (In Russian)
7. ASM Handbook, vol. 20, Materials Selection and Design. 293 p.
8. ASTM Designation: A370-07a Standard Test Methods and Definition for Mechanical Testing of Steel Products
9. ASTM Designation: E8-04 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
10. ASM International. Metals Handbook.
11. Sorokin V. G., Volosnikova A. V. & Vyatkin S. A. *Marochnik stalej i splavov* [Grades of steels and alloys of steels and alloys]. Moscow, 1989. 640 p. (In Russian)
12. *Promyshlennye cvetnye metally i splavy. Spravochnik* [Industrial nonferrous metals and alloys. Reference]. Moscow, 1974. (In Russian)

**Сведения об авторах:**

КОГАН Яков Давидович, доктор технических наук, AR Materials Solution, Inc.

E-mail: yakovkogan@sbcglobal.net

БОГДАНОВА Наталья Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры ТМиМ, Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова E-mail: nabo146@mail.ru

**Information of author:**

Yakov D. KOGAN, Doctor of Technical Sciences, AR Materials Solution, Inc.

E-mail: yakovkogan@sbcglobal.net

Natal'ya V. BOGDANOVA, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of TMM, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

E-mail: nabo146@mail.ru

## Раздел 2. БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 621.3:331.45+629.439.027.34

С. М. Аполлонский  
ООО «Центр электромеханотроники»  
(Санкт-Петербург, Россия)

Дата поступления: 06.07.2017

Решение о публикации: 28.10.2017

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОМ МАГЛЕВ ТРАНСПОРТЕ**

**Аннотация. Введение.** Высокоскоростной наземный транспорт МАГЛЕВ создаёт при движении электромагнитные помехи широкого частотного спектра. Они распространяясь как в окружающей внешней среде, так и внутри самого транспорта, могут превышать по уровню величины, установленные «Техническим регламентом о безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта».

**Цели и задачи.** Цель исследования – снижение электромагнитных помех при помощи соответствующего синтезирования электроэнергетической установки.

Кроме того, в процессе синтеза элементов электроэнергетической установки возникают задачи оптимизации размещения источников полей в областях с изменяемыми геометрическими характеристиками.

**Методология.** Для решения задачи необходимо иметь, с одной стороны, метод расчета электромагнитных помех от источников электроэнергетической установки, а с другой - методы формализации и алгоритмы решения оптимизационных задач размещения.

Отметим, что математическая постановка большинства задач оптимального размещения источников приводит к нелинейным задачам математического программирования специального вида. Особенности такого класса задач не позволяют воспользоваться известными методами математического программирования. Рассматриваемый класс задач относится к задачам оптимизации систем многосвязного управления.

Ниже рассмотрен алгоритм оптимизационной задачи размещения элементов электроэнергетической установки, с целью минимизации суммарных помех, излучаемых в окружающее пространство. Поиск решения оптимизационной задачи стал возможным благодаря: введению скалярных потенциалов для описания электромагнитных помех элементов установки; введению функций взаимовлияния, учитывающих влияние соседних источников; разработке экранирующих функций в виде разложений по гармоникам; использованию теорем сложения, позволяющих решения уравнений представлять в разных системах координат.

Заметим, что корректная постановка и решение обратной задачи возможна только при условии, если разработаны достаточно хорошие методы решения соответствующих прямых краевых задач.

**Ключевые слова:** высокоскоростной железнодорожный транспорт, транспорт МАГЛЕВ, электромагнитные помехи и излучения в техносфере, рациональная компоновка элементов электроэнергетической системы МАГЛЕВ транспорта.

UDC 621.3:331.45+629.439.027.34

S. M. Apollonskiy

Ltd. "Center of Elektromehanotroniki"

(St. Petersburg, Russia)

## ENSURING ELECTROMAGNETIC SAFETY AT HIGH-SPEED MAGLEV TRANSPORT

**Annotation.** High-speed ground maglev transport creates electromagnetic interference of wide frequency spectrum during the movement. Electromagnetic interference spreads both in the surrounding environment and within the transport itself.

Mathematically, electromagnetic interference is a vector (and in some cases tensor) field, where the functions are magnetic and electrical tenseness.

**Purpose.** The purpose of the work is to ensure electromagnetic safety of high-speed ground maglev transport's technical means and people (passengers and staff) by means of optimisation synthesis.

**Objective.** The objective of the works is to optimise the placement of field sources in areas with variable geometric characteristics.

**Methodology.** The method of the work is to synthesise elements of an energy system whose characteristics depend on the behaviour of electromagnetic interference. The mathematical model of the energy system being designed should take into account technological and constructive constraints, and electromagnetic interference.

Calculation of electromagnetic interference from several sources in the premises, where the energy system is located by means of solving nonlinear tasks of special type mathematical programming. The peculiarities of this type of problems do not allow using known methods of mathematical programming. Finally, methods of formalisation and algorithms for solving optimisation problems of placement.

**Practical significance.** The search of solution of optimisation tasks became feasible owing to a number of suggestions put forward by the author: introduction of scalar potentials for describing external electromagnetic interference of the electric power plant elements; the introduction of interinfluence taking into account the influence of closely-located sources; development of screening functions in the form of harmonic decompositions; the application of addition theorems which enable describing solutions of mathematical physics equations in different coordinate systems.

**Conclusion.** The suggested method of formation of maglev transport electric energy system may be useful.

**Key words:** high-speed railway transport, maglev transport, electromagnetic interference and radiation in the technosphere, rational layout of elements in the electric power system of maglev transport.

## Введение

Высокоскоростной наземный транспорт (ВСНТ) в современном понимании - это железнодорожный транспорт, обеспечивающий движение со скоростью более 200 км/ч. ВСНТ осуществляется либо колесным подвижным составом по рельсовому пути, либо бесконтактным способом, когда для тяги и торможения применяется линейный электрический привод, а для создания условий движения - магнитный подвес, так называемый левитирующий транспорт. Таковым является ВСНТ МАГЛЕВ.

Для ВСНТ МАГЛЕВ создается специальная путевая структура. Как правило, строят искусственные сооружения (эстакады), на которых создают путевую структуру со станциями и ограждениями. ВСНТ с магнитным подвесом является наиболее перспективным и экологически чистым, а также самым бесшумным. При его проектировании и определении стоимости строительства и эксплуатации исходят из позитивных влияний на уровень затрат следующих факторов: высокий темп и экономичность сооружения; большая степень стандартизации и взаимозаменяемости элементов и узлов пути, его надежность, стабильность, долговечность; предельная индустриализация изготовления путевых конструкций; возможность механизации и автоматизации процессов сборки, отладки и пуска в эксплуатацию всей системы; высокая степень безопасности и возможность максимальной автоматизации движения.

Вместе с тем, при движении ВСНТ МАГЛЕВ создаёт помехонесущие ЭМП широкого частотного диапазона, распространяющиеся как в окружающей внешней среде, так и внутри самого движущегося средства [1].

В математическом аспекте ЭМП представляют собой векторные (а в отдельных случаях и тензорные поля), где функциями являются магнитные и электрические напряженности. Возникает задача по обеспечению электромагнитной безопасности (ЭМБ) ВСНТ МАГЛЕВ.

Технический регламент о безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта [2] устанавливает минимально необходимые требования к ВСНТ, выполнение которых обеспечивает ЭМБ, виброакустическую безопасность и др. Эти требования относятся и к ВСНТ МАГЛЕВ, ЭМП которого, рассеиваемые в окружающей среде, могут быть соизмеримыми с ЭМП рельсового ВСНТ.

При обеспечении проблемы ЭМБ каждое из устройств электроэнергетической установки (ЭЭУ) ВСНТ МАГЛЕВ следует рассматривать как элемент некоторой подсистемы, в которой проявляются негативные связи (электрические и магнитные) этого элемента с другими. Такой подход позволяет рассматривать проблему ЭМБ как общую проблему при исследовании источников и рецепторов ЭМП, выделяя в них соответствующие признаки, которым ранее не придавалось значения. ЭМБ

представляет собой область науки и техники, развитие которой тесно связано с электротехникой и электроникой.

Для снижения негативного воздействия ЭМП на техносферу как внутри ВСНТ МАГЛЕВ, так и вне его, необходимо соответствующим образом синтезировать его ЭЭУ.

В процессе синтеза элементов ЭЭУ, характеристики которых зависят от поведения ЭМП, возникают задачи оптимизации размещения источников ЭМП в областях с изменяемыми геометрическими характеристиками. В связи с этим важно, чтобы математическая модель проектируемого устройства, кроме технологических и конструктивных ограничений, одновременно учитывала и отмеченные выше факторы.

Миниатюризация оборудования, а также увеличивающаяся сложность, интеграция и взаимодействие элементов приводят к тому, что электронные установки и компоненты становятся более уязвимыми к внешним электромагнитным воздействиям. Повышение энерговооруженности транспортного средства, каковым является ВСНТ МАГЛЕВ, более высокие токи, напряжения и уровни мощности оборудования увеличивают уровень ЭМП помех, а интегрирование и взаимопроникновение силовых и информационных компонентов внутрь оборудования приближает источники помех к приборам и устройствам, которые могут быть чувствительны к ним. Поэтому возникает задача обеспечения безопасности, надежности и качества функционирования всех типов оборудования и систем там, где они используются. Если эта задача выполнена, то говорят, что обеспечена ЭМБ ЭЭУ со средой, в которой они размещаются.

Обеспечение ЭМБ требует рассматривать два аспекта проблемы: влияние электротехнического и электронного оборудования на системы электропитания и сети электроснабжения и влияние ЭМП помех различного происхождения на функционирование электронных компонентов систем управления, связи и обработки информации.

Обеспечение ЭМБ имеет не только теоретическое, но и экономическое значение. Например, качественное функционирование элементов инфраструктуры ВСНТ МАГЛЕВ зависит от информационно-управляющих систем, поэтому безотказность электронных систем является также экономическим фактором первостепенной важности. Это объясняет тот факт, что стандарты и требования, относящиеся к ЭМБ, признанные во всем мире или согласованные на региональном уровне, приветствуются изготовителями и пользователями электрического и электронного оборудования, в то время как другие стандарты иногда рассматриваются как мешающие функционированию предприятия.

Стандарты ЭМБ являются предпосылкой к обеспечению того, что многочисленные виды электронного оборудования не окажут влияния друг на друга или, еще хуже, не вызовут катастрофических нарушений

функционирования оборудования. Они устанавливают требования для оборудования как в отношении максимально допустимой эмиссии паразитных излучаемых и кондуктивных ЭМП помех, так и работоспособности оборудования в условиях влияния этих помех.

Стандарты - только один аспект проблем, связанных с обеспечением ЭМБ. Они устанавливают общие требования к качеству функционирования в условиях помех, которым должны соответствовать изделия, но обеспечение выполнения их требований остается за изготовителями. Однако требования стандартов могут выполняться только в том случае, если существуют необходимые технические знания, навыки и решения, касающиеся обеспечения ЭМБ.

### **Оптимальное проектирование и размещение элементов ЭЭУ**

С целью снижения загрязнения окружающей среды ЭМП при проектировании ЭЭУ ВСНТ МАГЛЕВ до нормативных значений можно поставить задачу о рациональном размещении источников ЭМП ЭЭУ. Такой подход позволит сформировать структуру помехонесущего ЭМП от ЭЭУ в пределах нормативных документов. Особое значение такой подход приобретает в связи с тем, что ЭЭУ ВСНТ МАГЛЕВ находится в металлическом корпусе, который является экранирующей структурой, но недостаточной для существенного снижения помехонесущих ЭМП во внешнем пространстве.

Применение для поддержания ЭМП в заданных пределах дополнительных активных и пассивных экранов не всегда возможно из-за больших габаритов и весов последних и из-за конструктивно-технологических трудностей их создания и размещения. Поэтому на первое место выступает задача рационального размещения элементов ЭЭУ внутри энергетического помещения. Такой подход может решить проблему снижения помехонесущих ЭМП от ЭЭУ ВСНТ МАГЛЕВ до требований ЭМБ.

Для решения подобной задачи необходимо иметь, с одной стороны, метод расчета ЭМП от нескольких источников, расположенных в пределах энергетического помещения, а с другой - методы формализации и алгоритмы решения оптимизационных задач размещения [3].

Выяснение вопросов оптимального размещения источников ЭМП, имеющих определенные геометрические и энергетические характеристики, имеет значение для практики проектирования ЭЭУ. При этом поиск наилучшего размещения источников ЭМП должен осуществляться с учетом ограничений как на характер ЭМП, так и на местоположение источников поля.

Разработке математических моделей и методов решения задач о размещении источников физических полей посвящена работа [4]. Однако, в

ней не затрагивались вопросы размещения источников ЭМП. Отдельные вопросы, связанные с оптимизацией размещения источников ЭМП, рассматривались лишь в работах по проектированию радиоэлектронной аппаратуры [5].

Отметим, что математическая постановка большинства задач оптимального размещения источников ЭМП приводит к нелинейным задачам математического программирования специального вида. Особенности такого класса задач не позволяют воспользоваться известными методами математического программирования. Кроме того, поиск оптимального размещения источников необходимо осуществлять с учетом их взаимовлияния, т.е. рассматриваемый класс задач относится к задачам оптимизации систем многосвязного управления [6]. При этом взаимовлияние обусловлено физическими свойствами управляемого объекта, и применение принципов автономности [7] затруднено.

Следует помнить, что разработка методов и алгоритмов решения задач оптимального размещения источников физических полей, а также создание соответствующего математического обеспечения (комплекса программ) имеет значение для всех областей, в том числе и электродинамики. Это связано с тем обстоятельством, что во многих областях инженерной практики возникают задачи оптимального размещения объектов, являющихся источниками соответствующих физических полей или влияющих на характер протекания физических процессов. Тем не менее, задачи оптимального размещения источников ЭМП мало затронуты в публикациях [8-9].

ЭМП элементов ЭЭУ, создаваемые большим числом источников различной напряженности и геометрической формы, являются весьма сложными по своей структуре. При этом обеспечение ЭМБ группы элементов имеет значение, поэтому поиск конструктивной топологии элементов часто приходится осуществлять на множестве тех вариантов, которые удовлетворяют условиям ЭМБ ЭЭУ.

Ниже рассмотрены задачи оптимизации ЭМП группы источников в экранирующих структурах с учетом их рационального размещения. Решение таких задач стало возможным, благодаря ряду предложений, внесенных автором доклада: введения скалярных потенциалов для описания внешних ЭМП элементов ЭЭУ; введения функций взаимовлияния, учитывающих влияние соседних источников; разработки экранирующих функций в виде разложений по гармоникам; использования теорем сложения, позволяющих решения уравнений математической физики представлять в разных системах координат [3].

Заметим, что задачи, к рассмотрению которых мы приступаем, являются обратными. Их корректная постановка и решение возможны только при условии, если разработаны достаточно хорошие методы решения соответствующих прямых краевых задач.



## Источники ЭМП

Прежде чем перейти к аналитической формулировке основной задачи размещения источников ЭМП, введем определения и понятия, используемые в дальнейшем.

Источник ЭМП характеризуется геометрическими и энергетическими параметрами. Он представляет собой на практике объект определенной геометрической формы, характеризуется трехмерным пространственным телом. Основные определения, связанные с такими телами, приведены в [4].

Источником ЭМП назовем финитную функцию, представляющую собой замкнутый  $\Phi$  - объект. Если геометрическая форма  $i$ -го источника ЭМП  $S_i (i \in [1, N])$  характеризуется в пространстве  $R^3$ , а его напряженности непрерывно меняются во времени  $t$ , то источник описывается функцией

$$\Phi(x_1, x_2, x_3, t) = \begin{cases} \Phi_i^*(x_1, x_2, x_3, t), (x_1, x_2, x_3) \in S, \\ 0, \forall (x_1, x_2, x_3) \in V \setminus S. \end{cases} \quad (1)$$

Импульсный источник поля, действующий в промежутке времени  $\Delta t$ , представляется в виде

$$\Phi(x_1, x_2, x_3, t) = \begin{cases} \Phi_i^*(x_1, x_2, x_3, t), (x_1, x_2, x_3) \in S, t < \Delta t, \\ 0, (x_1, x_2, x_3) \in V \setminus S, \\ 0, (x_1, x_2, x_3) \in V, t \bar{\in} \Delta t. \end{cases} \quad (2)$$

В последнем случае имеет место пространственно-временной источник  $[S_i, \Delta t]$ .

Для упрощения рассмотрения в дальнейшем используются трехмерные  $\Phi$  - объекты, задающиеся в пространстве в виде сфер или круговых цилиндров.

## Основная оптимизационная задача

Необходимо в области  $V$  разместить источники ЭМП, имеющие определенные геометрические и энергетические характеристики так, чтобы удовлетворить наперед заданным условиям и сообщить некоторой функции цели (качества) экстремальное значение. При этом могут быть решены подзадачи об определении числа источников ЭМП, их напряженностей и геометрических форм, а также формы области, в которой осуществляется размещение источников ЭМП. В отличие от задач размещения геометрических объектов, где область размещения ограничивает пределы возможного изменения параметров положения источников, в задачах размещения источников ЭМП на практике встречаются случаи, когда источники ЭМП находятся вне области, в которой осуществляется контроль ЭМП. По условию основной задачи на характер ЭМП и местоположение источников ЭМП накладываются условия [4, 8]:

- на характеристики результирующего ЭМП группы источников,
- на взаимное расположение источников ЭМП,
- на возможное местоположение источников ЭМП в заданной области (или за ее пределами).

Критерии оптимизации, по которым осуществляется размещение источников, могут включать:

- экстремальные характеристики значений ЭМП,
- значения ЭМП в заданной системе точек,
- объем области, в которой размещаются источники ЭМП с учетом ЭМС,
- число источников ЭМП,
- характеристики проектируемых элементов ЭЭУ, зависящие от формы ЭМП.

Из сказанного следует, что для математической постановки основной оптимизационной задачи необходимо представить соответствующие функции цели и системы ограничений в виде некоторых математических соотношений.

Основная оптимизационная задача размещения источников ЭМП может быть классифицирована по форме области, в которой осуществляется размещение, по виду источников ЭМП и типу их размещения, по функциям цели, по характеру ограничений и т.д. При этом следует учитывать, что источники ЭМП размещаются произвольно (нерегулярно), различаются геометрической формой и интенсивностью, т.е. видом финитной функции.

### Математическая модель задачи

ЭМП источников в окружающей их области  $V$  (рис. 1), может быть описано с помощью уравнений Максвелла, которые для низкочастотного ЭМП ( $f < 5000$  Гц) приводятся к неоднородному уравнению Лапласа для скалярного потенциала  $v$  [3]:

$$\Delta v = \Phi_1, \quad (3)$$

либо к неоднородному уравнению Гельмгольца при высоких частотах ( $f > 5000$  Гц) для двух скалярных потенциалов  $[T \in (u, v)]$  [3]:

$$\Delta T + k^2 T = \Phi_2. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) могут быть объединены в виде:

$$LT = \Phi, \quad (5)$$

где  $L$  - дифференциальный оператор уравнения,  $\Phi = [\Phi_1, \Phi_2]$ - функции, характеризующие распределение источников ЭМП в области  $V$ .

Уравнение (5) должно быть дополнено условиями на участках  $\Gamma_j (j = 1, 2, \dots)$  границы  $\Gamma$  области  $V$ :

$$B_j T|_{\Gamma_j} = \varphi_j (j = 1, 2, \dots), \quad (6)$$

где  $B_j$ - операторы граничных и начальных условий,  $\varphi_j$ - заданные функции.

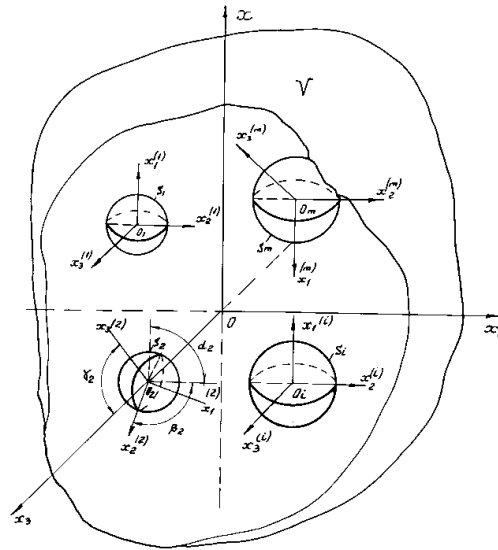


Рис. 1. Схема размещения элементов ЭЭУ

По существу, требуется найти распределение источников  $\Phi$  по условиям, определенным назначением, условиями эксплуатации и конструкцией ЭЭУ.

В обл.  $V$  (рис. 1) необходимо разместить источники ЭМП ( $i \in [1, m]$ ), полюса  $O_i$  которых принадлежат источникам  $i$  и имеют координаты  $x_1, x_2, x_3$ .

Местоположение источников  $S_i$  в обл.  $V$  относительно неподвижной системы координат  $x_1, x_2, x_3$ , связанной с обл.  $V$ , определяется вектором

$$\{x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i; \dots; x_1^{(m)}, x_2^{(m)}, x_3^{(m)}, \alpha_m, \beta_m, \gamma_m\}, \quad (7)$$

где  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  ( $i \in [1, m]$ ) - углы ориентации  $i$ -го источника (углы Эйлера).

Ограничения на характер ЭМП в общем случае представляются в виде неравенств

$$D_k T(x_1, x_2, x_3, t, \vec{Z})|_{V_k} \leq (\geq) T_k, (k \in [1, p]), \quad (8)$$

где  $D_k$ - некоторый оператор,  $T$ - скалярные потенциалы ЭМП, описываемые задачей (5)-(6),  $T_k$ - заданные функции,  $V_k \in V$ ,  $x_1, x_2, x_3$  - координаты текущей точки.

Частным случаем ограничений (8) являются условия на количественные характеристики ЭМП в заданной системе точек

$$T(x_1, x_2, x_3, t, \vec{Z})|_{p_k} \leq (\geq) T_k^* (k \in [1, p]), \quad (9)$$

где  $p_k$ - точки контроля характеристик ЭМП с координатами  $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}$  ( $k \in [1, p]$ ). Контроль характеристик ЭМП может осуществляться как непрерывно во времени, так и в заданные его промежутки.

Кроме ограничений, наложенных на качественные или количественные характеристики ЭМП, в процессе поиска вектора  $\vec{Z}$  необходимо удовлетворить условиям размещения источников ЭМП внутри  $V$ . К таковым относятся условия: а) взаимного размещения источников ЭМП, б) принадлежности источников ЭМП области  $V$ , в) непересечения источников ЭМП с областями запрета  $k_t \in V (t = 1, 2, \dots)$ .

Если между источниками ЭМП  $S_i$  и  $S_j$  задано кратчайшее расстояние  $l_{ij}$ , между источниками ЭМП  $S_i$  и границей  $\Gamma$  обл.  $V$  - расстояние  $l_i$ , а между источниками  $S_i$  и границей  $k_t$  области запрета  $K_t$  расстояние  $l_{it}$ , то условия а), б), в) представляются, соответственно, в виде соотношений:

$$\rho_{ij}(S_i, S_j) - l_{ij} \geq 0, (i = j; i, j = 1, 2, \dots, m), \quad (10)$$

$$\rho(R^3 \setminus V, S_i) - l_i \geq 0, (i = 1, 2, \dots, m), \quad (11)$$

$$\rho_{it}(S_i, k_t) - l_{it} \geq 0, (i \in [1, m], t \in [1, n]), \quad (12)$$

где  $R^3$  - трехмерное евклидово пространство,  $\rho_{ij}, \rho_i, \rho_{it}$  - кратчайшие расстояния, соответственно, между источниками  $S_i$  и  $S_j$ , между границей  $\Gamma$  обл.  $V$  и источником  $S_i$ , и между границей  $k_t$  области запрета  $K_t$  и источником  $S_i$ .

Ограничения на местоположение источников ЭМП в обл.  $V$  представляются неравенствами:

$$f_{ij}(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i; x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, x_3^{(j)}, \alpha_j, \beta_j, \gamma_j; l_{ij}) \geq 0, (i \neq j; i, j \in [1, m]) \quad (13)$$

$$\phi_i(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i; l_i) \geq 0, (i \in [1, m]), \quad (14)$$

$$\eta_{it}(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i; l_{it}) \geq 0, (i \in [1, m], t \in [1, m]). \quad (15)$$

В общем случае функция цели  $\vec{Z}$  зависит от искомого вектора и представляется как

$$\chi(\vec{Z}) = \chi(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1; x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2; \dots; x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i; \dots; x_1^{(m)}, x_2^{(m)}, x_3^{(m)}, \alpha_m, \beta_m, \gamma_m). \quad (16)$$

Общая оптимизационная задача размещения источников сводится к поиску экстремума функции цели (16) с учетом ограничений (9) и условий (13)-(15), т.е. к нахождению

$$Extr[\chi(\vec{Z})], \vec{Z} \in W, \quad (17)$$

где  $W$  - область, определяемая системой неравенств (9), (13)-(15).

Из общего вида основной оптимизационной задачи (17) можно сделать вывод, что математическая модель, адекватно описывающая ее, относится к классу задач математического программирования. В результате решения задачи вида (17) определяется вектор  $\vec{Z}$ , характеризующий местоположение источников в обл.  $V$ .

Следует отметить особенности основной оптимизационной задачи, вытекающие из ее общей математической постановки (17). Пространство

параметров, в котором необходимо определить экстремальное значение функции цели  $\chi(\vec{Z})$  основной задачи, имеет размерность  $6m$ , где  $m$  - число размещаемых источников. В случае ориентированных источников искомым вектор  $\vec{Z} \in R^{3m}$ . На практике общее число источников  $m \gg 1$ , это приводит рассматриваемый класс задач к задачам большой размерности.

Количество неравенств (9), (13)-(15), описывающих область определения  $W$  функции цели  $\chi(\vec{Z})$ , зависит квадратично от числа размещаемых источников и равно не менее чем  $N = (0,5m)(m-1) + m(n+1) + p$ , где  $m$  - число размещаемых источников,  $n$  - число областей запрета  $k_i (i \in [1, n])$ ,  $p$  - число ограничений на характер ЭМП.

Каждое неравенство вида (9) в общем случае связывает не менее чем  $6m+4$  переменных, а неравенства вида (13)-(15) не менее 12 и 6 переменных, соответственно.

Ограничения, наложенные на ЭМП вида (8) или (9), представляются с помощью функций  $T$ , свойства которых во многом определяются видом краевой задачи (5)-(6) и методом ее решения. В том случае, если решение краевой задачи (5)-(6) ищется одним из вариационных методов, например методом Ритца, то функции  $T$  представляют собой ряды, членами которых являются специальные функции, их вид и число определяется точностью решения краевой задачи.

Поиск оптимального размещения источников ЭМП необходимо осуществлять на основе решения соответствующих задач математической физики, поскольку результирующее поле группы источников ЭМП зависит от местоположения каждого из источников. Размещение источников ЭМП осуществляется при учете взаимовлияния полей источников. Эта особенность позволяет сделать вывод: рассматриваемый класс задач относится к задачам оптимизации систем многосвязного управления [10].

Основная оптимизационная задача (17) относится к задачам оптимизации систем с распределенными параметрами, поскольку ЭМП описывается краевой задачей (5)-(6), основное уравнение (5) которой является дифференциальным уравнением в частных производных. Состояние управляемой системы определяется функциями  $T(x_1, x_2, x_3, t)$ . В качестве управляющей выступает функция  $\Phi(x_1, x_2, x_3, t)$ , характеризующая распределение источников в обл.  $V$ . Область допустимых состояний системы определяется краевой задачей (5)-(6) и ограничениями на функцию состояния в виде условий (8)-(9).

Из-за того, что по условию постановки основной оптимизационной задачи искомой функцией является правая часть основного уравнения (5) краевой задачи (5)-(6), исследуемый класс задач относится к задачам математической физики.

Учитывая, что размещение источников осуществляется с учетом системы ограничений, наложенной на качественные или количественные

характеристики поля, данный класс задач примыкает к задачам идентификации сложных систем.

Чтобы предложить общую схему решения основной задачи, требуется построить неравенства вида (9) и (13)-(16), т.е. неравенства, определяющие область допустимых решений  $W$ , т.к. характер области (выпуклость, вогнутость; линейность, нелинейность, дифференцируемость функций, определяющих поверхность области  $W$ , связность и т.д.) непосредственно влияет на выбор методов решения задачи.

**Алгоритм нерегулярного размещения источников ЭМП.** При построении алгоритма решения задачи (17) можно воспользоваться материалами [4, 8]. Основные этапы состоят в формализации задачи; в синтезе допустимых размещений векторов  $\vec{Z} \in W$ ; в поиске локального экстремума; в переборе локальных экстремумов; в выделении глобального значения функций цели и соответствующего вектора размещения  $\vec{Z}$ .

**Формализация задачи.** Математические трудности, связанные с расчетом ЭМП, обусловлены видом оператора уравнения задачи, граничными и начальными условиями, геометрической формой области, в которой предполагают разместить источники ЭМП, их формой и т.д. Кроме того, для аналитического представления ограничений на поведение ЭМП метод решения краевой задачи должен позволить представить решение в виде единого аналитического выражения, включающего параметры размещения источников ЭМП.

В ряде случаев целесообразно представлять решение на основе вариационного метода Ритца.

**Синтез допустимых размещений.** Этот этап решения задачи рекомендуется [8] разбивать на два. Это связано с тем, что система неравенств, описывающая область  $W$ , состоит из двух разных по природе ограничений: на размещение источников ЭМП в обл.  $V$  и на результирующее поле.

Удобнее всего использовать метод последовательного одиночного размещения источников, позволяющий получать размещение, удовлетворяющее ограничениям (13)-(15). Его сущность состоит в том, что каждому из размещаемых источников ЭМП ставятся в соответствие числа из натурального ряда. Согласно последовательности номеров источников осуществляется размещение источников ЭМП по одному. Ранее размещенные источники считаются неподвижными с фиксированными параметрами размещения. Каждый источник размещается так, что из всех его возможных положений выбирается такое, при котором выполняется некоторое дополнительное условие, связанное с особенностями решаемой задачи.

Применение способа последовательно одиночного размещения избавляет от необходимости одновременной проверки выполнения неравенств (13)-(15). При таком способе размещения проверяются только те

ограничения, в которые входят параметры источников ЭМП. Например, если очередным размещаемым источником ЭМП является  $S_j$ , то осуществляется проверка выполнения только неравенств:

$$\begin{aligned}\varphi_{ij}(\vec{X}_i^*, \vec{X}_j, l_{ij}) &\geq 0, (i \in [1, j-1]), \\ \varphi_j(\vec{X}_j, l_j) &\geq 0, \\ \eta_{it}(\vec{X}_j, l_{it}) &\geq 0, (t \in [1, n]),\end{aligned}\tag{18}$$

где  $\vec{X}_i^* = \{x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i\}$  - вектор параметров размещенного источника ЭМП;  $\vec{X}_j$  - вектор параметров размещаемого источника;  $S_j, l_{ij}, l_j, l_{ji}$  - кратчайшие допустимые расстояния. Видно, что число ограничений меньше, чем ранее.

После размещения источников с учетом ограничений (13)-(15) для найденного вектора  $\vec{Z}$  осуществляется решение задачи (5)-(6). Здесь может использоваться генератор программ, позволяющий решать задачи (5)-(6) для областей сложной формы с набором граничных условий.

**Поиск локального экстремума.** Методика коррекции вектора  $\vec{Z}$  как на этапе поиска  $\vec{Z} \in W$ , так и при определении локального экстремума, зависит в основном от конкретной задачи. В случае, если методика коррекции вектора  $\vec{Z}$  не позволяет найти вектор  $\vec{Z} \in W$ , осуществляется генерирование новой последовательности размещения источников.

Изложенный способ поиска вектора  $\vec{Z} \in W$  дает возможность задавать начальную точку оптимизационного процесса в виде последовательности групп переменных. Это, в свою очередь, позволяет все множество различных значений функции цели ставить во взаимно-однозначное соответствие множеству  $\Pi$  перестановок  $\pi$ , каждая из которых состоит из  $n$  чисел, где  $n \leq m$ , а  $m$  - число размещаемых источников ЭМП. Множество  $\Pi$  возможно метризовать и проводить последующие рассуждения в пространстве перестановок.

**Перебор локальных экстремумов.** Из-за того, что значения функции цели задачи зависят не только от местоположения источников, а и от последовательности их размещения, в процессе поиска рационального значения функции цели задачи необходимо осуществлять перебор последовательности размещения источников, которая заключается в следующем [11]:

На первом этапе выбирается случайная перестановка  $\pi_0 \in \Pi$ , осуществляется поиск  $\vec{Z} \in W$  и вычисляется рациональное значение  $\chi_0$  функции цели  $\chi$  (16). Затем случайно выбирается новая перестановка  $\pi_1 \in \Pi$  и снова вычисляется  $\chi_1$  и т.д. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет найдена перестановка  $\pi_i \in \Pi$ , для которой выполняется неравенство  $\chi_i < (>) \chi_0$ .

В полученной перестановке  $\pi_i$  случайно меняется  $\nu$  чисел и формируется новая последовательность  $\pi_{i+1}$ , вычисляется  $\chi_{i+1}$ . Если  $\chi_{i+1} < (>) \chi_i$ , то в последовательности  $\pi_i$  снова меняются местами  $\nu$  чисел и т.д. Этот процесс заканчивается при условии, что получена перестановка  $\pi_{i+k} \in \Pi$ , для которой  $\chi_{i+k} < (>) \chi_i$ .

Взяв в качестве исходной последовательности перестановку  $\pi_{i+k}$ , процесс вычисления продолжается до тех пор, пока вероятность получения лучшего значения функции цели станет достаточно малой.

Если вероятность получения лучшего результата станет достаточно малой, за начальную принимается последовательность  $\pi_j$ , в ней случайно меняются местами  $\nu_i < \nu$  чисел, и процесс перебора начальных точек продолжается до тех пор, пока  $\nu_r = 1$ .

**Выделение глобального значения функции цели и соответствующего вектора размещения.** Таким образом, рекордная перестановка, полученная на некотором этапе, выбирается в качестве центра окрестности определенного радиуса. На следующем этапе формируются перестановки, лежащие в этой окрестности. Последующие этапы отличаются друг от друга радиусом окрестностей, которые постепенно убывают. Кроме того, с началом нового этапа центр окрестности переносится в текущую рекордную перестановку.

В процессе перебора локальных экстремумов возникает вопрос о моменте прекращения решения задачи. Это связано с тем, что с увеличением количества перебираемых исходных точек скорость решения задачи снижается и при приближении к глобальному экстремуму становится близкой к нулю. Это означает, что каждое новое уменьшение значения целевой функции требует пересмотра все большего количества локальных экстремумов. При этом существенно возрастают затраты машинного времени. Поэтому в процессе решения задачи не всегда удается определить величину приближения найденного значения функций цели к глобальному. Учитывая сказанное, для выработки и проверки критерия останова в процессе решения задачи необходимо предусмотреть блоки проверки критериев прекращения поиска локального и глобального экстремумов. Заметим, что при решении конкретных задач возникает ситуация, когда ограничения, наложенные на поведение ЭМП, выполняются при любом местоположении источников, удовлетворяющих ограничениям (8), (13)-(15). В этом случае задача (5)-(6) сводится к задаче размещения источников ЭМП с учетом только ограничений (13)-(15), т.е. к задаче размещения геометрических объектов [8].



## Снижение результирующей магнитной напряженности ЭМП оптимальным размещением элементов ЭЭУ

**Постановка задачи.** Пусть задана трехмерная область  $V$ , ограниченная в общем случае экранирующей оболочкой (рис. 2). Внутри оболочки необходимо осуществить размещение заданного числа источников ЭМП  $S_i$ ,  $i \in [1, m]$  так, чтобы минимизировать значения магнитных напряженностей в заданной системе точек  $P_k$  ( $k \in [1, p]$ ). При этом источники ЭМП, имеющие заданную геометрическую форму, должны размещаться на определенном расстоянии друг от друга и находиться внутри оболочки.

Математическая постановка задачи состоит в нахождении [8]:

$$\min \max \bar{H}^{(k)}(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}, \bar{Z}), \quad \bar{Z} \in W, \quad k \in [1, p], \quad (19)$$

где область определения  $W$  функции цели задачи (19) описывается следующей системой ограничений:

$$\varphi_{ij}(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, \alpha_1^{(i)}, \alpha_2^{(i)}, \alpha_3^{(i)}; x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, x_3^{(j)}, \alpha_1^{(j)}, \alpha_2^{(j)}, \alpha_3^{(j)}) \geq 0, \quad i, j \in [1, m], i \neq j \quad (20)$$

$$\zeta_i(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, \alpha_1^{(i)}, \alpha_2^{(i)}, \alpha_3^{(i)}) \geq 0, \quad (21)$$

$$\bar{Z} = \{x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}, \alpha_1^{(1)}, \alpha_2^{(1)}, \alpha_3^{(1)}; x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}, \alpha_1^{(2)}, \alpha_2^{(2)}, \alpha_3^{(2)}; \dots; x_1^{(m)}, x_2^{(m)}, x_3^{(m)}, \alpha_1^{(m)}, \alpha_2^{(m)}, \alpha_3^{(m)}\}, \quad (22)$$

где  $x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}$  - координаты местоположения источника  $S_i$  (его полюса) относительно неподвижной системы координат  $x_1, x_2, x_3$ , жестко связанной с областью  $V$ ;  $\alpha_1^{(i)}, \alpha_2^{(i)}, \alpha_3^{(i)}$  - углы ориентации источника  $S_i$  относительно неподвижной системы координат.

Из анализа поставленной задачи следует:

- Функция цели задачи (19) в общем случае нелинейная.
- Область определения функции цели в общем случае многосвязная и описывается системой  $0,5m(m+1) + m$  нелинейных неравенств (20)-(22)
- Размерность пространства параметров, в котором ищется экстремум функции цели задачи (19), равна  $6m + 3$ .

Задача (19) является многоэкстремальной.

При решении практических задач целесообразно разбить общую задачу (19) на ряд подзадач. Это связано с тем, что потребности практики требуют оптимизации и контроля определенных составляющих векторов магнитных напряженностей.

В случае, когда направленность векторов магнитных напряженностей может быть произвольной, задача (19) примет вид

$$\min \max |\bar{H}^{(k)}(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}, \bar{Z})|, \quad \bar{Z} \in W, \quad k \in [1, p], \quad (23)$$

где через  $|\bar{H}^{(k)}| = H_0^{(k)}$  обозначен модуль векторов магнитных напряженностей ЭМП.

Если требованиями практики оговорен контроль составляющих векторов магнитных напряженностей, то задача (9.19) принимает вид

$$\min \max_{x_\beta} H_{x_\beta}^{(k)}(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}, \vec{Z}), \beta = 1, 2, 3, \vec{Z} \in W, k \in [1, p]. \quad (24)$$

В случае необходимости минимизировать одну из составляющих векторов  $\vec{H}^{(k)}$ , например  $H_{x_1}^{(k)}$ , при контроле других в заданных пределах, задача (19) формулируется как

$$\min \max H_{x_1}^{(k)}(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}, \vec{Z}), \vec{Z} \in W, k \in [1, p] \quad (25)$$

При этом ограничения на другие составляющие векторов выглядят следующим образом:

$$0 \leq H_{x_2}^{(k)}(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}) \leq H_{x_2}^{(d)(k)}, \quad (26)$$

$$0 \leq H_{x_3}^{(k)}(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}) \leq H_{x_3}^{(d)(k)}, \quad (27)$$

где  $H_{x_2}^{(d)(k)}$ ,  $H_{x_3}^{(d)(k)}$  - допустимые значения составляющих векторов магнитных напряженностей.

Заметим, что при постановке задачи вида (25) к ограничениям (20)-(22) добавляются ограничения (26)-(27).

Задача упрощается, если ставится задача о размещении одного источника относительно остальных, считающихся неподвижными.

**Постановка задачи.** Пусть имеется ограниченная полной координатной поверхностью оболочка  $V$ , внутри которой расположены неподвижно источники ЭМП  $S_i (i=1, 2, \dots, N-1)$  - рис. 2 в виде тел, ограниченных также полными координатными поверхностями с координатой  $\xi_1^{(i)}$  (в центрах систем координат источников).

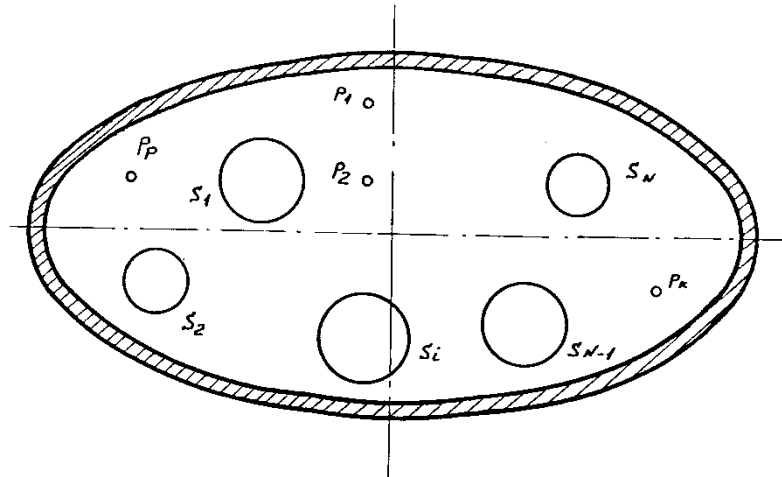


Рис. 2. Источники ЭМП внутри экранирующей оболочки

Необходимо внутри оболочки осуществить размещение (выделить множество точек возможного местоположения) источника ЭМП  $S_N$  так, чтобы суммарные магнитные напряженности поля в заданной системе точек  $P_k$  с координатами  $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)} (k \in [1, p])$  не превышали наперед заданных

величин  $\vec{H}^{(k)} (k \in [1, p])$ . Кроме того, необходимо учесть условия взаимного непересечения областей источников и ограничения на местоположение области размещаемого источника внутри оболочки. Перечисленные выше ограничения имеют, соответственно, следующий вид [12]:

$$\vec{H}(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}; \vec{M}^{(i)}; x_1^{(N)}, x_2^{(N)}, x_3^{(N)}) \Big|_{\substack{x_1^{(i)}=x_1^{(k)} \\ x_2^{(i)}=x_2^{(k)} \\ x_3^{(i)}=x_3^{(k)}}} \leq \vec{H}^{(k)}, \quad k \in [1, p]; \quad (28)$$

$$\zeta_i(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}; x_1^{(N)}, x_2^{(N)}, x_3^{(N)}) \geq 0, i \in [1, n-1]; \quad \varphi(x_1^{(N)}, x_2^{(N)}, x_3^{(N)}) \geq 0,$$

где  $\vec{H}$  - суммарный вектор магнитной напряженности;  $\vec{M}^{(i)}$  - вектор магнитного момента поля источника  $S_i$ ;  $x_1, x_2, x_3$  - текущие координаты;  $x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}$  - координаты местоположения центров источников (полюсов) относительно неподвижной системы координат  $x_1, x_2, x_3$ .

Для формализации ограничений (28) (вопросы формализации ограничений (28) рассмотрены в [8]) необходимо представлять суммарные составляющие магнитных напряженностей в зависимости от текущих координат и параметров размещения источников  $S_N$ . Осуществим это на основе методики расчета ЭМП системы источников, рассмотренной ранее.

**Метод решения.** Вектор магнитной напряженности  $\vec{H}$  суммарного ЭМП системы источников  $S_i (i \in [1, N])$ , находящихся в пределах экранирующей оболочки, может быть определен с учётом функций  $W^{SM(i)}$  и взаимовлияния  $K_{(N-i)}^{SM(i)}$ .

Без нарушения общности решения уравнение (4) может быть записано с учетом функций обратного действия и взаимовлияния по гармоникам.

Если учесть, что  $N-1$  источников неподвижны относительно системы координат  $x_1, x_2, x_3$ , то составляющие вектора магнитной напряженности представляются как

$$H_{x_\beta}^{(k)} = H_{x_\beta}^{(k)}(x_1^{(N)}, x_2^{(N)}, x_3^{(N)}), \quad k \in [1, p], \quad \beta = 1, 2, 3. \quad (29)$$

Учитывая также и то, что сравнение векторов можно осуществлять по их модулям только в том случае, когда они имеют одно и то же направление (равны углы ориентации), ограничения (28) с учетом (29) можно записать в виде:

$$|\vec{H}^{(k)}(x_1^{(N)}, x_2^{(N)}, x_3^{(N)})| \leq |\vec{H}^{(\partial)(k)}|, \quad (30)$$

$$\frac{H_{x_\beta}^{(k)}(x_1^{(N)}, x_2^{(N)}, x_3^{(N)})}{|\vec{H}^{(k)}(x_1^{(N)}, x_2^{(N)}, x_3^{(N)})|} = \frac{H_{x_\beta}^{(\partial)(k)}}{|\vec{H}^{(\partial)(k)}|}, \quad (31)$$

где

$$|\vec{H}^{(k)}| = \sqrt{\sum_{\beta=1}^{\beta=3} (H_{x_\beta}^{(k)})^2}, \quad |\vec{H}^{(\partial)(k)}| = \sqrt{\sum_{\beta=1}^{\beta=3} (H_{x_\beta}^{(\partial)(k)})^2}.$$

Т.о., осуществлена формализация ограничений (28) в виде соотношений (30), (31), а общая математическая постановка рассматриваемого класса задач привела к системе, состоящей из  $N+1$  неравенств и  $3p$  равенств. Решение такой системы в общем виде затруднительно, и поэтому чаще всего для решения подобного рода задач предлагаются специальные приемы, основанные на специфике рассматриваемого класса задач.

Одним из возможных путей поиска местоположения источника для случая, когда ограничения (30)-(31) имеют сравнительно простой вид, может служить метод линеаризации для решения систем равенств и неравенств [13]. Для его применения достаточно, чтобы функции, входящие в соотношения (28)-(31), имели непрерывные градиенты и удовлетворяли условиям Липшица.

### **Выводы**

Предложенный подход к формированию ЭЭУ может оказаться перспективным при необходимости снижения помехонесущих ЭМП от ВСНТ МАГЛЕВ в окружающем пространстве. Ранее такой подход был рекомендован для автономных ЭЭУ [8, 9, 12, 14].

Без сомнения, есть необходимость в дополнительной проработке предложенного подхода. Однако, он позволит не только снизить электромагнитную нагрузку от ВСНТ МАГЛЕВ на окружающую среду, но и изменить сам характер проектирования ВСНТ МАГЛЕВ.

### **Библиографический список**

1. Аполлонский С. М. Уровни физических полей и излучений на железнодорожном транспорте с магнитной левитацией / Магнитолевитационные транспортные системы и технологии: Труды 3-й Международной конференции. – СПб: ПГУПС, 2016. – С. 138–153. – URL: <http://transsystru/3razdel-3-1-Apollonskiy.html> (01.05.2017).
2. Технический регламент ТС № 710 "О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта" (ТР ТС 002/2011), утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 года.
3. Аполлонский С. М. Внешние электромагнитные поля электрооборудования и средства их снижения / С. М. Аполлонский. – СПб.: Безопасность, 2001. – 620 с.
4. Стоян Ю. Г. Оптимизация технических систем с источниками физических полей / Ю. Г. Стоян, В. П. Пулятин. – Киев: Наукова думка, 1988. – 184 с.
5. Бабанов Ю. Н. Введение в проблему электромагнитной совместимости РТС / Ю. Н. Бабанов, А. В. Силин. – Горький, 1977. – 80 с.

6. Мееров М. В. Оптимизация систем многосвязного управления / М. В. Мееров, Б. Л. Литвак. – М.: Наука, 1972. – 344 с.
7. Стоян Ю. Г. Размещение геометрических объектов. – Киев: Наук. думка, 1981. – 239 с.
8. Аполлонский С. М., Путятин В. П. Оптимизация размещения источника электромагнитного поля внутри экранирующей оболочки // – Харьков: ИПмаш АН УССР. – 1979. – № 131. – 24 с.
9. Аполлонский С. М. О расчёте внешнего поля нескольких источников, заключённых в оболочку / С. М. Аполлонский, В. П. Путятин // Проблемы машиностроения. – 1983. – № 18. – С. 79–83.
10. Калайда Г. М. Критерии подобия и физическое моделирование электромагнитных полей в присутствии массивных ферромагнитных тел / Г. М. Калайда // Проблемы технической электродинамики. – 1974. – № 46. – С. 24–30.
11. Аполлонский С. М. Об оптимизации размещения источников электромагнитного поля / С. М. Аполлонский, В. П. Путятин // Численные методы нелинейного программирования: III Всесоюзный семинар. – М.: ч. II. – 1979, – С. 87–90.
12. Пшеничный Б. Н. Численные методы в экстремальных задачах / Б. Н. Пшеничный, Ю. М. Данилин. – М.: Наука, 1975. – 319 с.
13. Аполлонский С. М. Рациональное размещение источников ЭМП / С. М. Аполлонский, А. В. Коновко // Известия вузов. Электромеханика. – 1990. – № 2. – С. 5–12.

## References

1. Apollonskij S. M. Urovni fizicheskikh polej i izluchenij na zheleznodorozhnom transporte s magnitnoj levitaciej [Levels of physical fields and radiations in rail transport with magnetic levitation]. *Trudy 3-j Mezhdunarodnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Proceedings of the 3rd International Conference "Magneto-Levitational Transport Systems and Technologies"). St. Petersburg, 2016, pp. 138-153. URL: <http://transsyst.ru/3razdel-3-1-Apollonskiy.html> (01/05/2017).
2. *Tekhnicheskij reglament TS "O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta"* (TR TS 002/2011), utverzhdenyj resheniem Komissii Tamozhennogo soyuza ot 15 iyulya 2011, no. 710 [Technical Regulations of Vehicles No. 710 "On the Safety of High-Speed Railway Transport" (TR TC 002/2011), approved by the decision of the Commission of the Customs Union of July 15, 2011].
3. Apollonskij S. M. *Vneshnie ehlektromagnitnye polya ehlektrooborudovaniya i sredstva ih snizheniya* [External electromagnetic fields of electrical equipment and means of reducing them]. St. Petersburg, 2001. 620 p.

4. Stoyan Yu. G. & Putyatin V. P. *Optimizaciya tekhnicheskikh sistem s istochnikami fizicheskikh polej* [Optimization of technical systems with sources of physical fields]. Kiev, 1988. 184 p.
5. Babanov Yu. N. & Silin A. V. *Vvedenie v problemu ehlektromagnitnoj sovmestivosti RTS* [Introduction to the problem of electromagnetic compatibility of RTS]. Gorkij, 1977. 80 p.
6. Meerov M. V. & Litvak B. L. *Optimizaciya sistem mnogosvyaznogo upravleniya* [Optimization of systems of multiply connected control]. Moscow, 1972. 344 p.
7. Stoyan Yu. G. *Razmeshchenie geometricheskikh ob"ektov* [Placement of geometric objects]. Kiev, 1981. 239 p.
8. Apollonskij S. M. & Putyatin V. P. *Optimizaciya razmeshcheniya istochnika ehlektromagnitnogo polya vnutri ehkraniruyushchej obolochki* [Optimization of the location of the source of the electromagnetic field inside the shielding shell]. Kharkiv, 1979, no. 131. 24 p.
9. Apollonskij S. M. & Putyatin V. P. *Problemy mashinostroeniya – Problems of mechanical engineering*, 1983, № 18, pp. 79–83.
10. Kalajda G. M. *Problemy tekhnicheskoy ehlektrodinamiki – Problems of technical electrodynamics*, St. Petersburg, 1974, no. 46, pp. 24–30.
11. Apollonskij S. M. & Putyatin V. P. Ob optimizacii razmeshcheniya istochnikov ehlektromagnitnogo polya [On the optimization of the location of sources of electromagnetic field]. *Trudy III Vsesoyuznogo seminara "Chislennye metody nelinejnogo programmirovaniya"* (Proceedings of the III All-Union Seminar "Numerical Methods of Nonlinear Programming"). Moscow, 1979, vol. II, pp. 87–90.
12. Pshenichnyj B. N. & Danilin Yu. M. *Chislennye metody v ehkstremaal'nyh zadachah* [Numerical methods in extremal problems]. Moscow, 1975. 319 p.
13. Apollonskij S. M. & Konovko A. V. *Izvestiya vuzov. Ehlektromekhanika – Proceedings of high schools. Electromechanics*, 1990, no. 2, pp. 5–12.

**Сведения об авторе:**

АПОЛЛОНСКИЙ Станислав Михайлович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, научный консультант ООО «Центр электромеханотроники»  
E-mail: smapollon@yahoo.com

**Information about author:**

Stanislav M. APOLLONSKIY, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Science, Research consultant Ltd. "Center of Elektromehanotroniki"

E-mail: [smapollon@yahoo.com](mailto:smapollon@yahoo.com)

---

© АПОЛЛОНСКИЙ С. М., 2017

УДК 612.06

**Т. Д. Власов, А. В. Рубинский**

Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет  
им. академика И. П. Павлова  
(Санкт-Петербург, Россия)

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ «РОССИЙСКИЙ МАГЛЕВ» И МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ**

Дата поступления 30.05.2017

Решение о публикации 26.10.2017

**Аннотация:** В статье проведен анализ медико-биологической безопасности результатов работы по проектированию и модельно-лабораторным экспериментам транспортной системы «Российский Маглев».

**Цель:** Установление локации и уровня полевых физических характеристик вокруг отечественной магнитолевитационной системы «Российский Маглев», разработка научно обоснованных предложений и рекомендаций санитарно-профилактического профиля, необходимых при проектировании и эксплуатации систем защиты, контроля и мониторинга опасного воздействия нерадиационных физических полей на пассажиров, обслуживающий персонал, перемещаемый груз и экологию.

**Методы:** Выполнен обзор современных представлений о воздействии постоянных и низкочастотных магнитных полей на человека. Изучены и представлены характеристики основных источников воздействия ЭМП на человека при эксплуатации технологии «Российский Маглев». Полученные данные сопоставлены с нормативно-техническими документами по обеспечению электромагнитной безопасности.

**Результаты:** Были выявлены гигиенические требования по абсолютным величинам и продолжительности действия неблагоприятных факторов на железнодорожном транспорте, неотраженные в действующих инструкциях и СанПиНах, в связи с этим даны рекомендации по наиболее безопасному для человека размещению источников МП, а также защитных средств в салоне экипажа.

**Практическая значимость:** Проведена необходимая подготовительная работа для проведения медико-биологических исследований в условиях полноразмерной модели.

**Ключевые слова:** магнитолевитационный транспорт, постоянное и переменное магнитное поле, электромагнитная безопасность.

### **Введение**

В настоящее время в России развитием магнитолевитационных (Маглев) технологий занимаются коллективы нескольких российских организаций (НИИЭФА, ПГУПС, НИУ МАИ, МИИТ, др.), но до сих пор отечественные разработки не вышли из стадий проектирования и модельно-лабораторных экспериментов.



Причин такого положения несколько, отметим на наш взгляд наиболее существенные: на ведомственном и регионально-правительственном уровне нет согласованных действий и документов по перспективам развития Маглев транспорта, не определен рейтинг Маглев технологий, намеченных к реализации, не разработана нормативная база по большинству позиций, необходимых для коммерческой эксплуатации проектов, не определены исходные данные по скоростному режиму движения подвижного состава, не проводятся научно-технические исследования по изучению влияния опасных и вредоносных физических факторов, действующих на пассажиров, обслуживающий персонал в экипаже, работников инфраструктурных подразделений, населения в селитебных зонах пролегания Маглев трасс.

В литературе, посвященной разработкам различных отечественных технологий и проблем Маглева, мы не нашли убедительных оценок соответствия расчетных показателей эксплуатационных характеристик этого вида транспорта действующим в стране санитарно-гигиеническим правилам и нормам (СанПиН), стандартам (ГОСТ), предельно допустимым уровням (ПДУ) по энергетическим и силовым физическим параметрам, другим санитарно-техническим показателям, прописанным в нормативно-технических документах. Так, в работе [2], как и в большинстве ей подобных, с целью констатации эксплуатационной безопасности Маглев транспорта представлены сравнительные оценки расчетных интенсивностей магнитных (МП) и электромагнитных (ЭМП) полей в средах, окружающих будущую отечественную Маглев трассу с существующей полевой обстановкой в большом современном городе на улицах, в городском транспорте, метро, жилых и производственных помещениях. Без ссылок на источники приведены значения интенсивностей излучения ЭМП различными работающими приборами и индукция фонового геомагнитного поля Земли (ГМП). В работе много неточностей, например, приведено значение ГМП, равное 0,5 мкТл, хотя известно, что величина ГМП не постоянный параметр, а пространственно-временная функция, зависящая от положения точки измерения на поверхности Земли, её значения изменяются в пределах от 42 до 70 мкТл [5]. Далее, ссылаясь на мнение «русских ученых» (не указано, кого?), сообщается, что ПДУ МП (постоянного и переменного) для пассажиров Маглева равно 2 мкТл. Эта информация также недостоверна, т.к. до сих пор отсутствуют отечественные регламентарные нормы ПДУ МП, ЭМП на транспортных средствах, а в зарубежных нормативных регламентах указаны совсем другие значения обеспечения магнитной и электромагнитной безопасности [6,7]. Подобные разночтения в оценках эколого-гигиенического влияния Маглев транспорта на организм человека присутствуют в работах и других авторов.

В большинстве отечественных публикаций авторы, для оценки ПДУ на транспорте, применяют нормы, изложенные в СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», в которых подтверждено известное положение о том, что воздействие постоянных и переменных физических полей на человеческий организм не равноценно и в связи с этим ПДУ для различных видов МП отличаются по градациям зоны облучения и энергетической дозы: для постоянного МП максимальный порог общего облучения организма ограничен величиной 10 мТл, а индукция магнитной составляющей ЭМП низкой частоты, когда электрическую и магнитную составляющие можно рассматривать независимо, на два порядка меньшей, равной 0,2 мТл.

Конечно, при проектировании Маглев транспорта приоритетны энергетический анализ и оптимальные конструктивные и технологические решения, но без корректных эколого-гигиенических расчётов и экспериментальной практики, накладывающей определенные функциональные и конструктивные ограничения на технологию, внедрение нового вида транспорта в эксплуатацию невозможно.

На предыдущих конференциях по магнитолевитационным транспортным системам и технологиям (СПб, ПГУПС) и в литературе [1–4] отмечалась универсальность и перспективность внедрения в эксплуатацию результатов отечественного технологического проекта «Российский Маглев» - разработки транспортной технологии, рассчитанной для применения на междугородных скоростных пассажирских магистралях со скоростным режимом до 600 км/час и для грузовых контейнерных перевозок со скоростью до 400 км/час.

В этой транспортной технологии предложена левитационная конструкция в виде путевой структуры, состоящей из магнитных рельсов (МР), изготовленных из блоков постоянных магнитов NdFeB, собранных по схеме Хальбаха, и уложенных вдоль всей трассы, Маглев тележек, содержащих аналогичные бортовые блоки Хальбаха (возможен вариант – вместо блоков постоянных магнитов использовать блоки объемных высокотемпературных сверхпроводников 2-ого поколения) и тяговой системы, построенной на базе линейного синхронного двигателя (ЛСД) с рабочими элементами, размещенными в путевой структуре вдоль трассы и в экипаже. Предлагаемая система действия магнитного подвеса основана на взаимодействии потоков магнитных полей от постоянных магнитов (массивов Хальбаха), размещенных на борту экипажа и в МР. Известны вариации этой технологии с использованием вместо МР разгонных систем и «реактивной» полосы из высокопроводящего металла, вмонтированной в путевую структуру.

В работах по проекту «Российский Маглев» сообщается о технических разработках и экспериментально-модельных исследованиях в области поиска оптимальных конструктивных решений, но отсутствуют

подходы и планы проведения эколого-гигиенических исследований для оценки полевой безопасности предлагаемых конструктивных вариантов. Нет конкретных результатов подобных исследований и в зарубежных изданиях, содержащих анализ и итоги коммерческой эксплуатации различных технологий Маглева [6,7].

Целью настоящей работы является установление локации и уровня полевых физических характеристик вокруг отечественной магнитолевитационной системы «Российский Маглев», разработка научно обоснованных предложений и рекомендаций санитарно-профилактического профиля, необходимых при проектировании и эксплуатации систем защиты, контроля и мониторинга опасного воздействия нерадиационных физических полей на пассажиров, обслуживающий персонал, перемещаемый груз и экологию.

### **Современные представления о методологии изучения воздействия постоянных и низкочастотных магнитных полей на человека**

Отсутствие полноценных эколого-медицинских исследований безопасной эксплуатации Маглева можно объяснить распространенным стереотипом об адаптации человека к воздействию магнитного поля: за долгое время эволюции физиологические функции организма человека приспособились к воздействию ГМП, солнечным и земным магнитным аномалиям, техногенным МП и пр. Кроме того, в ранних работах по исследованию влияния МП и ЭМП на живые организмы, из-за несовершенства инструментальной базы, были получены данные, что уровни постоянного МП индукцией до 2 Тл. не оказывают существенного влияния на основные показатели функциональных систем организма животных и человека. В связи с этим долгое время считали, что искусственные МП, применяемые в промышленном производстве, науке и технике, медицинской физиотерапевтической практике и диагностических исследованиях ЯМР, МРТ безвредны [9,10].

Однако в других, более современных литературных источниках [11,12] сообщается, что патологическое действие на человека оказывают не только сильные ( $B > 1,5$  Тл.) постоянные МП, но и средние ( $5 \cdot 10^{-2}$  - 1,5)Тл., а также слабые ( $10^{-2}$  -  $5 \cdot 10^{-5}$ ) Тл., соизмеримые с ГМП, и даже сверхслабые ( $B < 10^{-5}$  Тл), одним из механизмов действия которых считают усиление или ослабление ГМП в рассматриваемой биосистеме.

Нет согласованных данных и в исследованиях влияния структурно разнообразных видов МП (постоянное, переменное, однородное, дискретное, градиентное, комбинированное) на организм человека и животных.

Современные представления о влиянии МП на человека состоят в следующем: несмотря на то, что в человеческом организме нет

специализированных магниторецепторов - образований, непосредственно реагирующих на МП, - физиологические системы живого организма чрезвычайно чувствительны к воздействию постоянных и переменных МП в весьма широком диапазоне амплитуд и частот.

К настоящему времени известно большое количество публикаций с оценкой и трактовкой результатов биологических исследований по вопросам функционального влияния и механизмов действия МП на различные физиологические процессы. В них содержится огромный экспериментальный материал, доказывающий воздействие МП на человека в широком диапазоне интенсивностей и частот, предложены правдоподобные объяснения наблюдаемых явлений на организменном уровне, с привлечением информационной, биомембранной и др. гипотез, но общепринятого, окончательного ответа на вопрос о механизмах воздействия МП на человека до сих пор нет.

В заключение данного раздела перечислим интегрированные основные результаты медико-биологических исследований, полученных на большом контингенте работников, занятых в средах, нагруженных постоянным/переменным МП средней интенсивности ( $10^{-1}$  - 1) Тл.

Считается, что наиболее чувствительны к воздействию МП этого диапазона регуляторные системы организма - нервная, нейроэндокринная и сердечно-сосудистая. Формы проявления синдромов – разные, наиболее часто – неврастенический синдром с вегетативными дисфункциями и нейроциркуляторными расстройствами, глубина и стойкость которых определяется поглощенной экспозиционной дозой. Ряд авторов-кардиологов наблюдали увеличение систолического и диастолического артериального давления, вариабельность частоты сердечных сокращений, изменения в минутного объема крови, патологические нарушения в диаграммах ЭКГ, клинических анализах крови (снижение концентрации эритроцитов, гемоглобина, умеренный лейкоцитоз).

В области симптоматики преобладали жалобы на головные боли, повышенную утомляемость, раздражительность, снижение работоспособности. В числе латентных последствий - развитие онкологических новообразований, лейкозы, гормональные патологии.

В ряде работ, посвященных сравнительному исследованию воздействия низкочастотного и постоянного МП на организм человека, сообщается о большем риске развития отмеченных патологий при действии сравнительно менее интенсивного переменного МП.

### **Результаты исследования характеристик основных источников электромагнитных полей в технологии «Российский Маглев»**

Практически все современные транспортные средства оснащены сложным системным энергетическим и информационным оборудованием, потребляющим и излучающим электромагнитную энергию.

На магнитолевитационном транспорте, помимо высокоэнергетических установок магнитного подвеса и тягового двигателя широко применимы устройства с электронными и электротехническими элементами связи, управления, автоматики, работа которых сопряжена с излучением ЭМП различной интенсивности, частоты, направленности в окружающее пространство.

Таким образом, пассажиры Маглева, обслуживающий персонал в экипажах, технические работники, выполняющие ремонтные и профилактические работы на трассе, в инфраструктурных подразделениях, подвергаются воздействию неионизирующих электромагнитных излучений, величина и воздействия которых может существенно превышать ПДУ и критичную для организма человека дозу пребывания в неблагоприятной зоне, наносить вред его здоровью.

Основными источниками постоянных МП в салоне «Российского Маглева» являются массивы Хальбаха, конструктивно входящие в состав левитационной системы, размещенные под днищем экипажа и в путевой структуре магнитного рельса (МР).

Кроме них, большой вклад в полевую нагрузку салона экипажа и пространства, окружающего трассу, вносит работа мощной тяговой системы ЛСД, включающая статор - активную путевую обмотку, размещенную по всей длине трассы и ротор (бегун) - магнитную систему, составленную из блоков Хальбаха, размещенную на борту экипажа.

Путевая обмотка представляет собой систему контуров, уложенных в путевую структуру с периодом  $\tau$ , со сдвинутыми относительно друг друга фазными токами. Эта система контуров создает периодическое синусоидальное распределение тока вдоль трассы (или участков трассы), а в итоге - бегущее МП.

Ротор - бортовая магнитная система Хальбаха - собран из магнитных блоков NdFeB, размером 50x50x500 мм, и за счет взаимодействия с бегущим МП статора обеспечивает движение экипажа со скоростью, зависящей от частоты питания путевой обмотки:  $V = 2 \cdot f \cdot \tau$ .

Другими источниками неблагоприятных нагрузочных ЭМП в экипаже и в зоне прохождения Маглева являются излучения, создаваемые в салоне аппаратурой управления и связи, кабелями с током, шинами распределительных щитов, мониторами ПК, прочим оборудованием. В нашем исследовании ограничимся изучением полевой топографии постоянных и переменных магнитных полей, образуемых левитационной и тяговой системами.

Уровни индукции постоянного МП в экипаже (таблица 1) оценивали по экспериментальным данным, полученным в результате замера индукции

в окружении блока Хальбаха прибором Ф 4354/1 (погрешность измерений до 2,5%). Уровни индукции переменного МП статора (таблица 2) рассчитывали теоретически по модели ЛСД, описанной в [2]. При этом в расчет закладывали оптимальные конструкционно-энергетические параметры проектируемого ЛСД:

1. изменение скорости экипажа от 0 до 111 м/с (400 км/час);
2. полюсное деление  $\tau = 0.5 \cdot \pi \cdot h = 0.2\text{м.}$ , соответствующее получению максимальной тяги двигателя и оптимального по величине левитационного клиренса  $h = 0,13\text{ м.}$ ;
3. частота бегущего МП  $f = \frac{V}{2 \cdot \tau} = 2.5 \cdot V$  (Гц).
4. размещение и электропитание системы трехфазных контуров обмотки статора соответствует эффективному режиму генерации гармонического бегущего МП при оптимальном тяговом усилии ЛСД (фазная сила тока  $I = 2.5 \cdot 10^3\text{А.}$  , напряжение  $U = 2.85 \cdot 10^3\text{В.}$ ).

Таблица 1. Экспериментальные значения  $B_z$  – составляющей индукции постоянного МП, окаймляющего блок Хальбаха.

Z, м	B, мТл
0	800
0,1	40
0,2	5

Z – ось, ортогональная поверхности массива Хальбаха, направлена в сторону салона экипажа

Таблица 2. Расчётные значения  $B_z$  – составляющей индукции переменного МП статора.

Z, м	B, мТл
0,1	300
0,2	180
0,3	61
0,4	13
0,5	3
0,7	<1

Z - ось, ортогональная путевой структуре статора, направлена в сторону салона экипажа

Анализируя экспериментально-расчётные результаты, представленные в таблицах 1,2, приходим к выводу, что во время движения состава пассажирский салон вагона «нагружается» комбинированным (постоянным и переменным) МП индукцией существенно превышающей действующие в настоящее время санитарно-эпидемические нормы по постоянным и переменным МП в местах нахождения людей (СанПиН 2.2.4.3359-16).

Кроме того очевидно, что по эксплуатационным, технологическим и др. обстоятельствам Маглев поезд будет двигаться по трассе неравномерно, т.е. его мгновенная скорость будет переменной величиной. Выше было указано, что скорость ЛСД связана прямо пропорциональной зависимостью с частотой питания обмоток статора, следовательно, проникающее в салон неблагоприятное комбинированное МП, будет иметь нестационарный (стохастический) характер. В действующем регламенте СанПиН пронормированы допустимые параметры индукции переменных МП.

В модернизированной нами Таблице 3 показаны допустимые значения магнитной индукции переменного МП в зависимости от частоты питания статорной обмотки (скорости движения экипажа).

Таблица 3. Контрольные (допустимые) уровни переменных магнитных полей (среднеквадратичные значения магнитного поля).

Диапазон частот, f (Гц)	Скорость , V (м/с)	Магнитная индукция, B (мТл)
<1	<0,4	40
1–8	0,4 – 3,2	40–5
8–25	3,2 – 10	5–0,2
25–280	10 – 112	0,2–0,02

Таким образом, сравнивая экспериментальные данные, результаты расчётов и ПДУ, представленные в таблицах 1,2,3, получаем, что проникающее в виртуальный салон экипажа «Российского Маглева» комбинированное нестационарное МП, на несколько порядков превышено по абсолютной величине индукции и интенсивности.

Однако до настоящего времени не решен вопрос об уровне переносимости и адаптационных возможностях организма человека при попадании в зону стохастической изменчивости переменного магнитного поля. Для его решения необходимо провести полевые модельные эксперименты в экипажах с ЛСД, работающих в режиме разгона, поддержания скорости, торможения. Из известных нам профессий, в подобном антураже магнитной нестабильности с длительной экспозицией работают машинисты (водители) транспортных средств в конструкции которых предусмотрен электродвигатель. Для такой категории работников предусмотрены плановые медицинские осмотры, реабилитационные мероприятия и др.

С учетом конструктивных особенностей Маглева (малое расстояние от днища вагона до магнитного рельса, специфика магнитного двигателя, конструктивные особенности ЛСД и пр.) можно предполагать, что в таких же и даже более неблагоприятных условиях будут находиться пассажиры и обслуживающий персонал рассматриваемой технологии Маглева. Поэтому, даже на стадии проектирования, необходимо предусмотреть один из вариантов или комбинацию технической защиты, сочетающую

конструктивные методы, компенсацию, экранирование. Рекомендовать наиболее эффективный метод можно будет после проведения экспериментальных исследований, так как в настоящее время публикаций по влиянию на человека нестационарных, комбинационных МП мало, а регламентирующие документы вообще отсутствуют.

### **Практическая значимость работы по совершенствованию нормативно-технических документов для обеспечения электромагнитной безопасности**

В России традиционно гигиеническое нормирование МП и ЭМП регламентируют по пороговому принципу, согласно которому в качестве вредоносного действия принимают минимальную интенсивность полевого физического фактора, при воздействии которого в организме происходят изменения морфологического или функционального характера, выходящие за рамки адаптационно-компенсационных реакций гомеостаза. Наличие этих изменений устанавливают инструментальными и клинико-лабораторными методами при проведении комплексных наблюдений за изменением функционального состояния различных систем живого организма испытуемых (человека, лабораторных животных) как непосредственно, в процессе воздействия потенциально вредоносного фактора, так и в отдаленном периоде. В таблице 4 приведены допустимые дозы воздействия постоянных МП на рабочих местах, согласно действующему в настоящее время СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», которые, из-за отсутствия регламента по дозам облучения МП, пассажиров и обслуживающий персонал на транспорте необходимо учитывать при проектировании и строительстве пассажирского Маглев поезда.

Таблица 4. ПДУ постоянного магнитного поля на рабочих местах

Время воздействия за рабочий день, мин	Условия воздействия			
	общее		локальное	
	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл
10	24	30	40	50
11-60	16	20	24	30
61-80	8	10	12	15



Сопоставив данные в таблицах 1 – 4, приходим к выводу: чтобы воздействие МП на персонал, обслуживающий Маглев трассу в экипаже и на инфраструктурных объектах, соответствовало действующему регламенту при длительности нахождения в засоренной среде до 1 часа, источники постоянного МП (массивы Хальбаха) должны находиться на расстоянии более 20 см от человека, а источник переменного МП (активная путевая обмотка статора) на расстоянии более 40 см. И это – требования для работников, проходящих регулярный осмотр и плановую диспансеризацию, а не для пассажиров! Люди, незадействованные в производстве, должны находиться на большем расстоянии и для них экспозиционная доза должна быть меньше.

Многие гигиенисты считают применение порогового критерия для обоснования гигиенических нормативов дискуссионным, так как физиологическая чувствительность отдельных элементов структуры исследуемой функциональной системы на внешнее воздействие может существенно различаться. Так, например, в дифференциальных исследованиях поведения центральной и вегетативной нервной системы (ЦНС и ВНС) организма в слабых и сверхслабых МП и ЭМП, интенсивность которых была на несколько порядков ниже установленных ПДУ, наблюдали функциональные и полиморфные изменения в регуляторной и информационной системах на фоне благополучного интегративного показателя физиологической нормы гомеостаза.

В связи с этим, на наш взгляд, для выявления расстройств в деятельности ВНС, наиболее чувствительной к воздействию неблагоприятных для организма внешних факторов, целесообразно использовать апробированные методики определения функционального состояния организма на полисистемном уровне для выявления возможных индивидуальных реакций организма на МП. Для этого используют мониторные системы физиологических (спироартериокардиограмма), психофизиологических (устройство для исследования психомоторной деятельности человека) и биохимических (лазерная корреляционная спектроскопия) показателей [13,14]. Это позволит составить более точные рекомендации для проектирования Маглев поезда с точки зрения медико-биологической безопасности, как обслуживающего персонала, так и пассажиров.

### **Заключение**

Результаты представленной работы позволили сформулировать следующие выводы по медико-биологической безопасности человека:

1. В исследовании продемонстрировано, что наибольшую нагрузку на нервную систему оказывает переменное магнитное поле, изменяющееся случайным образом.

2. Необходимо проведение экспериментального исследования влияния на живой организм стохастического переменного ЭМП соответствующего расчетным характеристикам движения Маглев транспорта.

3. Провести полевые эксперименты и на основе их результатов разработать СанПиН воздействия нерадиционных полевых характеристик на транспорте для пассажиров и обслуживающего персонала.

4. Рекомендовать применение защитных средств в салоне экипажа, используя конструктивные, компенсационные и экранирующие средства и технологии.

### Библиографический список

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

2. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения: сб. статей / под ред. Ю. Ф. Антонова, А. А. Зайцева. – М.:Физматлит, 2015. – 611с.

3. Зайцев А. А. Транспорт на магнитном подвесе: монография / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова; – СПб, ПГУПС. – 2010. –160 с.

4. Земной магнетизм: Физическая энциклопедия, т. 2. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – 81 с.

5. Electricity and Magnetism in Biology and Medicine /Dietrich F.M. et. al, ed. M.Blank. – San Francisco: Press Inc., 1993. – 267 p.

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

7. Птицына Н. Г. Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля, как факторы потенциально опасные для здоровья / Н. Г. Птицына, Дж. Виллорези, Л. И. Дорман, Н. Юччи, М. И. Тясто // Успехи физических наук. – 1998. – т. 168. – №7. – С. 767–791.

8. Пальцев Ю. П. Гигиеническая оценка постоянных магнитных полей как фактора производственной среды / Ю. П. Пальцев, В. А. Рощин// Медицина и здравоохранение. Серия гигиена. – 1987. – вып.2. – С. 1–65.

9. Мокоян Б. О. Гигиенические факторы риска здоровью медицинского персонала при работе с магнито-резонансными томографами: автореферат дис. канд. мед.наук: спец.14.02.01/ Мокоян Бэлла Оганесовна: [Федер. НЦГ им. Ф. Ф. Эрисмана]. – М., 2013 – 24 с.

10. Сборник избранных трудов 4 Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине», симпозиум В. – СПб, 2006.

11. Космическая погода: её влияние на человека и биологические объекты: Материалы Международной конференции. Москва, 2005г. – М., 2006.

12. Пономаренко В. А. Магнитное поле как эпигенетический фактор: теоретические и медицинские аспекты / В. А. Пономаренко, В. Н. Запорожан, Л. А. Носкин, В. И. Кресюн, Ю. И. Бажора, А. П. Романчук; под ред. В. Н. Запорожана // Факторы и механизмы саногенеза: монография – Одесса: ОНМедУ. – 2014. – С. 100–29.

13. Рубинский А. В. Медико-биологические подходы к проблемам безопасной эксплуатации магнитолевитационного транспорта / А. В. Рубинский, Л. А. Носкин // Транспортные системы и технологии. – СПб.: ПГУПС, 2016. – № 4 (6). – С. 114–127. – URL: <http://www.transstyst.ru/vypusk-46-2016.html> (26.04.2017).

14. Герасимова Л. С. Спиро-артерио-кардио-ритмография как дифференциатор индивидуального адаптогенеза при медитации / Л. С. Герасимова, Н. Д. Шандыбина, Л. А. Носкин, А. В. Рубинский, К. Павлидис // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2016. – №1(15). – С. 22–27.

#### **Сведения об авторах:**

ВЛАСОВ Тимур Дмитриевич, доктор медицинских наук, профессор, декан лечебного факультета ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова» Минздрава РФ.

E-mail: tvlasov@yandex.ru

РУБинский Артемий Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры медицинской реабилитации и адаптивной физической культуры, ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова» Минздрава РФ.

E-mail: rubinskiyav@1spbgmu.ru

UDC 612.06

**T. D. Vlasov, A. V. Rubinskiy**

Pavlov First Saint Petersburg State Medical University

(St. Petersburg, Russia)

## OPERATION OF “RUSSIAN MAGLEV” TRANSPORT SYSTEM AND MEDICAL-BIOLOGICAL SAFETY ASPECTS

Date of receipt 30.05.2017

Decision to publish on 26.10.2017

**Abstract:** The article deals with the analysis of medical and biological safety of the results of work on the design and model-laboratory experiments of “Russian maglev” transport system.

**Purpose.** The purpose of the work is determination of location and level of field physical characteristics of national magnetic levitation system “Russian maglev”, development of scientifically justified preventive-sanitary suggestions and recommendations necessary for design and application of the systems for protection, control and monitoring of hazardous effects of non-radiation physical fields on passengers, personnel and transported cargo and ecology.

**Methodology.** To achieve the set purpose a review of modern ideas on the influence of constant and low frequency magnetic fields on people was carried out, characteristics of main sources of EMF influence on people during “Russian maglev” technologies operation were studied and described. The obtained results were compared with technical documents on electromagnetic safety.

**Results.** As a result of this work, hygienic requirements for absolute levels and length of unfavourable factors impact on railway transport were determined, which are not mentioned in the active Sanitary Regulations and Instructions. Considering this, recommendations for the most safety placement of MF for people and safety means in crew vehicle were given.

**Practical significance.** The significance of this work is that the preliminary work for medical-biological studies in conditions of full-size model was carried out.

**Keywords:** magnetic levitation transport, permanent and alternating magnetic field, electromagnetic safety

### Introduction

Now, in Russia several organisations are engaged in development of magnetic levitation (maglev) technologies: NIIEFA, PGUPS, St. Petersburg Polytechnic University, National Research Institute of Moscow Aviation Institute, and MIIT. But still, national elaborations have not left the stage of design and laboratory experiments.

There are several reasons for that. Let us highlight the most substantial ones: on the administrative and governmental regional levels, there are no confirmed actions and documents on development of maglev technologies, no maglev technologies have been singled out for realisation, no technical

requirements base for most aspects has been worked out which are needed for commercial operation of projects, no source data on speed regimes of rolling stock have been determined, no technical and scientific studies are being carried out aimed at studying hazardous effects on passengers, staff and infrastructure workers, population in residential areas with where maglev lines are supposed to be lain.

In the books devoted to elaborations of national technologies and problems of Maglev, we did not succeed in finding convincing evaluations of compliance of calculated data of operation properties of this mode of transport with Russia's active Sanitary Regulations and Instructions, National Standards (GOST), Maximum permissible levels of power and physical parameters, other sanitary and technical data, prescribed in normative and technical documents. Thus, in the studies (2), just like in most similar ones, with the aim to prove operation safety of maglev transport, comparative evaluations of calculated intensities of magnetic fields (MF) and electromagnetic fields (EMF) in environments surrounding the future line of maglev with the current situation in big modern city's streets, urban transport, metro, residential houses and production buildings were presented. Without proper references, the values of intensities of emission of EMF by different working equipment and induction of the Earth's geomagnetic field (GMF). The work is abundant in inaccuracies, for example: the value of GMF is given which is equal to  $0.5 \mu\text{T}$ , though it is a known fact that GMF value is not a constant parameter, but a space and time function, which depends on location of point of measurement on the surface of the Earth, and its value therefore varies from 42 to  $70 \mu\text{T}$  (5). Further in the text, referring to the viewpoint of "Russian scientists" (without actually giving the names), it is maintained that maximum permissible levels of MF (permanent and alternating) for passengers equals  $2 \mu\text{T}$ . This is also an unreliable statement because there are still no national requirements of maximum permissible levels of MF and EMF on transport, whereas in other country's requirements one could see different values of magnetic and electromagnetic safety provision (6, 7). This conflict of information about maglev transport ecological and hygienic impact on human organism is also seen in the works of other authors.

In most national publications, when estimating maximum permissible levels of MF on transport authors apply norms, specified in Russia's Sanitary Regulations and Instructions 2.2.4.3359-16 "Sanitary and epidemiological requirements to physical factors in working places", in which the confirmation of statement is seen, that impact of permanent and alternating physical fields on human organism is unequal and hence maximum permissible levels for different kinds of MF differ by gradation of zone of exposure and exposure dose are: for permanent MF the maximum threshold of exposure is limited to  $10 \mu\text{T}$ , and the induction of EMF magnetic component of lower frequency (when electric and magnetic components are regard independently) is by two orders of magnitude smaller and equal to  $0.2 \mu\text{T}$ .

Of course, during design of maglev transport in terms of power aspect, it would be based on energy-related analysis and calculation of electromagnetic phenomenon, but without correct ecological and hygienic calculations, which impose certain functional and constructive limits on the technology, the implementation of the new mode of transport is impossible.

During the previous maglev transport and systems-related conferences (Saint Petersburg, PGUPS) and in the literature (1 – 4), it was pointed at diversity of application and benefits of implementation of results of national project “Russian Maglev” – the elaborations of the technology designed for intercity passenger mainlines with speeds up to 600 km/h and for freight containers transportation with speeds up to 400 km/h.

For this transport technology, the levitation construction in the form of guideway was proposed. It consists of magnetic rails (MR), made of NdFeB permanent magnet blocks, assembled according to Halbach array and lain along the entire track; maglev bogies with similar onboard Halbach blocks (instead of permanent magnet blocks high-temperature superconductor blocks of 2<sup>nd</sup> generation can also be used); and traction system based on synchronous linear motor (SLM) with its working elements deployed in the guideway structure along the track and in the vehicle. The proposed system of EMS is based on interaction of currents of magnetic fields from permanent magnets (Halbach array), deployed onboard of vehicles and in MR. There are known variations of application of this technology, when instead of MR the acceleration systems and “reactive” elements of highly-conductive metals were used, deployed in the guideway structure.

In the works within the project “Russian Maglev” it is said about technical developments and experimental researches finding optimal constructive solutions, but approaches and plans of ecological and hygienic researches for evaluation of danger of the proposed constructive options are absent. There are also no specific results of this kind of researches in other countries’ publications, dealing with analysis and results of commercial operations of different maglev technologies (6, 7).

The purpose of this work is determination of location and level of field physical characteristics of national magnetic levitation system “Russian maglev”, development of scientifically justified preventive-sanitary suggestions and recommendations necessary for design and application of the systems for protection, control and monitoring of hazardous effects of non-radiation physical fields on passengers, personnel and transported cargo and ecology.

## **Today's ideas about methods of research of permanent and low-frequency magnetic fields on human organism**

The lack of full-fledged ecological and medical researches of safe operation of maglev can be explained by a popular stereotype of adaptation of people to magnetic field impact: during the long course of evolution physiological functions of human body have adapted to GMF impact, sun and Earth's magnetic anomalies, man-caused MF, etc. Besides, in the early studies of MF and EMF impacts on living organisms, due to insufficiently developed instruments, the data were received, which stated that levels of permanent MF with induction of less than 2 T do not affect significantly functional systems of humans and animals. Therefore, it has been assumed for a long time, that artificial MF applied in industrial production, science and machinery, medical sphere and NMR and MRI diagnoses do not have any harmful effect (9, 10).

However, in other more modern sources (11, 12) it is said that pathological impact on humans is made not only by intense permanent ( $B > 1,5$  T) magnetic fields, but also medium ones ( $5 \cdot 10^{-2}$ - 1,5 T), weak ones ( $10^{-2}$  -  $5 \cdot 10^{-5}$  T), comparable to GMF, and superweak ones ( $B < 10^{-5}$  T), one of the mechanisms of performance of which is considered to be weakening of GMF in the biosystem considered.

There are also no common data in the studies of impact of structurally different types of MF (permanent, alternating, uniform, discrete, and gradient) on human and animal organisms.

Today's ideas of MF impact on humans consist in the following: despite human organism having no special magnetic receptors, sensors which react to MF, physiological systems of living organisms are extremely sensitive to permanent variables of MF in quite a wide range of amplitudes and frequencies.

As of today, we are aware of large number of publications with estimation and understanding of results of biological studies of functional impact and mechanisms of performance of MF on different physiological processes. They contain huge experimental material, which proves MF impact on humans in a wide range of intensities and frequencies, suggest reliable explanations of the phenomena surveyed on the level of organism, including informational, biomembrane and other hypotheses, but there is still no a widely accepted answer to the question of mechanisms of impact of MF on humans.

In this chapter, we will dwell upon intergrated results of the studies, carried out at large number of workers who operated in environment with magnetic fields of medium intensity ( $10^{-1}$ - 1 T).

It is assumed that, the most sensitive systems to this diapason are regulatory systems – neural, endocrine and cardiovascular. The syndromes of the exposure manifest themselves differently. Among them, the most frequent are: neurasthenic syndrome with autonomic dysfunctions and neurocirculatory disorders, the depth and duration of which are dependent upon exposure dose. A number of author-

cardiologists have detected increase of systolic and diastolic blood pressures, heart rate variability, cardiac output, changes in ECG diagram, in full blood exam – decrease of concentration of erythrocytes, haemoglobin, and moderate leukocytosis.

As for the symptoms, headaches, increased fatigability, irritability, decrease of workability were most widespread. Among the latent consequences, there were development of oncological neoplasms, leukaemia, hormonal pathologies.

In several works, devoted to comparative study of low-frequency and permanent MF impact on human body, it is reported on high risk of development of above-mentioned pathologies under exposure of relatively less intense permanent MF.

### **Results of studies of properties of basic EMF sources in the technology "Russian Maglev"**

Almost all modern transport systems are equipped with complex power supply and information equipment that consumes and radiates electromagnetic energy.

On maglev transport apart from high-energy magnetic suspension facilities and traction motor, devices with electronic and electrotechnical elements of communication, control, automatics are widely used. Their operation is bound with EMF radiation of different intensity, frequency, and direction to the environment.

Thus, passengers, staff, technicians of maglev transport, who do repairs and preventive works on the line and infrastructure facilities, are exposed to non-ionising electromagnetic radiation, whose value and dose of exposure may significantly exceed maximum permissible level and dose of presence in hazardous zone, thus damaging human health.

General sources of permanent MF in "Russian Maglev" trains are Halbach arrays, which are part of the construction of levitation system. The arrays are located under bottom of vehicles and in guideway structure (MR).

Apart from them, work of powerful traction system of LSM, including active stator track winding located along the entire line, and rotor, magnet system made of Halbach blocks located in the vehicles, greatly contribute to the field load of vehicles and environment.

Track winding is a system of contours with phase currents shifted relatively to each other, lain in the track structure with a period  $\tau$ . This system of contours creates a periodic sinusoidal distribution of currents along the track or track sections, finally resulting in a running MF.

Rotor, the onboard Halbach magnetic system, is assembled of NdFeB magnet blocks of size 50x50x500 mm and owing to interaction with running MF



of stator ensures movement of vehicle at speed dependent on frequency of track winding power supply:  $V = 2 \cdot f \cdot \tau$ .

Other sources of EMF in the zone of maglev trains operation are radiations, created by vehicle equipment of control and communication, cables, switchboard buses, PC screens, and other devices. In our work, we would like to limit ourselves with studying field topography of permanent and alternating MF, generated by levitation and traction systems.

Levels of induction of permanent MF in a vehicle (Table 1) were evaluated in accordance with experimental data obtained during measurement of induction around Halbach blocks by virtue of Teslaammeter F4354/1 (inaccuracy is from 2.5% till 10 %). Levels of induction of stator alternating MF (Table 2) were calculated theoretically by model of LSM, described in (2). At the same time, optimal constructive and power parameters of the LSM under design were set as follows:

- change of velocity of vehicles from 0 till 111 m/s (400 km/h);
- polar pitch  $\tau = 0.5 \cdot \pi \cdot h = 0.2$  m, corresponds to obtaining maximum traction of motor and optimal levitation clearance  $h = 0.13$  m;
- frequency of running MF  $f = \frac{V}{2 \cdot \tau} = 2.5 \cdot V$  (Hz);
- location and power supply of the system of three-phase contours of stator winding (phase current power is  $I = 2.5 \cdot 10^3$  A) ensured sinusoidal running MF.

Table 1. Levels of induction of permanent MF dependent on the distance to the surface of Halbach block

$z^*$ , m	B, $\mu$ T
0	800
0.1	40
0.2	5

\* $z$  – distance to the surface of Halbach blocks

Table 2. Levels of induction of alternating MF dependent on the distance to stator

Z, m	B, $\mu$ T
0.1	300
0.2	180
0.3	61
0.4	13
0.5	3
0.7	~1

Comparing these two options, we come to conclusion that a more remote action of MF will be produced as a result of work of LSM. At the same time, if a

maglev train runs in rapidly changing conditions (wind, falls, etc.) the work of the motor will not be the same. Consequently, the properties of MF will also vary.

The Table 3 shows changes of induction of MF dependent on current frequency.

Table 3. Control levels of alternating MF (root mean square values of MF)

Frequency range, Hz	Approximate velocity	Magnetic induction, $\mu\text{T}$
<1	<0,4 m/s	40
1–8	0,4 – 3,2 m/s	40–5
8–25	3,2 – 10 m/s	5–0,2
25–280	10 – 112 m/s	0,2–0,02

However, till nowadays the question of levels of human body tolerance and adaptation capabilities when placed in a zone of stochastic fickleness of alternating MF has not been solved yet. To solve this problem, experiments with characteristics similar to calculated characteristics of LSM for acceleration, maintenance of speed and braking are needed. Today, such “magnetic storm” have long-term exposure only drivers of transport with electric motors. For this category of workers, regular medical examinations, rehabilitation activities, etc. are envisaged. Bearing in mind construction features of maglev trains (small gap between MR and vehicle, construction of motor, etc.) we could assume that all passengers of these trains might be placed in these conditions. One of options of technical protection should be taken: construction methods, compensation, shielding, etc. It will become possible to recommend the most efficient method, when experimental studies have been carried out, since as of today there are few publications on MF impact on humans.

### **Practical significance of the work on improvement of normative and technical documents of electromagnetic safety provision**

In Russia, usually hygienic regulation of MF and EMF is carried out according to threshold principle. According to this principle, the minimum intensity of field physical factor is taken as a harmful factor. When this factor occurs, organism suffers morphological and functional changes, going beyond limits of adaptation and compensation reactions of homeostasis. The presence of these changes is detected instrumentally or by means of laboratory and clinical methods while examining changes of functional changes of living organisms’ systems (humans and animals) both during exposure of the factor and after it. The Table 4 gives maximum permissible levels of permanent MF stipulated in the active Sanitary Regulations and Instructions 2.2.4.3359-16 “Sanitary and epidemiological requirements to physical factors in working places”, which should be abided by when constructing maglev trains.

Table 4. Maximum permissible levels (MPL) of MF at working places

Time of exposure per one working day, min	Conditions of exposure			
	Common		Local	
	MPL of excitation, $\kappa\text{A}/\text{m}$	MPL of magnetic induction, $\mu\text{T}$	MPL of excitation, $\kappa\text{A}/\text{m}$	MPL of magnetic induction, $\mu\text{T}$
10	24	30	40	50
11-60	16	20	24	30
61-480	8	10	12	15

Thus, comparing data of tables 1, 2 and 4 we come to conclusion that if the impact of a permanent magnet field on a passenger is supposed to meet the Sanitary Regulations and Instructions at time travel no less than one hour, the source of permanent magnetic field should be placed at a distance of at least 20 cm from a human. While the source of alternating magnetic field (stator) should be placed more than 40 cm away from human beings. And these are MPL for workers, not for passengers! People who are not engaged in production processes should be located at bigger distances with less time of exposure.

Plenty of hygienists consider the application of the threshold principle for the justification of hygienic standards as disputable, since the physiological sensitivity of individual elements of the structure of the functional system under study to external influences can vary significantly. Thus, for instance, in separate studies of behaviour of the central nervous system (CNS) and the autonomic nervous system (ANS) in weak and superweak MF and EMF with intensities of several orders of magnitude lower than those set by MPL, functional and polymorphic changes of regulatory and informational systems in the background of a favourable integrative index of the physiological norm of homeostasis were seen.

In this regard, in our opinion, in order to identify the disorders in the activity of the ANS, which is most sensitive to impact of unfavourable external factors, it is reasonable to use approved methods for determination of functional state of organism on a polysystematic level for identifying possible individual reactions to MF. To achieve this, monitoring systems of physiological, psychophysiological (a device for studying human psychomotor activity) and biochemical (laser correlation spectroscopy) indexes (13, 14) are used. This will make it possible to make more accurate recommendations for the design of the Maglev train in terms of medical and biological safety of both the staff and passengers.

## Conclusion

The results of the works enabled making the following conclusions on medical and biological safety of people:

- The studies have demonstrated that the most severe impact on the nervous system is made by alternating magnetic field, which changed in a stochastic way.
- It is necessary to carry out experiments on impact of alternating EMF with calculated characteristics of maglev for different phases of traffic.
- Basing on the conducted studies, Sanitary Regulations and Instructions of impacts of non-radiation field characteristics on transport for passengers and staff should be worked out.
- Placement of means of protection from electromagnetic field in vehicles (construction, compensation, and shielding methods) should be recommended.

## Reference

1. Antonov Y. F. & Zaitsev A. A. *Magnitolevitatsyonnaya transportnaya tehnologiya* [Magnetic levitation transport technology]. Moscow, 2014. 476 p.
2. Antonov Y. F. & Zaitsev A. A. *Magnitolevitatsyonnyi transport: nauchnye problemy i tekhnicheskie resheniya* [Magnetic levitation transport: scientific issues and technical solutions]. Moscow, 2016. 611 p.
3. Zaitsev A. A., Talashkin G. N. & Sokolova Y. V. *Transport na magnitnom podvese* [Transport on the magnetic suspension]. St. Petersburg, 2010. 160 p.
4. *Fizicheskaya entsiklopediya* [Physical encyclopedia]. Moscow, 1990, vol. 2, 81 p.
5. Dietrich F.M. *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*. San Francisco, 1993. 267 p.
6. Vasil'ev S. V., Matin V. I., Mikirtichev A. A. & Kim K. I. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – Izvestiya vuzov. Electrician*, 1977, no.8, pp.882-888.
7. Ptitsyna N. G., Villorezi Dzh., Dorman L. I., Yuchchi N. & Tyasto M. I. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Advances in physical Sciences*, 1998, vol.168, no.7, pp.767-791.
8. Pal'cev Y. P. & Roshchin V. A. *Medicina i zdravookhranenie. Seriya gigiena – Medicine and health care*, 1987, no.2, pp.1-65.
9. Mokoyan B. O. *Gigienicheskie faktory riska zdorov'yu meditsinskogo personala pri rabote s magnito-rezonansnymi tomografami* [Hygiene factors of health risk for medical personnel working with magnetic resonance tomography]. Moscow, 2013. 24 p.

10. *Sbornik izbrannykh trudov* (Collection of selected works). 4 *Mezhdunarodnyi kongress "Slabye i sverkhslabye polya i izlucheniya v biologii i medicine"*, simpozium B [4 International Congress "Weak and superweak fields and radiations in biology and medicine", symposium B]. St. Petersburg, 2006.

11. Materialy Mezhdunarodnoi konferentsyi (Proceedings of the International Conference). *Mezhdunarodnaya konferentsiya "Kosmicheskaya pogoda"* [International conference "Space weather"]. Moscow, 2006. 208 p.

12. Zaporozhan V. N., Noskin L. A., Kresyun V. I., Bazhora Yu.I. & Romanchuk A.P. *Faktory i mekhanizmy sanogeneza* [Factors and mechanisms of sanogenesis]. Odessa, 2014. pp. 100-129.

13. Rubinsky A. V. & Noskin L. A. *Transportnye sistemy i tekhnologii – Transport systems and technologies*, 2016, no. 4, vol. 6. pp. 114-127. URL: <http://www.transssyst.ru/vypusk-46-2016.html> (26/04/2017).

14. Gerasimova L. S., Shandybina N. D., Noskin L. A., Rubinsky A. V. & Pavlidis K. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemah – System analysis and management in biomedical systems*, 2016, no. 1, vol. 15, pp. 22-27.

**Information about authors:**

Timur D. VLASOV, MD, PhD, Dean of the medical faculty, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University (St. Petersburg, Russia)

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

Artemiy V. RUBINSKIY, PhD, Associate Professor of the chair of medical rehabilitation and adaptive physical training, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University (St. Petersburg, Russia)

E-mail: [rubinskiyav@1spbgmu.ru](mailto:rubinskiyav@1spbgmu.ru)

УДК 550.34.01

**Г. Н. Антоновская, Н. Ю. Афонин, И. М. Басакина, Н. К. Капустян,  
Б. Г. Басакин, А. В. Данилов**

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики  
имени академика Н. П. Лаверова РАН  
(Архангельск, Россия)

## **ВОЗМОЖНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

Дата поступления 06.10.2017

Решение о публикации 28.10.2017

**Аннотация.** В статье представлены сейсмические методы обследования и результаты мониторинга состояния железнодорожной насыпи с использованием сейсмических методов в районе Крайнего Севера.

**Цель:** Проработать технологию выявления наличия причин просадки железнодорожной насыпи на участке Северной железной дороги.

**Методы:** Обследования грунтов оснований железнодорожной насыпи путем применения комплекса активных и пассивных сейсмических методов, включающий: сейсморазведочный метод преломленных волн, метод многоканального анализа поверхностных волн и инженерно-сейсмический метод, основанный на спектральном анализе сейсмического шума.

**Результаты:** Комплекс методов позволил оценить состояние системы «насыпь-грунты оснований». Была выявлена относительно большая мощность ослабленных грунтов до 9 м, возможно с включениями торфа, залегающих под железнодорожной насыпью. Появлению просадок способствуют динамическая нагрузка от поездов и резонансный эффект в ослабленном грунте, приводящие к его сжатию.

**Практическая значимость:** Разработка технологии экспресс-оценки состояния железнодорожной насыпи для оперативного обнаружения опасного явления на ранней стадии его развития является актуальной и востребованной задачей.

**Ключевые слова:** земляное полотно железнодорожных путей, пассивные и активные сейсмические методы, Крайний Север

### **Введение**

На территории РФ в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов эксплуатируется около 5 000 км линий железных дорог (включая БАМ и большую часть Транссиба) [1]. Промышленное освоение территорий на Крайнем Севере и в Сибири предполагает увеличение протяженности путей одновременно при их активной эксплуатации. Характерными особенностями основания полотна с участками вечной мерзлоты,

заболоченности, распространения карстовых процессов является повышение деформативности пути, вызванное криогенными, карстово-суффозионными процессами в грунтах оснований.

С целью увеличения безопасности на железнодорожном транспорте ОАО «РЖД» особое внимание уделяет разработке и внедрению различных методов мониторинга земляного полотна мобильными средствами. Порядок работ на неустойчивых местах земляного полотна устанавливают индивидуально на основании данных инструментальных и визуальных наблюдений, натурных и инженерно-геологических (геофизических) обследований, расчетов прочности, устойчивости и эксплуатационной надежности объектов. В последние годы в России и за рубежом получили развитие полевые методы исследования грунтов, прежде всего, это статическое и динамическое зондирование. Отметим, что при всей эффективности применяемых методов они не могут выполнять постоянный (непрерывный) контроль земляного полотна и подстилающих его грунтов. Существенно обнаружение явления на ранней стадии его развития, что затруднено при применении лишь как разовой диагностики на опасных/проблемных участках. Существует необходимость более глубокой проработки данного вопроса.

Информативность изучения верхней части разреза (ВЧР) земной коры может быть существенно увеличена с помощью применения новых геофизических технологий, использующих приемы комплексирования различных методов. В последнее время с развитием аппаратной и методической базы применение пассивных сейсмических методов, как правило, микросейсмических, приобретает все большее значение в геофизических исследованиях [2, 3, 4]. Основными преимуществами таких методов являются отсутствие необходимости в специальных источниках зондирующего сигнала, относительная простота и доступность реализации.

Понятие «микросейсмические наблюдения» объединяет целый набор технологий, основанных на анализе волн разного генезиса и типов (сейсмическая эмиссия, техногенные сигналы, поверхностные волны и пр.). Нами прорабатываются подходы обследования ВЧР путем выделения «полезного» сигнала из техногенных микросейсм. Существенно, что для получения принципиально разнородной информации о среде зарегистрированное волновое поле может параллельно обрабатываться различными способами, опирающимися на разные «полезные» составляющие микросейсм.

Разработка технологии сейсмического мониторинга может использоваться как самостоятельно, для получения экспресс-оценки состояния земляного полотна, так и в сочетании с традиционными методами для выявления полной картины происходящих изменений геологической среды в районе размещения железнодорожных путей.

## Постановка задачи

Эксплуатационная длина главных путей Северной железной дороги (СЖД) насчитывает около 1045 км, большая часть из которых размещена в условиях Крайнего Севера. Проработка вопросов технологии микросейсмических наблюдений и способам обработке данных проводилась на участке СЖД, Онежский район Архангельской области.

Объектом исследований является земляное полотно железной дороги в районе заторфованных грунтов. Решалась задача по определению причин просадки грунтов на участке, отмеченный на схеме Рис. 1.

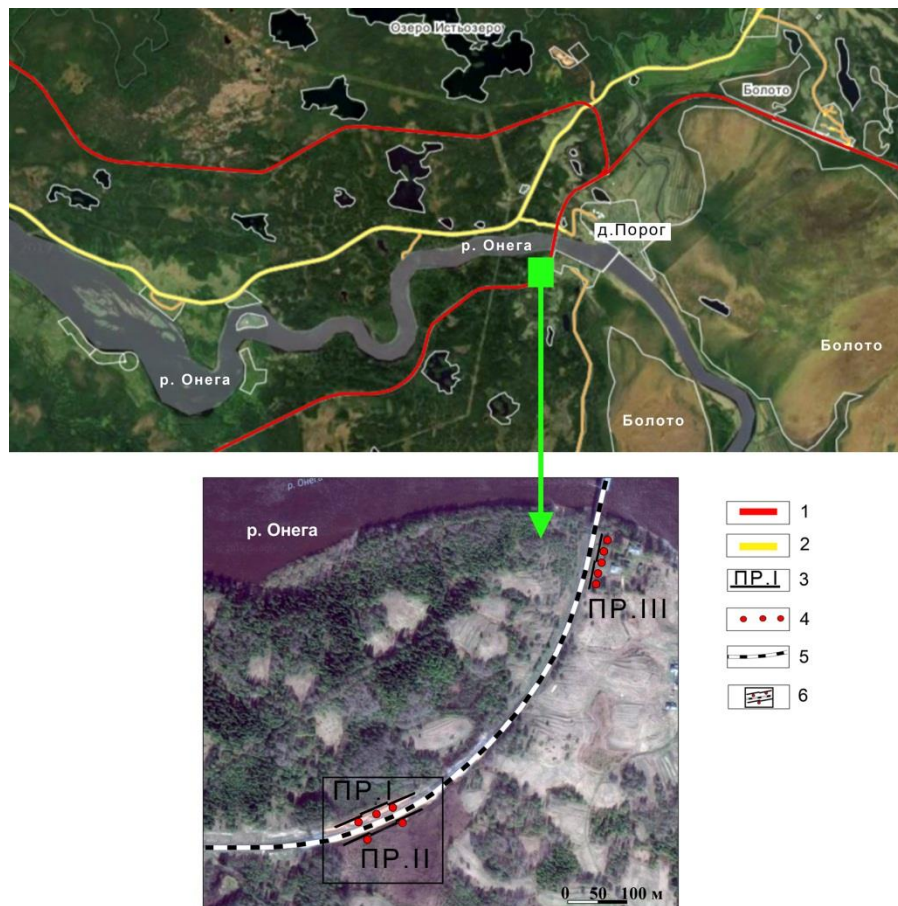


Рис. 1. Схема проведения работ: 1 – линия железной дороги; 2 – автомобильная трасса; 3 – профили инженерной сейсморазведки; 4 – места установки сейсмической аппаратуры; 5 – железная дорога; 6 – участок обследования

Инженерно-геологические условия территории Онежского района определяются равнинным и слабоволнистым характером местности, развитием на преобладающей части территории поверхностных песчано-глинистых ледниковых отложений, песчано-глинистых осадков последних морских трансгрессий, различной их мощности [5, 6, 7].

Существенным фактором, от которого зависит состояние железнодорожного полотна, являются инженерно-геологические характеристики грунтов, уровень грунтовых вод и литологический состав



подстилающих пород. В целом, согласно СП 11-105-97 [8], территория района отнесена ко II категории сложности инженерно-геологических условий. Участок исследований находится в пределах аккумулятивной равнины озерно-ледникового происхождения, приморской низменности. В пределах низменных равнин залегают неоднородные, тонкослоистые, текучие глинистые водонасыщенные отложения, мощность которых колеблется от нескольких метров до 10 м [7].

Особенности климата района (избыточное увлажнение) и литологический состав слабопроницаемых покровных отложений характеризуют приповерхностное залегание грунтовых вод (менее 2 м). Поверхность грунтовых вод повторяет очертания пологоволнистого рельефа и местами, во впадинах между холмами и грядами, смыкается с болотными водами. На заболоченных территориях мощность торфа колеблется от десятых долей метра до 2 м. На болотных массивах мощность торфа, как правило, составляет 3-6 м, местами достигает 8-10 м. Торф подстилается обычно слабыми грунтами.

### **Принятые допущения**

Для данного участка железнодорожной насыпи, в связи с отсутствием информации об инженерно-геологических изысканиях и типе земляного полотна, исходя из общих сведений о районе проведения работ [5, 7] и СП 32-104-98 [9], нами сделано предположение, что насыпь высотой до 3 м, спроектирована и выполнена с полным или частичным удалением торфа из основания с заменой его минеральным грунтом (песчано-гравийная смесь).

### **Сейсмическая аппаратура**

При регистрации микросейсм района размещения железнодорожной насыпи, а также воздействий на грунт основания от проходящих составов, использовалась широкополосная сейсмическая аппаратура CMG-6TD фирмы Guralp (Великобритания) [10] и Trillium Compact 120s фирмы Nanometrics (Канада) [11]. Датчики были установлены согласно схеме Рис. 1. Оси датчиков располагались вдоль (X) и поперек (Y) насыпи. Шаг между датчиками был выбран 15 м исходя из предполагаемой зондирующей глубины ВЧР.

Для малоглубинных сейсмических исследований ВЧР применялась телеметрическая сейсморазведочная система ТЕЛСС-402 фирмы ООО «ГЕОСИГНАЛ» [12]. Прием сейсмических Р и S волн осуществлялся вертикальными и горизонтальными сейсмоприемниками. Возбуждение волн проводилось ударами кувалды весом 8 кг по плоской металлической плите. Схема расположения профилей представлена на Рис. 1. Расстояние между приемными каналами 2 м, суммарная длина профиля 150 м.

Обработка материалов проводилась с помощью специализированных программ «RadExPro 2016» [13].

### Материалы и методы исследования

Основным источником относительно сильных сейсмических колебаний в районе пролегания железнодорожного полотна СЖД является железнодорожный транспорт. При совпадении резонансной частоты пород системы «насыпь-подстилающие грунты оснований» с частотой сейсмических колебаний от проходящих составов, динамическая нагрузка на насыпь существенно возрастает, что может привести к чрезвычайным ситуациям.

В условиях возможных вариаций состояния грунтов насыпи (карстоопасные районы, заболоченные участки) при невозможности или нецелесообразности ремонтных работ по ее реконструкции оптимальными являются непрерывные (мониторинговые) наблюдения за резонансной частотой грунтов. В данном случае, изменение резонансной частоты будет являться индикатором происходящих в грунтах процессов изменения их состояния. В связи с этим, возникает необходимость оценки резонансных частот грунтов, которые могут быть рассчитаны как теоретически, так и экспериментально.

Теоретический расчет резонансной частоты выполняется при наличии информации о скоростях поперечных волн в исследуемой среде по формуле [14]:

$$f_{rn} = \frac{(2n+1)V_s}{4Z}, \quad (1)$$

где  $V_s$  – средняя скорость поперечных волн в верхнем слое;  $Z$  – мощность верхнего слоя;  $n$  – номер моды.

Основным преимуществом теоретического расчета является возможность моделирования, позволяющего оценить изменения значений собственных частот при изменении состояния системы «насыпь-подстилающие грунты оснований» (например, за счет влагонасыщенности, глубины промерзания и т.д.) и/или ее строения (например, за счет изменения мощности насыпи, изменения характеристик строительного материала и др.). Таким образом, результаты теоретических расчетов, могут быть использованы при планировании мероприятий, направленных на реконструкцию и укрепление железнодорожных насыпей.

В основу эмпирических исследований был положен комплекс пассивных и активных сейсмических методов.

Для расчета резонансной частоты по данным пассивных сейсмических наблюдений, существует ряд методов:

1. Инженерно-сейсмический метод, основанный на спектральном анализе сейсмического шума, позволяющий из всего спектра микросейсм

выделить сигналы, соответствующие гармоническим источникам колебаний [15]. Оценка динамической характеристики записи основана на получении спектров мощности  $S_{ij}(f)$  для каждой из компонент регистрации ( $i, j = X, Y, Z$ ) и функции когерентности  $K_{ij}(f)$  попарно для компонент:

$$K_{ij}(f) = \frac{|S_{ij}(f)|}{\sqrt{S_{ii}(f) \cdot S_{jj}(f)}}, \quad (2)$$

где  $|S_{ij}(f)|$  – взаимный осредненный спектр. Функция когерентности практически является коэффициентом корреляции для каждой частотной составляющей, присутствующей на компонентах регистрации [16].

Для слежения за динамикой микросейсмического процесса анализируются изменения во времени этих оценок. Проводятся расчеты в скользящем по времени окне, строятся спектрально-временные диаграммы (СВАН) –  $S_{ij}(f, t)$  для соответствующих записей.

2. Метод Н/В – отношения горизонтальных компонент микросейсм к вертикальным. Данный метод описан в работе [17] и основан на том, что резонансная частота фундаментальной моды может быть определена из отношения спектров горизонтальных и вертикальных компонент сейсмического шума:

$$f_{r0} = \sqrt{\frac{S^2(\omega)_{NS} + S^2(\omega)_{WE}}{2S^2(\omega)_V}}, \quad (3)$$

где  $S(\omega)_{NS}$ ,  $S(\omega)_{WE}$  – спектры горизонтальных компонент записи;  $S(\omega)_V$  – спектр вертикальной компоненты записи.

Таким образом, в зависимости от условий, возможно, применять как теоретический, так и эмпирический подходы к определению резонансных частот грунтов железнодорожных насыпей.

Методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW) на основе полевых записей волнового поля получены скоростные модели изменения значений скоростей поперечных волн. Данный метод был впервые описан в работах [18, 19, 20] и в последующем развит в работе [21]. Метод позволяет получать одномерные скоростные модели геологической среды вдоль линейных сейсморазведочных профилей на основе анализа дисперсионных свойств поверхностных волн. В основе метода многоканального анализа поверхностных волн лежит спектрально-волновое (f-k) преобразование сигнала с последующим его сложением по всем каналам [22].

В качестве активного сейсмического метода использовалась инженерная сейсморазведка на преломленных (МПВ) и отраженных (ОГТ) волнах [23], которая применялась для построения геолого-геофизических разрезов, выделения возможных зон неоднородностей и определения скоростных характеристик среды. В основе МПВ лежит определение

времени пробега преломлённой волны (продольной или поперечной) от источника её возбуждения до пункта регистрации. Одним из условий применения данного метода является увеличение скорости продольных волн с глубиной. Вычисляется глубина залегания по системе встречных и нагоняющих географов, совмещенными способами  $t_0$  и полей времен, строятся преломляющие границы; граничная скорость в преломляющем пласте и отношение  $V_s/V_p$  характеризует его литологический состав [24].

## Результаты исследований

На Рис. 2. представлен обобщенный скоростной глубинный разрез среды по профилю I (схема представлена на Рис. 1) на участке с нарушениями в системе «насыпь-грунты оснований». Комплексирование активных сейсмических методов позволяет получить более детальный скоростной разрез. Методом многоканального анализа поверхностных волн удалось выделить нижнюю границу насыпи, которую не удалось обнаружить по методу МПВ, из-за сильной зашумленности сигнала.

Таким образом, первая граница выделяется на глубине от 0 до 3 м, средние скорости поперечных волн, определенные по методу MASW, составляют 150 м/с, отношение  $V_s/V_p = 0.33 - 0.4$  и соответствуют щебеночно-песчаному слою [5, 7].

Преломляющая граница выделяется на глубине от 2 до 5 м, с заметным погружением в центре до 8-9 м. Средние скорости продольных волн до границы  $V_p = 333 - 443$  м/с, что характеризует данный слой как неводонасыщенный. Отношение  $V_s/V_p = 0.56$  позволяет предположить, что данному слою соответствуют переслаивание супесей, суглинка и песка ледникового возраста [5, 7]. Далее залегает слой с повышенными скоростями до 2117 м/с, что соответствует глинистым водонасыщенным отложениям.

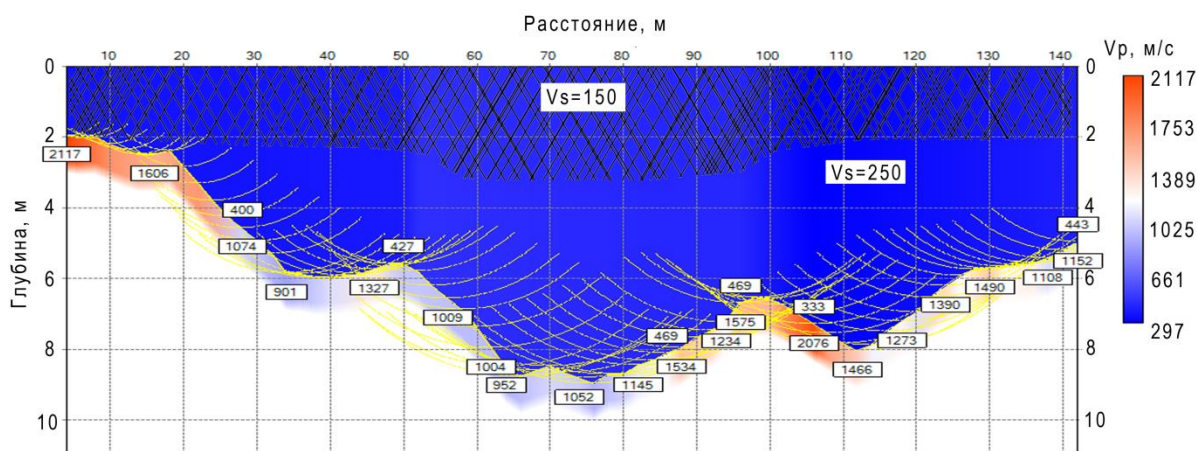


Рис. 2. Обобщенный скоростной сейсмический разрез по профилю I, штрихованные линии – нижняя граница насыпи, выделенная по методу многоканального анализа поверхностных волн

На Рис. 3 представлен скоростной глубинный разрез среды по профилю II (схема на Рис. 1) на участке с нарушениями в системе «насыпь-грунты оснований» по другую сторону от насыпи, чем профиль I. Аналогично профилю I, выделяется слой щебеночно-песчаных отложений по методу MASW, на глубине от 0 до 4 м, средние скорости поперечных волн составляют 150 м/с, отношение  $V_s/V_p = 0.3 - 0.47$ .

Преломляющая граница, согласно обоим методам MASW и МПВ, выделяется на глубине от 8 до 12 м с большим погружением в начале профиля. Средние скорости продольных волн до границы  $V_p = 315 - 495$  м/с, средние скорости поперечных волн ( $V_s$ ) на глубинах от 3 до 13 м в пределах от 250 до 280 м/с, отношение  $V_s/V_p = 0.56$ . Можно предположить, что данные характеристики соответствуют переслаиванию ила суглинистого, супесей, суглинка и песка ледникового возраста.

В нижнем слое отмечаются высокие граничные скорости до 2397 м/с, предположительно соответствующие глинистым водонасыщенным отложениям [7].

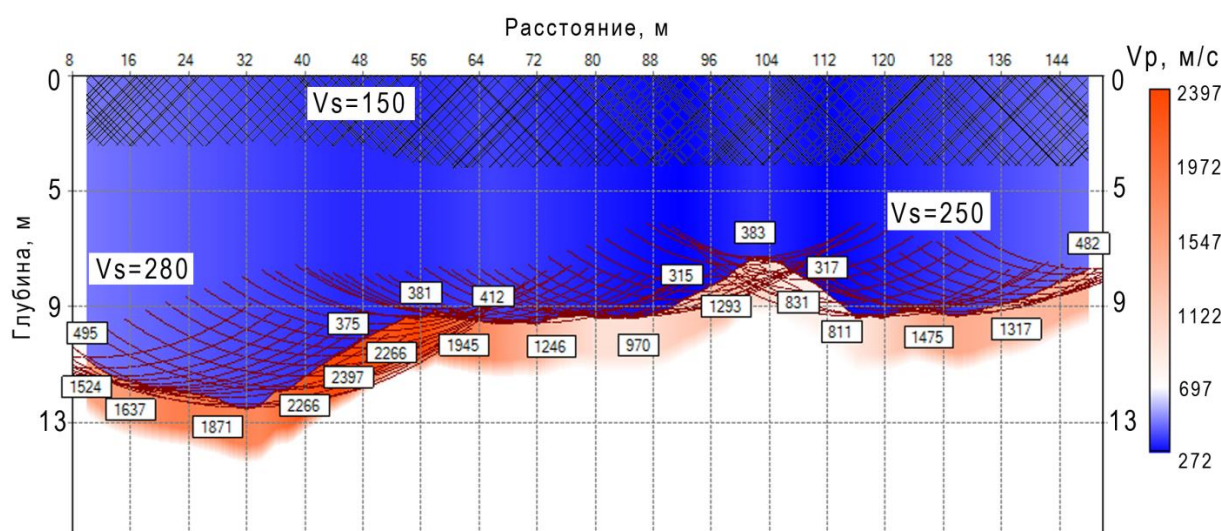


Рис. 3. Обобщенный скоростной сейсмический разрез по профилю II (4-6), штрихованные линии – нижняя граница насыпи, выделенная по методу многоканального анализа поверхностных волн

Таким образом, на неблагоприятном участке выделяется слой грунтов (от 4 до 8 м) с пониженными скоростями, имеющий различный наклон – рельеф, созданный ледниковой аккумуляцией. Данная особенность подчеркивается и повышенными скоростными характеристиками – водонасыщенностью глинистых пород, что, возможно, является одной из причин просадки грунтов на данном участке.

На Рис. 4 представлен скоростной глубинный разрез среды по профилю III для благоприятного участка без нарушений в системе «насыпь-грунты оснований». Слой щебеночно-песчаных отложений по методу MASW выделяется на глубинах около 1.5 м. Преломляющая граница

выделяется на глубинах от 2.5 до 4 м с небольшим прогибанием до 5 м в центре. Средние скорости продольных волн до границы  $V_p = 344 - 702$  м/с. Средние скорости поперечных волн ( $V_s$ ) в верхнем слое от 150 до 250 м/с, отношение  $V_s/V_p = 0.35 - 0.43$ . Можно предположить, что данные характеристики, аналогично и предыдущему участку, соответствуют переслаиванию щебеночно-песчаного слоя, суглинистого ила, супесей, суглинка и песка ледникового возраста [7]. Далее залегает слой, предположительно, глинистых водонасыщенных отложений (скорости от 1212 до 2102 м/с).

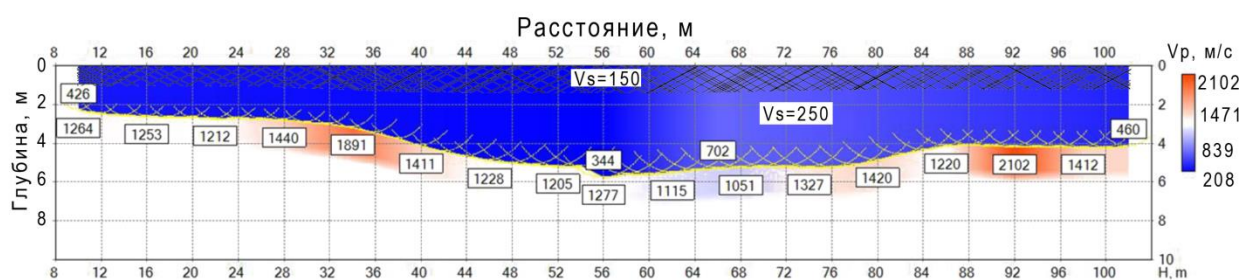


Рис. 4. Обобщенный скоростной сейсмический разрез по профилю III (7-8), штрихованные линии – нижняя граница насыпи, выделенная по методу многоканального анализа поверхностных волн

Как видно из Рис. 4, для данного участка слой с пониженными скоростями имеет значительно меньшую мощность и относительно плоскую границу, показатели увеличения скорости единичны. Данный факт является косвенным признаком большей несущей способности грунтов на этом участке.

Таким образом, использование активных сейсмических методов позволило получить скоростную модель системы «насыпь-грунты оснований» до глубин 22.5 м. Существенно, что величины скоростей и форма границ позволяют предположить природу неблагоприятных явлений в грунте полотна.

Проведем комплексирование полученной информации с результатами пассивных сейсмических методов. Рассмотрим результаты спектрального анализа на основе данных пассивных сейсмических методов. Для оценки уровня воздействия поездов для участка исследования сравнивались спектры ускорений до и во время движения грузового состава (Рис. 5). Выделяются два широкополосных пика, соответствующие первой и второй модам колебания системы «насыпь-подстилающие грунты оснований», диапазоны – 1.6-2.4 Гц и 4.7-5.5 Гц. В среднем движение грузовых поездов увеличивает общий уровень колебаний системы в 100 раз (Рис. 5а), при этом наибольшему усилению амплитуд ускорений подвергается вторая мода. Наиболее «ярко» выделяется частота 5.9 Гц, появляющаяся при движении состава и характеризующая максимальную нагрузку на систему «насыпь-

подстилающие грунты оснований». При этом амплитуда поперечной компоненты увеличивается еще в 2 раза по отношению к увеличениям на других компонентах и для других частот, связанными с движением поезда (Рис. 5б). Возможно, это обусловлено кривизной исследуемого участка пути (Рис. 1).

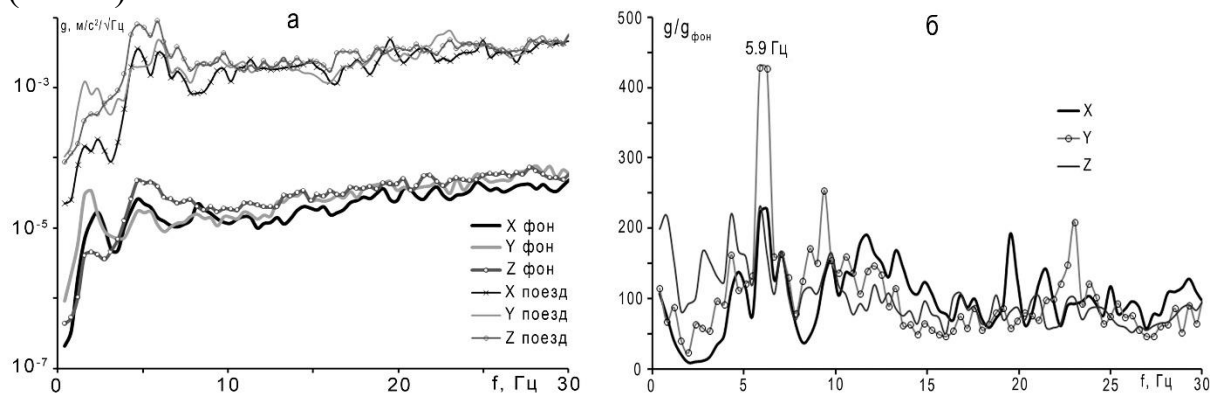


Рис. 5. Спектры воздействия до и во время движения товарного состава для неблагоприятного участка земляного полотна (а) и спектры ускорения при движении поезда (б)

На СВАН-диаграмме спектров мощности скоростей смещений для неблагоприятного участка, представленной на Рис. 6, также выделяется две вертикальные полосы в районе 2 Гц и 5 Гц, отражающие динамику колебаний системы «насыпь-грунты оснований». Наиболее отчетливо проявляется сигнал на частоте 2 Гц (одна из колебательных мод системы) для горизонтальных составляющих (X, Y), что обусловлено конструктивными особенностями насыпи.

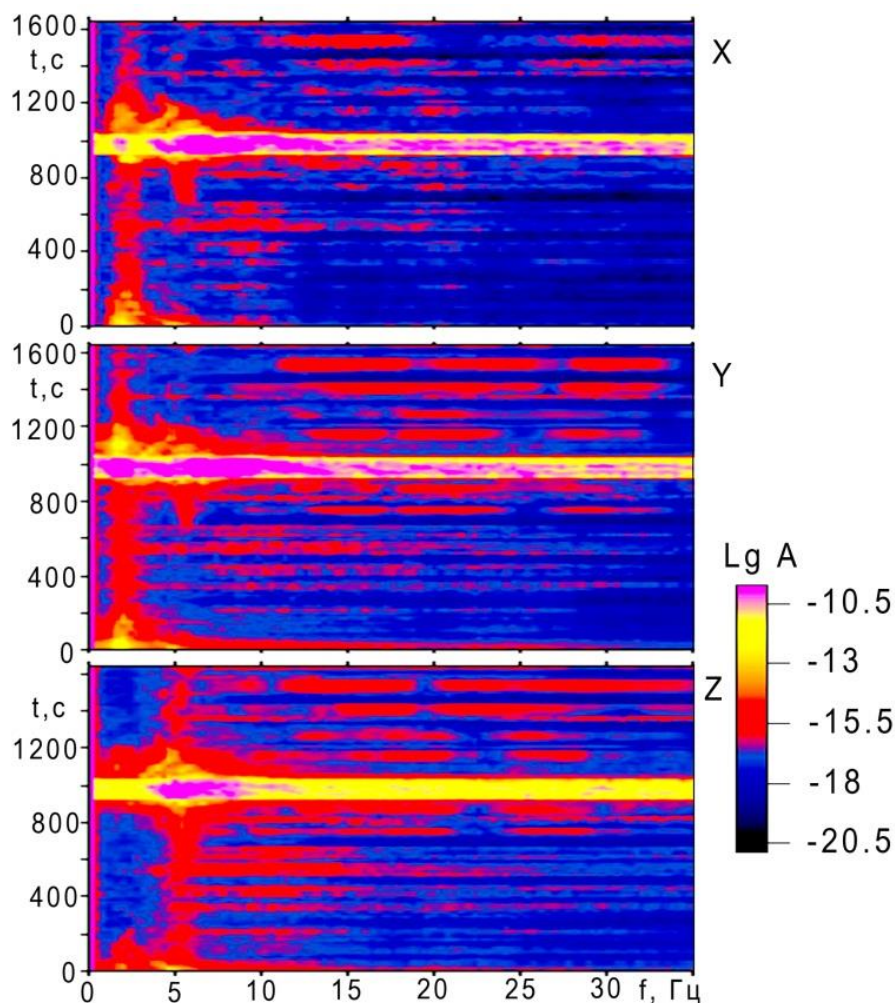


Рис. 6. СВАН-диаграмма системы «насыпь-подстилающие грунты оснований». Яркий широкополосный горизонтальный сигнал – проезжающий грузовой состав

Сигнал на частоте около 5 Гц лучше «виден» на вертикальной компоненте Z, на горизонтальных компонентах сигнал проявляется при воздействии поезда (яркий широкополосный горизонтальный сигнал), что отражает появление резонанса при движении состава с системой «насыпь-грунты оснований».

Для сравнительного анализа рассмотрим аналогичную ситуацию для благоприятного участка (Рис. 1), уровень бровки насыпи не превышает 0.4 м. На Рис. 7 представлены спектры воздействия до и во время движения грузового состава для этого участка земляного полотна и спектры ускорения при движении состава.

Анализ Рис. 7 показывает достаточно равномерное распределение нагрузки по частотам. Разница в уровнях мощности фона микросейсм в спокойное время и при движении поезда больше на три порядка, чем для неблагоприятных участков. В спектрах при движении состава по данному участку наиболее ярко выделяется пик на частоте 2.0 Гц, что, скорее всего, обусловлено явлением резонанса с системой «полотно-грунты оснований».



Однако, абсолютный уровень воздействия мал и не оказывает существенного влияния на состояние рассматриваемой системы.

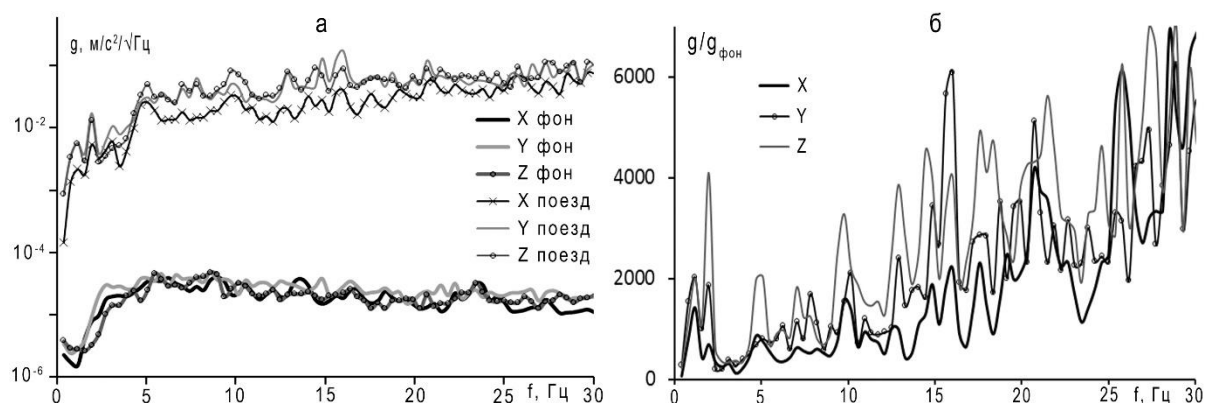


Рис. 7. Спектры воздействия до и во время движения товарного состава для благоприятного участка земляного полотна (а) и спектры ускорения при движении поезда (б)

### Обсуждение результатов

К опасным физико-геологическим процессам на рассматриваемой территории вдоль Северной железной дороги относятся:

- наличие в верхнем слое геологического разреза неустойчивых по физическим характеристикам грунтов;
- заболачивание, вызванное геоморфологическим положением отдельных участков дороги, высоким уровнем грунтовых вод территории, наличием в разрезе рыхлых отложений слабопроницаемых глинистых отложений.

Результаты активных сейсмических методов позволили выявить на исследуемом участке относительно большую мощность ослабленных грунтов до 9 м, возможно с включениями торфа, залегающих под железнодорожной насыпью. Нагрузка от поездов в совокупности с резонансным эффектом, образующимся в ослабленном грунте и обнаруженным пассивными сейсмическими методами, приводят к его повышенным деформациям, что способствует появлению просадок. Деформации, вызванные явлением резонанса, незначительны по сравнению с нагрузкой, создаваемой проезжающими составами.

Мониторинг состояния насыпи (участок длиной до 300 м) для анализа резонансных частот возможен с использованием одного датчика, предпочтительно акселерометра с нижней частотой от 1  $\text{Гц}$ , но и использование короткопериодного велосиметра также будет достаточным условием.

Следующим этапом данных исследований является задание расчетной модели и рассмотрение различных ситуаций при изменении физических характеристик подстилающих грунтов и воздействий от поездов.

В конечном результате предполагается создание действующего макета технологии экспресс-оценки, включающего экспериментальную часть: аппаратуру, процедуру сбора, обработки и передачи данных, алгоритма принятия решения. При выполнении теоретической части планируется получение новых представлений о взаимодействии подвижной системы «насыпь-подстилающие грунты оснований» и создание базы данных об изменении несущей способности грунтов при реальных природно-техногенных воздействиях. Необходимо разработать методику прогнозирования поведения полотна при различных вариантах климатических изменений и разных нагрузках.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-20-02119 «Разработка технологии сейсмического мониторинга и экспресс оценка состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера и Сибири».

### **Библиографический список**

1. Евразия Вести IX 2010.  
– URL: <http://www.eav.ru/publs.php?number=2010-09> (28.08.2017).
2. Cheng F. Multichannel analysis of passive surface waves based on cross correlations / F. Cheng, J. Xia, Y. Luo, Z. Xu, L. Wang, C. Shen, R. Liu, Y. Pan, B. Mi, Y. Hu // *Geophysics*. – 2016. – no. 81(5). – pp. 1–10. DOI: 10.1190/geo2015-0505.1.
3. Draganov D. Reflection images from ambient seismic noise / D. Draganov, X. Campman, J. Thorbecke, A. Verdel, K. Wapenaar // – *Geophysics*, 2009. – no. 74(5). – pp. A63–A67.
4. Le Feuvre M. Passive multi-channel analysis of surface waves with cross-correlations and beamforming. Application to a sea dike / M. Le Feuvre, A. Joubert, D. Leparoux, P. Côte // *Journal of Applied Geophysics*, 2015. – no. 114. – pp. 36–51.
5. Схема территориального планирования Онежского муниципального района. Том 1. – Санкт-Петербург, 2014. – URL: [http://www.onegaland.ru/about/gradostroitelstvo/skhema\\_terr\\_plan/](http://www.onegaland.ru/about/gradostroitelstvo/skhema_terr_plan/) (02.10.2017).
6. Зоренко Т. Н., Черемхина Г. М., Корепанов В. С., Вертунова Л. С., Левин В. И., Рыбалко А. Е. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Серия Онежская. Лист Q-37-XXXIII,

XXXIV. Объяснительная записка. Санкт-Петербург, 2000. – 118 с. – URL: <http://www.geokniga.org/sites/.../q-37-xxvii-xxviii-petrominsk-geosudarstvennaya-geologic> (02.10.2017).

7. Ключева В. Н., Покровская М. В., Баранов М. И. Инженерно-геологическая съемка масштаба 1:200000. Листы: Р-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII // Производственное геологическое объединение «Гидроспецгеология», Гидрогеологическая экспедиция 29 района. Архангельский филиал ФБУ «ТФГИ по Северо-Западному федеральному округу». – 1984.

8. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Свод правил. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200000255> (28.08.2017).

9. СП 32-104-98 Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм. – М.: ГОССТРОЙ России, 1999. – URL: <http://aquagroup.ru/normdocs/4321#i486962> (28.08.2017).

10. Guralp Systems. – URL: <http://www.guralp.com/> (28.08.2017).

11. Nanometrics. – URL: <http://www.nanometrics.ca> (28.08.2017).

12. Геосигнал. – URL: [www.geosignal.ru](http://www.geosignal.ru) (28.08.2017).

13. RadExPro. – URL: <http://radexpro.com/> (28.08.2017).

14. Lane J. W. Estimation of bedrock depth using the horizontal-to-vertical (H/V) ambient-noise seismic method / J. W. Lane, E. A. White, G. V. Steele, J. C. Cannia // Theses. Near Surface 2008-14th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – Philadelphia, 2008. – pp. 1–13.

15. Юдахин Ф. Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий / Ф. Н. Юдахин, Н. К. Капустян, Г. Н. Антоновская. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 156 с.

16. Юдахин Ф. Н. Выявление слабоактивных разломов платформ с использованием наносейсмической технологии / Ф. Н. Юдахин, Н. К. Капустян, Г. Н. Антоновская, Е. В. Шахова // Доклады академии наук. – 2005. – Т. 405. – № 4. – С. 533–538.

17. Nakamura Y. A. Method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. – 1989. – vol. 30. – no. 1. – pp. 25–33.

18. Al-Husseini M. I. Dispersion patterns of the ground roll in eastern Saudi Arabia / M. I. Al-Husseini, J. B. Glover, B. J. Barley // Geophysics, 1981. – no. 46(2). – pp. 121–137.

19. Mari J. L. Estimation of static corrections for shear-wave profiling using the dispersion properties of Love waves // Geophysics, 1984. – no. 49(8). – pp. 1169–1179.

20. Gabriels P. In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves / P. Gabriels, R. Snieder, G. Nolet // Geophysical prospecting, 1987. – no. 35(2). – pp. 187–196.

21. Park C. B. Multichannel analysis of surface waves / C. B. Park, R. D. Miller, J. Xia // *Geophysics*, 1999. – no. 64(3). – pp. 800–808.

22. Douze E. J. Seismic array noise studies at Roosevelt Hot Springs, Utah geothermal area / E. J. Douze, S. J. Laster // *Geophysics*, 1979. – no. 44(9). – pp. 1570–1583.

23. Боганик Г. Н. Сейсморазведка: Учебник для вузов / Г. Н. Боганик, И. И. Гурвич. – Тверь: Издательство АИС, 2006. – 744 с.

24. Метод преломленных волн / под ред. А. М. Епинатьевой. – М.: Недра, 1990. – 297 с.

#### **Информация об авторах:**

АНТОНОВСКАЯ Галина Николаевна, к.т.н., заведующая лабораторией сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [essm.ras@gmail.com](mailto:essm.ras@gmail.com).

АФОНИН Никита Юрьевич, младший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [afoninnikita@inbox.ru](mailto:afoninnikita@inbox.ru)

БАСАКИНА Ирина Михайловна, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [ibasakina@yandex.ru](mailto:ibasakina@yandex.ru)

КАПУСТЯН Наталия Константиновна, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [nkapustian@gmail.com](mailto:nkapustian@gmail.com)

БАСАКИН Борис Григорьевич, инженер лаборатории сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [bgborislen@gmail.com](mailto:bgborislen@gmail.com)

ДАНИЛОВ Алексей Викторович, младший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [danilov.aleksey.vikt@gmail.com](mailto:danilov.aleksey.vikt@gmail.com).

UDC 550.34.01

**G. N. Antonovskaya, N. Y. Afonin, I. M. Basakina, N. K. Kapustian,  
B. G. Basakin, A. V. Danilov**

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research  
Russian Academy of Science  
(Arkhangelsk, Russia)

**POSSIBILITIES OF SEISMIC METHODS FOR ESTIMATION OF RAILWAY  
SUBGRADE STATE IN CONDITIONS OF FAR NORTH**

Date of receipt 06.10.2017

Decision to publish on 28.10.2017

**Abstract.** The article presents results of monitoring state of railway subgrade using seismic methods in the Far North area.

**Purpose:** The purpose of the studies is to find out reasons of subgrade subsidence in turfed soils of Onezhsky District of Arkhangelsk Oblast.

**Methodology:** Studying soils in foundations of subgrade, a complex of active and passive methods was used, including: seismic exploration of refracted waves, multi-channel analysis of ground waves, and engineering seismic analysis based upon spectrum analysis of seismic noises. This complex enabled considering and estimating the system “subgrade-soils of foundations”.

**Results:** A relative high capacity of weak soils, probably containing turf, lying under subgrade. Sections of increased water saturation in subgrade soils were found out. Loads from passing trains and resonant effect in weak soils cause its compression resulting in emergence of subsidence. Resonant effects whereby are not that strong, whereas passing trains have a more significant impact on the state of subgrades.

**Practical significance:** Elaboration of technology of quick estimation of state of railway subgrade for immediate detection of a dangerous defect at an early stage of its development is a topical and acute challenge.

**Keywords:** railway track subgrade, seismic vibrodiagnostics, passive seismic methods, Far North.

## **Introduction**

In the territory of the Russian Federation, in the regions of permafrost soils, more approximately 5 thousand kilometres (including the Baikal-Amur Mainline and most part of the Trans-Siberian Railway) of railways are operated [1]. Industrial exploration of the Far North and Siberia territories requires extending railway tracks with their simultaneous operation. A distinguished feature of subgrade foundations with permafrost, swampy and karst sections is an increased proneness to deformation of tracks caused by cryogenic, karst and suffosion, and suffosion processes in subgrade soils.

In order to increase traffic safety, JSC “RZD” pays special heed to development and implementation of different methods for monitoring subgrade

by virtue of mobile devices. Order of works in unstable places is set individually basing on data of instrumental and visual monitoring, on-site and engineering and geological (geophysical) investigations, calculations of strength and operation reliability of objects. In recent years, in Russia and abroad field measurements of soils have been gaining their popularity. These are, first and foremost, cone penetration test (CPT) and standard penetration test (SPT). It should be noted that, despite these methods being very efficient, they are not able to perform constant (uninterrupted) control of subgrade and soils under it. It is significant to detect failure at its early stage of development which is complicated when only one single method is used on dangerous/problematic sections. There is a necessity in much deeper study of the issue.

The amount of information about upper part of section (UPS) of the Earth crust could be significantly increased by virtue of new geophysical technologies, employing integration of different methods. In recent time, with development of instrumental and methodological bases, application of passive seismic methods, mainly microseismic, have been gaining more significance in studies [2, 3, 4]. The main advantages of such methods are lack of necessity in special sounding signal sources, relative simplicity and realisation accessibility.

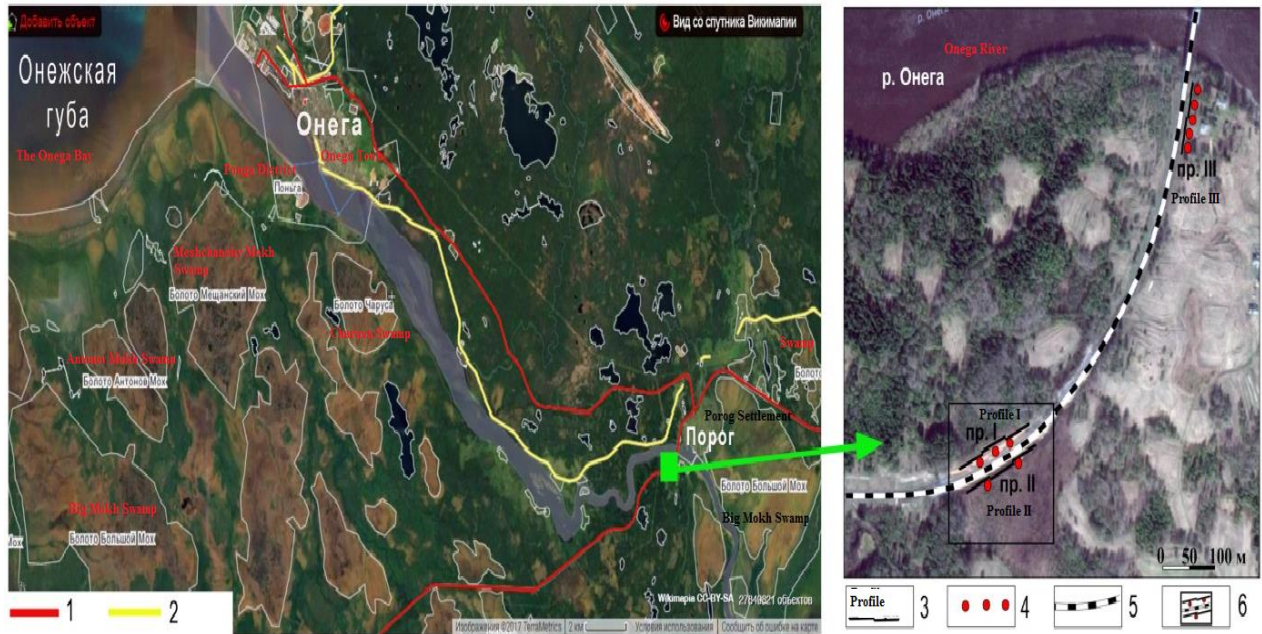
The notion “microseismic monitoring” encompasses a whole range of technologies, based upon analysis of waves of different origins and types (seismic emission, technology-related signals, surface waves, etc.). We are exploring methods of investigating UPS by means of picking out “necessary” signals from microseisms. It is essential to mention, that for getting fundamentally different information about the sphere, the captured wavefield may be simultaneously processed by different methods based on different “useful” constituents of microseisms.

Elaboration of technology of microseismic monitoring may be used either individually for acquiring quick estimation of subgrade state, or in combination with conventional methods for getting a picture of all alterations in the geological terrain in the area of railway construction.

### **Setting of the task**

Mainline operation length of the Severnaya Railway (Northern Railway) makes approximately 1045 km, most of which is located in the conditions of the Far North. Development of issues of technology of microseismic monitoring and methods of data processing was carried out in a section of the Severnaya Railway, Onezhsky District of Arkhangelsk Oblast.

The object for investigation is subgrade of railway in the area of turfed soils. During the investigation, a task was being solved to find out reasons of soil subsidence (pic. 1).



Pic. 1. Scheme of works carried out: 1 – railway line; 2 – automobile mainline; 3 – engineering seismic survey; 4 – places of installment of seismic equipment; 5 – railway in the area of the works; 6 – area of investigation

Engineering and geological conditions of the area near Onezhsky District are dictated by flat and slightly undulating features of terrain, development of sand and clay glacial deposits, sand and clay sediments of latest marine transgressions of different intensity [5, 6, 7].

A significant fact, on which the railway subgrade is dependent, is engineering and geological features of soils, groundwater level, and lithological composition of underlying rocks. Generally, according to Russia's Design and Construction Specifications 11-105-97 (СП 11-105-97) [8], the territory belongs to II category of complication in terms of engineering and geological conditions. It is our believe, that the section under investigation is located in area of depositional plain of glaciolacustrine deposits, seacoast lowland. In the lowland plains, there are basically non-homogeneous, thin-layered, flowing clay water-saturated deposits with the capacity varying from several to 10 metres [7].

Peculiarities of the region (excessive hydration) and lithological composition low permeable blanket deposits characterise shallow deposition of groundwater (less than 2 metres). The surface of groundwater contours outline of undulating relief and at some places, in pits between hills and ridges, converge with swamp water. In wetlands, turf capacity varies, as a rule, from 3 to 6 metres, or even 8-10 metres in some places. Turf is usually underlain by soft soils.

## **Accepted assumptions**

For this section, due to lack of information about engineering and geological surveys and type of subgrade, bearing in mind common data on the region of the work conducted [5, 7] and Construction Specifications 32-104-98 (CII 32-104-98), let us assume that a subgrade is up to 3 metres high. It has been designed and constructed after full or partial removal of turf layers from foundation being later replaced by mineral ground (sand and gravel mixture).

## **Seismic equipment**

Measuring microseisms in the region of subgrade location and traffic-induced impacts on subgrade soils, the Güralp CMG-6TD broadband seismometer (Great Britain) [10] and the Nanometrics Trillium Compact 120s (Canada) [11] were used. The sensors were deployed as in picture 1. Axes were located along (X) and across (Y) the subgrade. The distance between the sensors was set 15 metres on the basis of prospective depth of sounding of the UPS.

For shallow seismic surveys of UPS the “GEOSINGAL Ltd.” TELSS-402 telemetry seismic surveying system was used [12]. Receipt of P-waves and S-waves was carried out by vertical and horizontal sensors. Waves were induced 8 kg hammer being pounded on a flat metal plate. Scheme of profile location can be seen in picture 1. The distance between receiving channels was 2 metres, total length of profile was 15 metres. Processing of received data was carried out in programmes “RadExPro 2016” [13].

## **Materials and methods of studies**

The main source of strong seismic vibrations in the region of the Severnaya Railway track is railway transport. When resonant frequencies of rock system “subgrade and underlying soils” equal seismic vibrations frequencies of passing trains, dynamic load on subgrade significantly rises, which may result in emergency situations.

In the conditions of possible variations of subgrade soils state (karst regions, swamp areas), if it is impossible or not reasonable to carry out its reconstruction works, the most optimal would be to uninterrupted monitoring of resonant frequencies of soils. In this case, changes in resonant frequency would mark processes of changes in soils. Therefore, there arises a necessity of estimation of resonant frequencies of soils, which can be calculated both theoretically and experimentally.

Theoretical calculation of resonant frequency is carried out, provided that the information about speeds of transversal waves in the soils being surveyed is available, according to the formula [14]:



$$f_{rn} = \frac{(2n+1)V_s}{4Z},$$

where  $V_s$  – average speed of waves in the upper layer;  $Z$  – upper layer thickness;  $n$  – mode number.

The main advantage of theoretical calculation is that it provides the possibility of modeling, which allows to estimate alteration of values of natural frequencies when the state of the system “subgrade and underlying soils” changes (for example, because of water saturation, depth of freezing, etc.) and/or (for example, because of alteration of thickness of subgrade, changes of construction material properties, etc.). Thus, results of theoretical calculations could be used while planning works aimed at reconstructing and reinforcing railway subgrades.

The empirical studies were based upon a combination active and passive seismic methods.

For calculation of resonant frequency by passive seismic surveys, there exists a range of methods:

1. Engineering and seismic methods based upon spectrum analysis of seismic noise, allowing us to single out signals from the whole spectrum of microseisms corresponding to harmonic sources of oscillations [15]. Estimation of dynamic property of the record is based upon obtaining power spectrum  $S_{ij}(f)$  for each of components of registration ( $i, j = X, Y, Z$ ) and coherence function  $K_{ij}(f)$  in pairs for components:

$$K_{ij}(f) = \frac{|S_{ij}(f)|}{\sqrt{S_{ii}(f) \cdot S_{jj}(f)}},$$

where  $|S_{ij}(f)|$  – mutual averaged spectrum. Coherence function is practically a correlation coefficient for each frequency constituent, present in registration component [16].

For monitoring dynamics of microseismic process of alterations in time of changes of these estimations are analysed. Calculations are carried out in moving average, spectral time diagrams (STD) are built up –  $S_{ij}(f, t)$  for corresponding records.

2. H/V Methods – the relation of the horizontal to vertical components of microseism. This method has been described in the studies [17] and is based upon the fact that resonant frequency of fundamental mode can be determined from the relation of spectra of horizontal and vertical components of seismic noise:

$$f_{r0} = \sqrt{\frac{S^2(\omega)_{NS} + S^2(\omega)_{WE}}{2S^2(\omega)_V}},$$

where  $S(\omega)_{NS}$ ,  $S(\omega)_{WE}$  – spectra of horizontal components of the record;  $S(\omega)_V$  – spectrum of vertical component of the record.

Thus, bearing in mind dependence upon conditions, we can use either theoretical or empirical approaches to determination of resonant frequencies of railway subgrade soils.

By virtue of multichannel analysis of surface waves on the basis of field records of wavefield, velocity models of alteration of transverse wave speed value have been obtained. This method was first described in the studies [18, 19, 20] and was further improved in the study [21]. The method allows obtaining one dimension velocity models of geological terrain along linear seismic profiles on the bases of analysis of dispersive properties of surface waves. The multichannel method of surface waves analysis is based upon the spectral-wave (f-k) signal transformation followed by its addition in all channels [22].

As the active seismic methods, engineering seismic tomography was used for refracted and reflected waves [23], which was used for geological and geophysical profiles, identification of possible zones of inhomogeneities and determination of velocity properties of terrain. The refracted waves method is based on determination of refracted wave travel time (longitudinal or transverse) from the source of its excitation till the registration point. One of the conditions for this method to be applied is to increase velocity of transverse waves with depth. The depth of occurrence is calculated by the system of catching and counter travel time, combined by methods  $t_0$  and time fields, refracting boundaries are created; boundary velocity in refracting layer and relation  $V_s/V_p$  characterise its lithology [24].

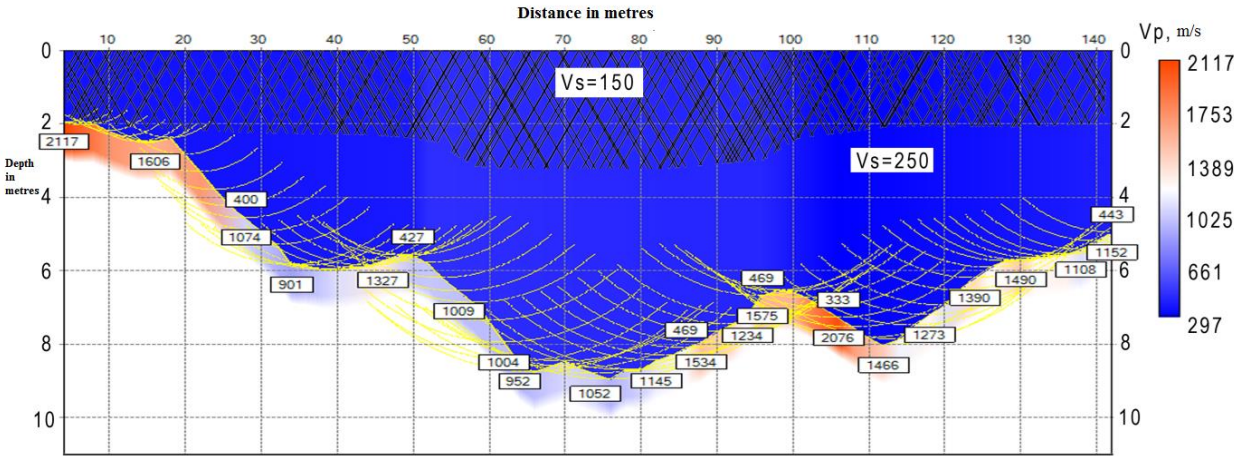
### **Result of the studies**

In the picture 2 the generalised velocity depth profile I (scheme can be seen the picture 1) in the section with “subgrade and underlying soils” system of disturbances is shown. The integration of active seismic methods allows receiving a more detailed velocity profile. Using methods of multichannel analysis of surface waves, we achieved to detect lower boundary of subgrade, which was not possible to do by means of refracted waves method due to excessive noise contamination.

Thus, the first boundary is singled out in the depth from 0 till 3 metres, average transverse waves velocity, determined by method MASW (multichannel analysis of surface waves), made 150 m/s, relation was  $V_s/V_p = 0.33 - 0.4$  and corresponded to sand and gravel layer [5, 7].

Refracted boundary is detected at the depth from 2 till 5 metres, with noticeable immersion in the centre up to 8–9 metres. Average velocity of transverse waves before the boundary  $V_p = 333 - 443$  m/s, thus making it an aerated zone. The relation  $V_s/V_p = 0.56$  makes it possible to assume that this layer is characterised by intercalation of sand, sandy loam and loam of ice age [5, 7].

Further below, there is a layer with increased velocities up to 2117 m/s, which corresponds to clay water-saturated depositions.

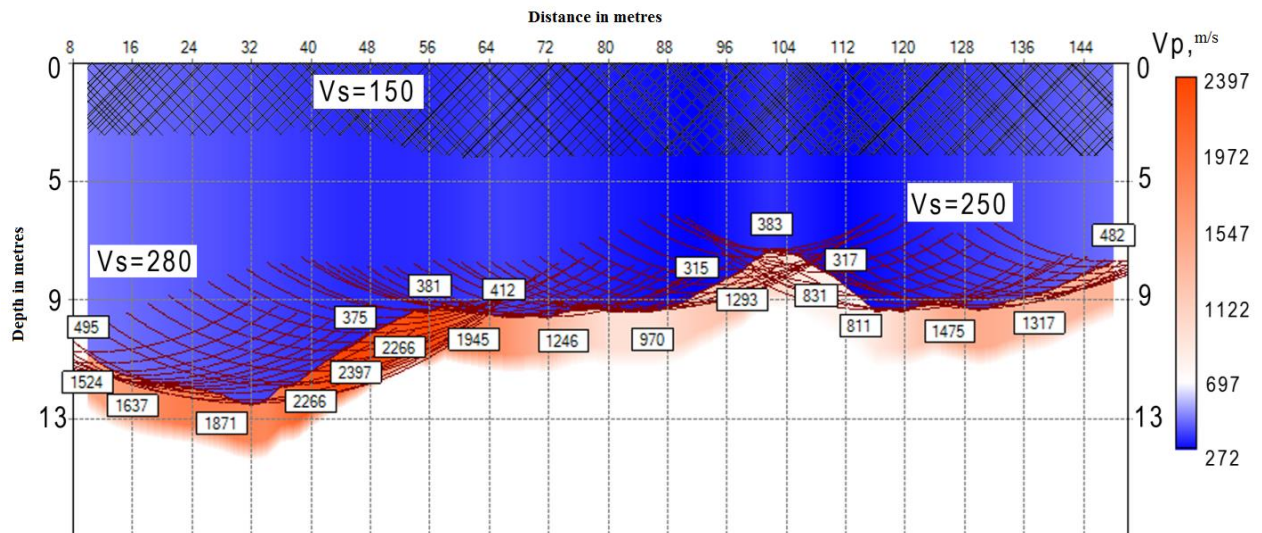


Pic. 2. Generalised velocity profile I. Hatched lines – lower boundary of subgrade, detected by virtue of MASW

In the picture 3, the velocity depth profile II (scheme is in the picture 1) in the section with “subgrade-underlying soils” disturbance system is shown, but on the other side of the subgrade with profile I. Just like profile I, the layer with crushed rock and sand depositions was singled out by means of MASW, at a depth from 0 till 4 metres, whereby average transverse waves velocities make 150 m/s, the relation is  $V_s/V_p = 0.3 - 0.47$ .

Refracted boundary is detected, according to both methods at a depth from 8 till 12 metres with deep submergence at the beginning of the profile. Average transverse waves velocities up to the boundary is  $V_p = 315 - 495$  m/s, average transverse waves velocities ( $V_s$ ) at depths from 3 till 13 metres are from 250 till 280 m/s, the relation is  $V_s/V_p = 0.56$ . It could be assumed that these properties correspond to intercalation of ooze, loam, sandy loam and sand of ice age.

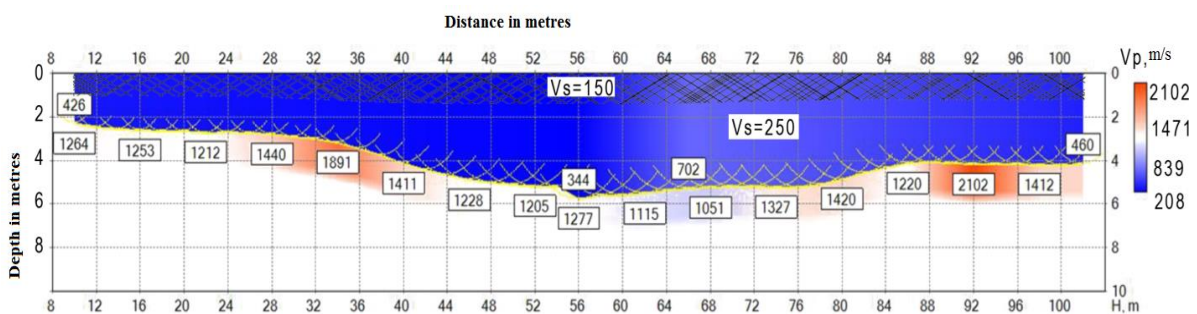
In the lower layer, high boundary velocities up to 2397 m/s are registered, which presumably correspond to clay water-saturated depositions [7].



Pic. 3. Generalised velocity profile II (4-6), hatched lines – lower boundary of subgrade, detected by virtue of MASW

Thus, in an unfavourable section a layer of soils (from 4 till 8 metres) with decreased velocities is singled out; this section has various gradients – related made by glacial deposits. This peculiarity is also underlined by increased velocity properties – water saturation of clay rock, which is presumably is one the reasons of this sections soils' subsidence.

In the picture 4, one can see the velocity depth profile III for a favourable section without any disturbances in the system “subgrade-underlying soils”. A layer of crushed rock and sand was detected by virtue of MASW at 1.5 metres. Refracted boundary is detected at depths from 2.5 till 4 metres with a slight 5 metres sag in the centre. Average transverse waves velocities up to the boundary are  $V_p = 344 - 702$  m/s. Average transverse waves velocities in the upper level ( $V_s$ ) are from 150 till 250 m/s/, the relation is  $V_s/V_p = 0.35 - 0.43$ . It could be assumed that, these properties, just like in the previous section, correspond to intercalation of crushed rock and sand layer, loamy ooze, sandy loam, and sand of ice age [7]. Below, there lies a layer of presumably water-saturated deposits (velocities from 1212 till 2102 m/s).

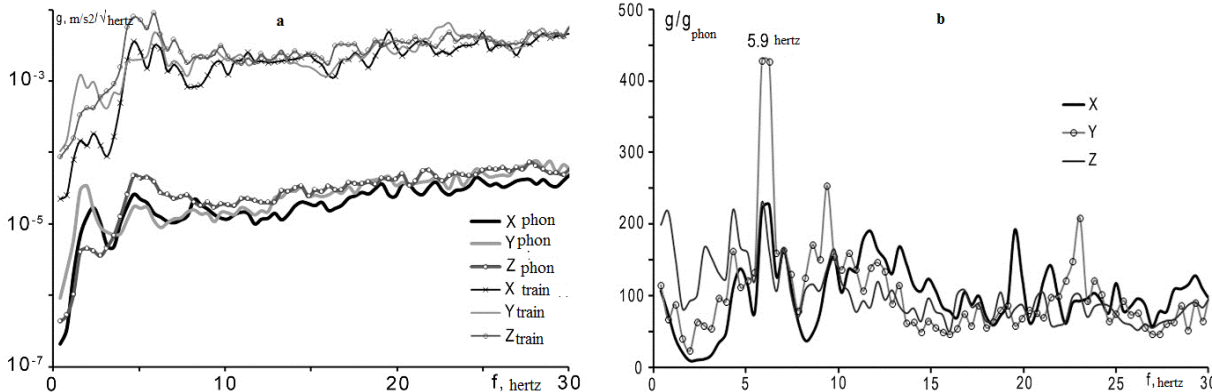


Pic. 4. Generalised velocity profile III (7-8), hatched lines – lower boundary of subgrade, detected by virtue of MASW

As it is seen from the picture 4, this section’s layer with decreased velocity has significantly lower capacity and relatively flat boundary, and values of velocity increase are solitary. This fact indirectly indicates that this section soils have stronger bearing capacity.

Thus, application of active seismic methods enabled obtaining velocity model of the system “subgrade-underlying soils” to a depth of 22.5 metres.

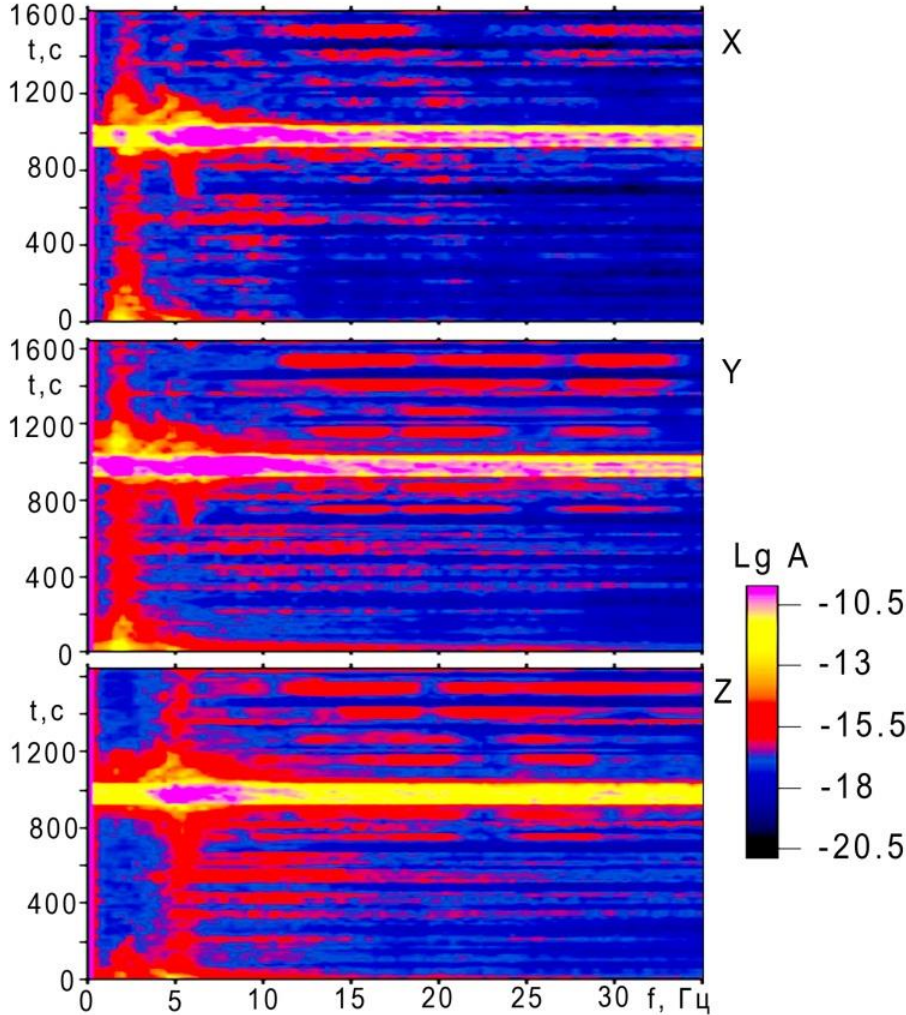
Let us carry out integration of the received information with the results of passive seismic methods. We will consider results of spectral analysis based on the data of passive seismic methods. For evaluation of levels of impact of train for the section of survey acceleration spectrums before and during the train traffic were compared (Picture 5). Two wide-range peaks, corresponding to the first and the second modes of oscillations in the system “subgrade-underlying soils”, are singled out, with their ranges being equal to 1.6-2.4 hertz and 4.7-5.5 hertz. On average, passing freight trains increase general level of the system oscillation 100 times (Picture 5a), whereby the second mode is subjected to the most of the amplification of acceleration amplitude. The most “vivid” is the frequency 5.9 hertz, coming up when the greatest load of the rolling stock is exerted on the system “subgrade-underlying soils”. At the same time, the amplitude of the transverse component increases twice with respect to increases at other components and for other frequencies, related to train traffic (Picture 5b). This is presumably due to curvature of the track section surveyed (Picture 1).



Picture. 5. Spectra of impacts before and during freight train traffic for unfavourable section of subgrade (a) and spectra of acceleration during train traffic (b)

In spectral-time analysis (STAN) diagram of power spectrum of displacement velocity for unfavourable section (show in the Picture 6) two vertical lines of 2 and 5 hertz are singled out. They reflect oscillation dynamics of the system “subgrade-foundation soils”. The signal is most vividly seen at frequency of 2 hertz (one of the oscillation modes of the system) for horizontal constituents (X, Y), which is due to constructive peculiarities of the subgrade. The signal at the frequency of 5 hertz is better seen in the vertical component Z, whereas in the horizontal components the signal comes up during train traffic

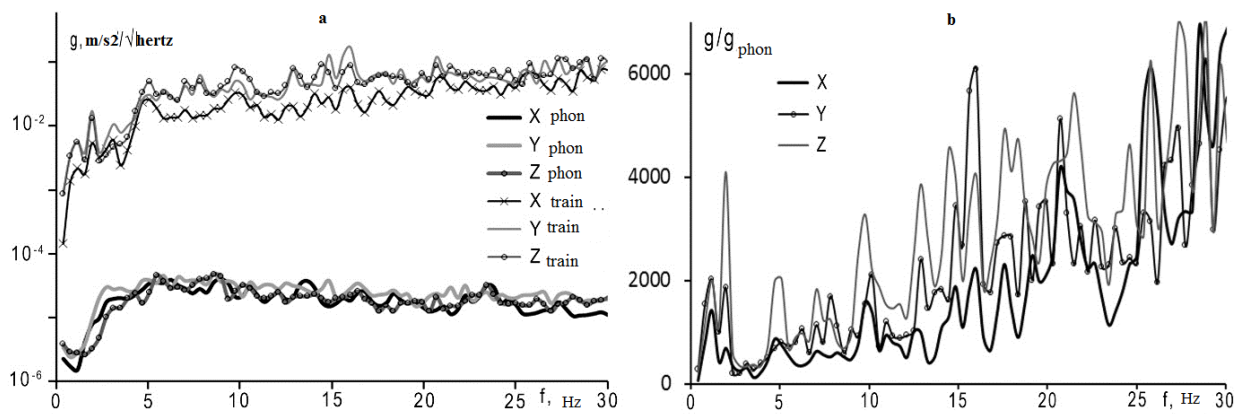
(bright wide-range horizontal signal), which reflects occurrence of resonance during train traffic with the system “subgrade-foundation soils”.



Picture. 6. STAN – diagram of the system “subgrade-underlying soils”. Bright wide-range horizontal signal is the passing train

For comparative analysis, let us consider the same situation but for a favourable section (Picture 1), where the level of the edge of subgrade does not exceed 0.4 metres. In the Picture 7, impact spectra before and during freight train traffic in this section of the subgrade and spectra of acceleration during train traffic.

Analysis in the Picture 7 shows sufficiently equal distribution of load by frequencies. The difference of power levels of microseism phones in the state of rest and during train traffic is more than three orders of magnitude than for unfavourable sections. In the spectra, during train traffic in this section the most vividly seen peak is at 2.0 hertz, which is most like due to resonance with the system “subgrade-foundation soils”. Yet, absolute level of impact is low and does not significantly influence the state of the system considered.



Picture. 7. Spectra of impact before and during freight train traffic for favourable section of the subgrade (a) and spectra of acceleration during train traffic (b)

### Discussion of the results

The dangerous physical and geological processes in the described territory along the Severnaya Railway are:

- presence in the upper layer of geological section of physically unstable oozy sandy loams and sands up to 8-12 metres;
- bog development, caused by geomorphologic location of some track parts, high level of groundwaters, presence of loose depositions of low-permeable clay depositions in the section.

Results of active seismic methods enabled singling out relatively thicker of softened soils, probably with turf, which lie under the subgrade. Sections with excessive water saturation in the foundations soils have been identified. Impact by trains, as well as resonant effect, causes its compression, leading to occurrence of subsidence. At the same time, resonant impact is not significant, whereas loads of passing trains contribute more to the state of soils.

Monitoring of the state of the subgrade for resonant frequency analysis is possible with the use of one sensor, preferably with accelerometer with lower frequency from 1 hertz. At the same time, application of short-range velocimeter will also be sufficient.

Another stage of these surveys will be assigning the calculation model and considering different situations with changes of physical properties of underlying soils and train impact.

The final stage of these studies predisposes creating functional model of technology of express evaluation, including experimental components: equipment, process of accumulation, processing and transmission of data, and decision algorithms. Implementing the theoretical task, we plan to obtain new ideas of interaction of the system “subgrade-underlying soils” and create data base of changes of bearing capacity of soils under real natural and man-caused impacts. It necessary to work out methodology of prognosis of subgrade behaviour in different options of climate changes and different loads.

## Special thanks

The studies were conducted under the support of RFBR grant № 17-20-02119 “Development of seismic monitoring technology and express evaluation of railway subgrade state in the conditions of the Far North and Siberia”.

## References

1. *Sajt Evraziya Vesty IX 2010* [The Site of Eurasia News IX 2010], URL: <http://www.eav.ru/publs.php?number=2010-09> (28/08/2017).
2. Cheng F., Xia J., Luo Y., Xu Z., Wang L., Shen C., Liu R., Pan Y., Mi B. & Hu Y. *Geophysics*, 2016, no. 81(5), pp. 1–10. DOI: 10.1190/geo2015-0505.1.
3. Draganov D., Campman X., Thorbecke J., Verdel A. & Wapenaar K. *Geophysics*, 2009, 74(5), pp. A63–A67.
4. Le Feuvre M., Joubert A., Leparoux D. & Côte P. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 114, pp. 36–51.
5. *Skhema territorial'nogo planirovaniya Onezhskogo municipal'nogo rajona. Tom 1* [Scheme of territorial planning of Onezhsky municipal district. Vol. 1], URL: [http://www.onegaland.ru/about/gradostroitelstvo/skhema\\_terr\\_plan/Tom1.doc](http://www.onegaland.ru/about/gradostroitelstvo/skhema_terr_plan/Tom1.doc) (02/10/2017).
6. Zorenko T. N., Cheremkhina G. M., Korepanov V. S., Vartanova L. S., Levin V. & Rybalko A. E. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200000. Seriya Onezhskaya. List Q-37-XXXIII, XXXIV. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map Russian Federation, scale 1:200000. A series of Onega Sheet Q-37-XXXIII, XXXIV. An explanatory Memorandum]. St. Petersburg, 2000, pp. 118. URL: <http://www.geokniga.org/sites/.../q-37-xxvii-xxviii-petrominsk-gosudarstvennaya-geologic> (02/10/2017).
7. Klyueva V. N., Pokrovskaya M. V., Baranov M. I. Inzhenerno-geologicheskaya s"emka masshtaba 1:200000. Listy: R-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII. Proizvodstvennoe geologicheskoe ob"edinenie “Gidrospecegeologiya”, Hidrogeologicheskaya ehkspediciya 29 rajona. Arhangel'skij filial FBU “TFGI po Severo-Zapadnomu federal'nomu okrugu” [Engineering-geological survey of scale 1:200000. Sheets: R-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII. Production Geological Association “Gidrospecegeologiya”, Hydrogeological expedition 29 district. Arkhangel'sk branch of Federal State-Funded Institution “Territorial fund of geological information for the North-West Federal District”]. 1984.
8. *SP 11-105-97 Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. Svod pravil* [Code of practice 11-105-97. Engineering-geological surveys for construction. A set of rules]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200000255> (28/08/2017).



9. *SP 32-104-98 Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznyh dorog kolei 1520 mm* [Code of practice 32-104-98. Designing of an roadway of railway lines of 1520 mm rut]. Moscow, 1999. URL: <http://aquagroup.ru/normdocs/4321#i486962> (28/08/2017).
10. Guralp Systems, URL: <http://www.guralp.com/> (28/08/2017).
11. Nanometrics, URL: <http://www.nanometrics.ca> (28/08/2017).
12. *Geosignal* [Geosignal], URL: [www.geosignal.ru](http://www.geosignal.ru) (28/08/2017).
13. RadExPro, URL: <http://radexpro.com/> (28/08/2017).
14. Lane J. W., White E. A., Steele G. V. & Cannia J. C. Estimation of bedrock depth using the horizontal-to-vertical (H/V) ambient-noise seismic method. *Theses. Near Surface 2008-14th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Philadelphia, 2008, pp. 1–13.
15. Yudakhin F. N., Kapustian N. K. & Antonovskaya G. N. *Ingenerno-seismicheskie issledovaniya geologicheskoy srefy I stroitelnih konstruktsiy s ispolzovaniem vetrovih kolebaniy zdaniy* [Engineering seismic studies of the geological structure and engineering structures by using wind fluctuations of buildings]. Ekaterinburg: UB RAS, 2007. 156 p.
16. Yudakhin F. N., Kapustian N. K., Antonovskaya G. N. & Shakhova E. V. *Doklady akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 2005, no. 405(9), pp. 1356–1360. WOS: 000234672700022, ISSN: 1028-334X.
17. Nakamura Y. A. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 1989, vol. 30, no.1, pp. 25–33.
18. Al-Husseini M. I., Glover J. B. & Barley B. J. *Geophysics*, 1981, no. 46(2), pp. 121–137.
19. Mari J. L. *Geophysics*, 1984, no. 49(8), pp. 1169–1179.
20. Gabriels P., Snieder R. & Nolet G. *Geophysical prospecting*, 1987, no. 35(2), pp. 187–196.
21. Park C. B., Miller R. D. & Xia J. *Geophysics*, 1999, no. 64(3), pp. 800–808.
22. Douze E. J. & Laster S. J. *Geophysics*, 1979, no. 44(9), pp. 1570–1583.
23. Boganik G. N. & Gurvich I. I. *Sejsmorazvedka: Uchebnik dlya vuzov* [Seismic exploration: a textbook for high schools]. Tver, 2006, 744 p.
24. *Metod prelomlennyh voln, pod red. A. M. Epinat'evoy* [Method of Refracted Waves, ed. A. M. Epinat'eva]. Moscow, 1990, 297 p.

**Information about authors:**

Galina N. ANTONOVSKAYA, PhD., Head of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: [essm.ras@gmail.com](mailto:essm.ras@gmail.com).

Nikita Y. AFONIN, Junior researcher of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: [afoninnikita@inbox.ru](mailto:afoninnikita@inbox.ru)

Irina M. BASAKINA, PhD., Senior researcher of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: [ibasakina@yandex.ru](mailto:ibasakina@yandex.ru)

Natalia K. KAPUSTIAN, Dr of Science, Chief researcher of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: [nkapustian@gmail.com](mailto:nkapustian@gmail.com)

Boris G. BASAKIN, Engineer of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: bgborislen@gmail.com

Aleksey V. DANILOV, Junior researcher of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: danilov.aleksey.vikt@gmail.com

УДК 338.47

**Ю. В. Егоров, Л. Ф. Казанская, Н. В. Сакс**

Петербургский Государственный Университет Путей Сообщения  
(Санкт-Петербург, Россия)

**ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ РЫНКА  
ОПЕРИРОВАНИЯ ГРУЗОВЫМИ ВАГОНАМИ НА ПОКАЗАТЕЛИ  
ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА**

Дата поступления 01.10.2017

Решение о публикации 26.10.2017

***Аннотация.***

**Цель:** Статья посвящена оценке влияния процесса формирования рынка оперирования грузовыми вагонами на показатели операционной эффективности железнодорожного транспорта РФ. Рассмотрены существующие точки зрения по данной проблеме, носящие качественный характер.

**Методы:** Для количественной оценки авторами используются методы сравнительного анализа и эконометрического моделирования на основе данных ОАО «РЖД» и Росстата за период 2003-2016 гг.

**Результат:** По результатам эконометрического моделирования выявлено, что статистически значимое влияние процесса формирования рынка оперирования грузовыми вагонами на показатели операционной эффективности железнодорожного транспорта РФ присутствует только в части одной переменной - «доля отправок, доставленных в нормативный (договорной) срок». При этом показатели операционной эффективности железнодорожного транспорта РФ демонстрируют негативную динамику только на протяжении периода с 2003 по 2009-12 гг.; в дальнейшем же большинство данных показателей показывают устойчивую положительную тенденцию, оправившись от первоначального негативного шока. Такой шок может быть реакцией на изменение уровня развития рынка оперирования грузовыми вагонами в России, но это касается далеко не всех показателей операционной эффективности ОАО "РЖД".

**Ключевые слова:** операционная эффективность, рынок оперирования грузовыми вагонами, железнодорожный транспорт, конкурентная среда.

UDC 338.47

**Y. Egorov, L. Kazanskaya, N. Saks,**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
(St. Petersburg, Russia)

## INFLUENCE OF DEVELOPMENT OF MARKET OF FREIGHT CARS OPERATION UPON OPERATION EFFICIENCY INDEXES OF RAILWAY TRANSPORT

Date of submission 01.10.2017

Decision on publication 26.10.2017

### *Abstract:*

**Purpose.** The article is devoted to estimation of influence of process of development of market of freight cars operation upon operation efficiency indexes of Russia's railway transport. The existing qualified viewpoints on this issue have been considered.

**Methodology.** For quantitative evaluation, the authors have used comparative analysis methods and econometric modeling based on JSC "RZD" and Federal State Statistics Service data of the period from 2003 till 2016.

**Results.** According to the results of econometric modeling, it has been found out that statistically important influence of development of freight cars operation market upon indexes of operation efficiency of Russia's railway transport is present only in one part of variable – "amount of deliveries, performed within normative (stipulated) period". At the same time, indexes of operation efficiency of Russia's railway transport demonstrate negative dynamics only from 2003 till 2009-12; from then on, most of these indexes have been showing sustainable positive tendency, having recovered from initial negative shock. This kind of shock might be a reaction to change of level of market development of freight cars operation in Russia, but this does not apply to all indexes of operation efficiency of JSC "RZD".

**Keywords:** operation efficiency, market of freight cars operation, railway transport, competitive environment.

## Введение

Развитие рынка предоставления грузовых вагонов под погрузку с появлением на железных дорогах России операторов железнодорожного подвижного состава, явилось важной частью структурного реформирования железнодорожного транспорта страны, начатого в 2003 г. [1, с.13]. Формирование вагонной составляющей грузового железнодорожного тарифа стало определяться в основном рыночными факторами, а количество грузовых вагонов в собственности или на праве аренды у операторов непрерывно возрастало на протяжении последних 15-ти лет.

Основным результатом данных преобразований принято считать появление и развитие конкурентной среды в области предоставления грузового железнодорожного подвижного состава, что позволило, в свою очередь, решить проблему обновления грузового вагонного парка и ликвидировать дефицит вагонов под погрузку грузоотправителям [2, с. 11].

Но при этом нами было показано, что такое развитие конкурентной среды никак не повлияло на конечные цены перевозки грузов железнодорожным транспортом в России, что связано с отсутствием аналогичных преобразований в монополизированных сферах предоставления услуг инфраструктуры и локомотивной тяги [3, с. 11-12].

Следует отметить, что проблеме операционной эффективности железнодорожного транспорта в последние годы уделялось повышенное внимание, что выразилось в появлении достаточно большого количества публикаций по этому вопросу. К примеру, Новосельская С. А. рассматривала различные аспекты построения системы показателей эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД» [4].

Шубенцева Л. А. исследовала аспекты повышения эффективности функционирования холдингов путем воздействия на систему бухгалтерского учета [5]. Другие аспекты операционной эффективности железнодорожного транспорта рассматривались в работах Юдина С. В. [6], Опарина С. Г. и Чепеля В. В. [7], Пановой Ю. Н. [8], Божко Л. М. [9], Журавлевой Н.А. [10], Котовой Е. А. [11], Грошева Г. М., Климовой Н. В. и Васильевой Т. В. [12].

Помимо этого, исследователи анализировали процессы формирования рынка и конкурентной среды на железнодорожном транспорте, что было отражено в публикациях Проскуряковой Е. А. [13,14], Журавлевой Н. А. [15, 16], Акулова М. П. [17], Казанской Л. Ф. и Богомоловой А. В. [1].

Вместе с тем, проблеме влияния процесса формирования рынка оперирования грузовыми вагонами на показатели операционной эффективности железнодорожного транспорта в РФ не было уделено должного внимания, что выразилось в небольшом количестве публикаций по данному вопросу.

Так, по мнению некоторых исследователей, почти полная передача грузовых вагонов частным операторам стала причиной ухудшения управляемости вагонного парка и снижения показателей эксплуатационной работы железных дорог. К примеру, согласно Крейнину А. В. «когда вагоны принадлежат операторам, а инфраструктурная часть принадлежит железным дорогам, порожный пробег не снижается, а даже возрастает» [18, с. 17].

Существуют и некоторые прямо противоположные точки зрения. Так, Хусаинов Ф.И. в своей работе [19, с. 207-219] показывает, что развитие операторского сегмента не оказало никакого негативного влияния на такие показатели эксплуатационной работы как коэффициент порожнего пробега и средняя скорость доставки груза. При этом рост оборота вагона в 2010-2013 гг. может быть не связан с развитием операторского сегмента, и вообще показатели оборота вагона и производительности вагона не

представляют интереса для частных владельцев грузовых вагонов, ориентированных на повышение доходов на 1 вагон [19, с. 214-218].

### **Постановка задачи**

Помимо небольшого количества публикаций по рассматриваемой проблеме следует отметить, что исследователи не приводят количественных оценок тесноты и характера зависимости показателей эксплуатационной работы железных дорог (или, другими словами, показателей операционной эффективности) от уровня развития рынка оперирования грузовыми вагонами. Попытаемся провести такую оценку с помощью инструментов эконометрического моделирования.

### **Принятые допущения**

Примем для проводимого в данной работе анализа следующие допущения:

– в качестве показателей уровня развития рынка оперирования грузовыми вагонами РФ примем долю независимых частных собственников в парке грузовых вагонов РФ и долю независимых частных собственников в грузообороте железнодорожного транспорта РФ;

– в качестве показателей операционной эффективности железнодорожного транспорта РФ примем средний вес грузового поезда брутто, участковую скорость движения грузового поезда, среднюю скорость доставки груженых отправок, долю отправок, доставленных в нормативный (договорной) срок (по данным ОАО «РЖД»);

– для показателей средний вес грузового поезда брутто, участковая скорость движения грузового поезда в качестве периода анализа примем 2003-2015 гг. (с отдельными замечаниями касательно данных за 2016 г.);

– для показателей средняя скорость доставки груженых отправок, доля отправок, доставленных в нормативный (договорной) срок в качестве периода анализа примем 2007-2015 гг. (с отдельными замечаниями касательно данных за 2016 г.).

### **Материалы и методы исследования**

Материалами исследования в данной работе являются переменные (тип данных - временные ряды), использованные в процессе моделирования, данные переменные графически представлены на рис. 1, 2 и 3. Методы исследования – сравнительный анализ и эконометрическое моделирование (классический метод наименьших квадратов (парная линейная регрессия) с

проведением необходимых эконометрических тестов – см. таблицу 1 и таблицу 2 ниже)

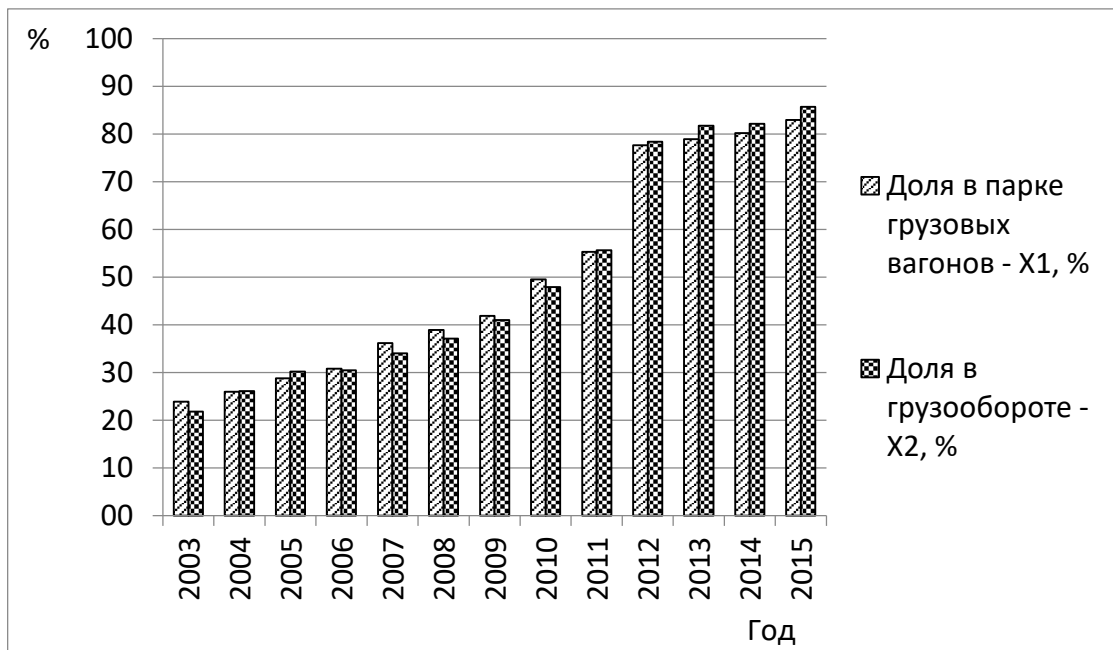


Рис. 1. Доли независимых частных собственников в парке грузовых вагонов и грузообороте железнодорожного транспорта РФ (рассчитано авторами по: [19, с. 159], [20])

## Результаты

Как видно из рис. 1, доли независимых частных собственников в парке грузовых вагонов (переменная  $X1$ ) и в грузообороте (переменная  $X2$ ) железнодорожного транспорта РФ непрерывно росли на протяжении 2003-2015 гг.. Увеличение составило приблизительно с 20-22 до 80-85% (к концу 2016 года переменная  $X1$  достигла значения 83.7%, переменная  $X2$  достигла значения 86.4%, существенно не изменившись по отношению к уровням 2015 года [20]).

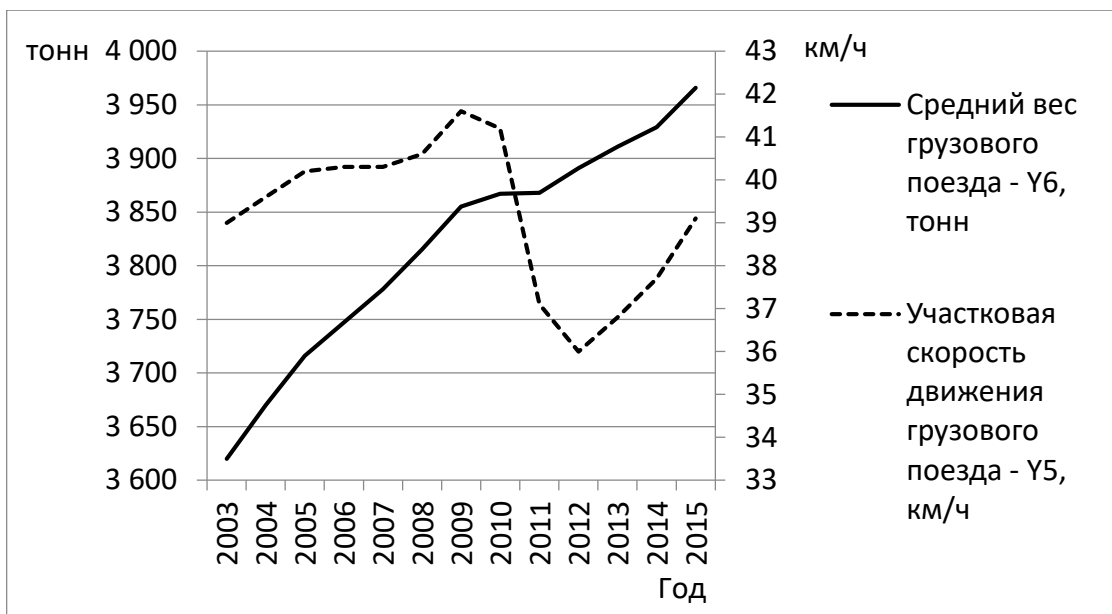


Рис. 2. Показатели операционной эффективности ОАО "РЖД" не ориентированные на потребности грузоотправителей (по данным ОАО «РЖД»): [20])

Что касается показателей операционной эффективности ОАО "РЖД", не ориентированных, на наш взгляд, на потребности грузоотправителей, то на протяжении 2003-2015 гг. средний вес грузового поезда (переменная Y6) постоянно увеличивался, а участковая скорость движения (переменная Y5) почти не менялась (хотя и демонстрировала сильную волатильность) (рис. 2) (в 2016 г. уровни переменных Y5 и Y6 существенно не отличаются от уровней 2015 г. [20]).

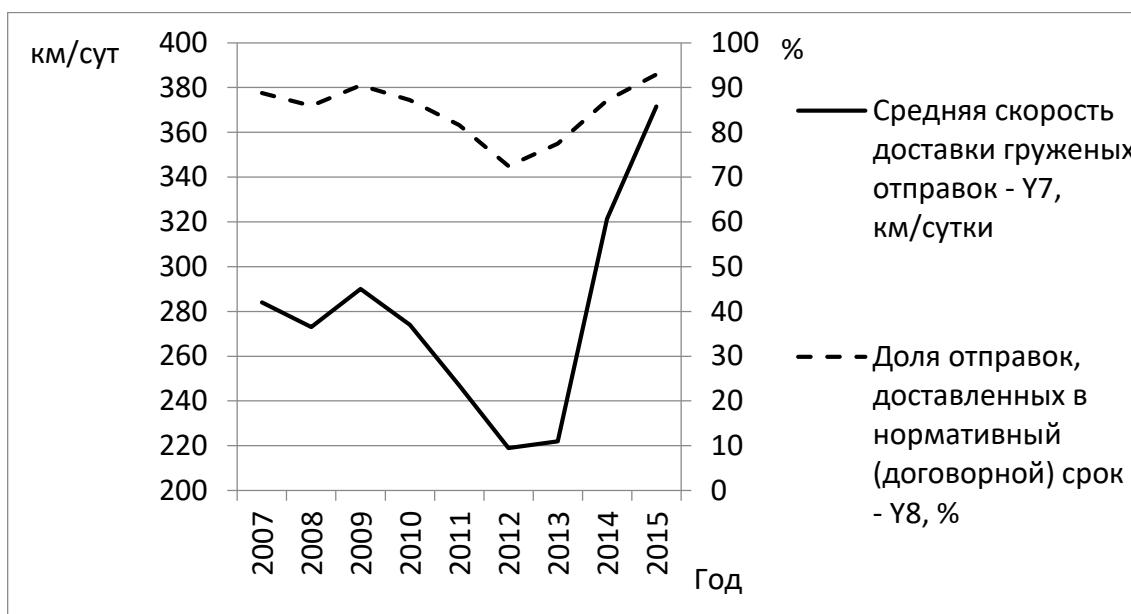


Рис. 3. Показатели операционной эффективности ОАО "РЖД" ориентированные на потребности грузоотправителей (по данным ОАО «РЖД»): [20])



Показатели операционной эффективности ОАО "РЖД", ориентированные, на наш взгляд, на потребности грузоотправителей растут на протяжении 2007-2015 гг., демонстрировали достаточно сильную волатильность (рис. 3). Особенно сильно колебалась и растет средняя скорость доставки груженых отправок (переменная  $Y7$ ), для доли отправок, доставленных в нормативный (договорной) срок (переменная  $Y8$ ) эти тенденции менее заметны (переменные  $Y7$  и  $Y8$  растут и в 2016 по отношению к 2015 г., достигая значений 380.5 км/сут и 96.1% соответственно [20]).

По результатам  $ADF$ -теста (уровень статистической значимости альфа 0.05) было установлено, что переменные  $X1$ ,  $X2$ ,  $Y5$ ,  $Y6$ ,  $Y7$ ,  $Y8$  являются интегрированными рядами 1-го порядка. При этом оценка моделей парной линейной регрессии зависимости переменных  $Y5$ ,  $Y6$ ,  $Y7$ ,  $Y8$  от переменных  $X1$ ,  $X2$  приводит к появлению ложной регрессии, т.к. по результатам теста Энгла-Грэнджера на коинтеграцию (альфа 0.05) пары переменных  $Y5$  и  $X1$ ,  $Y5$  и  $X2$ ,  $Y6$  и  $X1$ ,  $Y6$  и  $X2$ ,  $Y7$  и  $X1$ ,  $Y7$  и  $X2$ ,  $Y8$  и  $X1$ ,  $Y8$  и  $X2$  не являются коинтегрированными.

Для решения проблемы ложной регрессии был произведен переход от абсолютных уровней переменных  $X1$ ,  $X2$ ,  $Y5$ ,  $Y6$ ,  $Y7$ ,  $Y8$  к их первым разностям (данный подход описан, к примеру, в работе Носко В.П. [21, с. 530]). В этом случае оценку параметров регрессионных уравнений можно произвести классическим методом наименьших квадратов (КМНК) при условии, что процессы остатков обладают свойствами белого шума – см. [21, с. 530] или [22, с. 119].

Результаты оценки моделей парной линейной регрессии для первых разностей результативных переменных  $Y5$ ,  $Y6$  приведены в таблице 1 (эконометрическое моделирование в данной работе произведено на основе временных рядов за 2003-2015 гг. и 2007-2015 гг., использование аналогичных временных рядов за 2003-2016 гг. и 2007-2016 гг. существенно не изменяет выводы по моделированию).

Таблица 1. Результаты оценивания моделей для результативных переменных  $Y5$  и  $Y6$  (годовые данные за 2003-2015 гг.)

Переменная/метод оценки/ показатель/тест	№ модели			
	1	2	3	4
Результативная переменная*	$d_{Y5}$	$d_{Y5}$	$d_{Y6}$	$d_{Y6}$
Факторная переменная*	$d_{X1}$	$d_{X2}$	$d_{X1}$	$d_{X2}$
Метод оценки модели	КМНК	КМНК	КМНК	КМНК
Коэффициент детерминации	0.17	0.20	0.08	0.06
Модель статистически значима (критерий Фишера)?	нет	нет	нет	нет
Коэффициент факторной переменной статистически значим (критерий Стьюдента)?	нет	нет	нет	нет

Переменная/метод оценки/ показатель/тест	№ модели			
	1	2	3	4
У процесса остатков присутствуют свойства белого шума и отсутствует автокорреляция (на основании <i>PACF</i> , альфа 0.05)?	да	да	да	да
В модели отсутствует гетероскедастичность (тест Уайта, альфа 0.05)?	да	да	да	да
Остатки модели распределены нормально (тест Жарке-Бера, альфа 0.05)?	нет	нет	да	да
В модели отсутствует эффект <i>ARCH</i> (альфа 0.05)?	да	да	да	да
Линейная форма модели выбрана правильно (тест <i>RESET</i> , альфа 0.05)?	да	да	да	да

\* - первые разности переменных *Y5, Y6, X1, X2*

Результаты оценки моделей парной линейной регрессии для первых разностей результативных переменных *Y7, Y8* приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты оценивания моделей для результативных переменных *Y7* и *Y8* (годовые данные за 2007-2015 гг.)

Переменная/метод оценки/ показатель/тест	№ модели			
	5	6	7	8
Результативная переменная*	<i>d_Y7</i>	<i>d_Y7</i>	<i>d_Y8</i>	<i>d_Y8</i>
Факторная переменная*	<i>d_X1</i>	<i>d_X2</i>	<i>d_X1</i>	<i>d_X2</i>
Метод оценки модели	<i>КМНК</i>	<i>КМНК</i>	<i>КМНК</i>	<i>КМНК</i>
Коэффициент детерминации	0.27	0.34	0.57	0.60
Модель статистически значима (критерий Фишера)?	нет	нет	да	да
Коэффициент факторной переменной статистически значим (критерий Стьюдента)?	нет	нет	да (альфа 0.05) и равен (-0.71)	да (альфа 0.05) и равен (-0.73)
У процесса остатков присутствуют свойства белого шума и отсутствует автокорреляция (на основании <i>PACF</i> , альфа 0.05)?	да	да	да	да
В модели отсутствует гетероскедастичность (тест Уайта, альфа 0.05)?	да	да	да	да
Остатки модели распределены нормально (тест Жарке-Бера, альфа 0.05)?	да	да	да	да
В модели отсутствует эффект <i>ARCH</i> (альфа 0.05)?	да	да	да	да
Линейная форма модели выбрана правильно (тест <i>RESET</i> , альфа 0.05)?	да	да	да	да

\* - первые разности переменных *Y7, Y8, X1, X2*

## Обсуждение результатов

Как следует из таблицы 1 влияние показателей уровня развития рынка оперирования грузовыми вагонами (первые разности переменных  $X1$  и  $X2$ ) на показатели операционной эффективности ОАО "РЖД" не ориентированные на потребности грузоотправителей (первые разности переменных  $Y5$  и  $Y6$ ) отсутствует на протяжении 2003-2015 гг: модели и коэффициенты факторных переменных статистически незначимы (альфа 0.05).

Как следует из таблицы 2 влияние показателей уровня развития рынка оперирования грузовыми вагонами на показатели операционной эффективности ОАО "РЖД" ориентированные на потребности грузоотправителей в 2007-2015 гг. неоднозначно. Статистически значимая зависимость первых разностей переменной  $Y7$  от первых разностей переменных  $X1$  и  $X2$  не выявлена. Но статистически значимая зависимость первых разностей переменной  $Y8$  от первых разностей переменных  $X1$  и  $X2$  существует: модели и коэффициенты факторных переменных статистически значимы (альфа 0.05) с достаточно высокими коэффициентами детерминации (0.57-0.60), модели успешно прошли все основные эконометрические тесты.

Так, по результатам моделирования (таблица 2) при росте на 1 % скорости изменения доли независимых частных собственников в парке грузовых вагонов РФ (первая разность переменной  $X1$ ) скорость изменения доли отправок, доставленных в нормативный (договорной) срок (первая разность переменной  $Y8$ ) снижается на 0.71%. Также при росте на 1 % скорости изменения доли независимых частных собственников в грузообороте железнодорожного транспорта РФ (первая разность переменной  $X2$ ) скорость изменения доли отправок, доставленных в нормативный (договорной) срок (первая разность переменной  $Y8$ ) снижается на 0.73%.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

Изменение уровня развития рынка оперирования грузовыми вагонами в России не оказало статистически значимого влияния на показатели операционной эффективности ОАО "РЖД" не ориентированные на потребности грузоотправителей в 2003-2015 гг. (в части проанализированных показателей). Что касается аналогичного влияния на показатели операционной эффективности ОАО "РЖД" ориентированные на потребности грузоотправителей, то здесь статистически значимое (и негативное) влияние выявлено только для показателя «доля отправок, доставленных в нормативный (договорной) срок» в 2007-2015 гг. То есть, из 4-х проанализированных показателей операционной эффективности ОАО

"РЖД" только 1 показатель попал под негативное влияние изменения уровня развития рынка оперирования грузовыми вагонами в России.

Следует также отметить, что переменная  $Y_8$  (доля отправок, доставленных в нормативный (договорной) срок), попавшая под негативное влияние переменных  $X_1$  и  $X_2$ , на протяжении 2013-2016 гг. демонстрирует уверенный рост (положительная тенденция) (см. рис. 3). Аналогичный рост (положительная тенденция) демонстрируют переменные  $Y_7$  и  $Y_6$  (см. рис. 2, 3). Переменная  $Y_5$  растет в 2013-2016 гг. (негативная тенденция) (см. рис. 2), но в целом на протяжении 2003-2016 гг. данная переменная существенно не изменяется, хотя и показывает значительную волатильность.

Использованные в данной работе методы сравнительного анализа и эконометрического моделирования позволяют получить достаточно просто оценку влияния процесса формирования рынка оперирования грузовыми вагонами на показатели операционной эффективности железнодорожного транспорта на макроуровне. Для исследования взаимосвязей показателей развития рынка и индикаторов операционной эффективности на микроуровне на железнодорожном транспорте целесообразнее, на наш взгляд, применять другие методы анализа, ориентированные на детальное рассмотрение уровней отдельных организаций и проектов. Примером такого анализа может быть использование стохастических методов для определения основных проектных показателей на базе информационных технологий управления проектами [23].

### **Заключение**

Поэтому, по нашему мнению, можно сделать следующее заключение. Говорить о снижении показателей эксплуатационной работы железных дорог в результате почти полной передачи грузовых вагонов частным операторам, можно лишь в части отдельных показателей операционной эффективности ОАО "РЖД", но никак не всей совокупности таких показателей (к примеру, это может быть справедливым для показателя «порожний пробег грузового вагона» согласно Крейнину А.В. [18, с. 17], который мы не использовали в нашем количественном анализе). При этом такое снижение носит временный характер, затрагивая период с 2003 по 2009-12 гг.; в дальнейшем же большинство показателей показывают устойчивую положительную тенденцию, оправившись от первоначального негативного шока. Такой шок может быть реакцией на изменение уровня развития рынка оперирования грузовыми вагонами в России, но, как показано выше в данной работе, это касается далеко не всех показателей операционной эффективности ОАО "РЖД".

## Библиографический список

1. Казанская Л. Ф. Повышение эффективности грузовых перевозок на фоне роста конкуренции / Л. Ф. Казанская, А. В. Богомолова // Экономика железных дорог, 2013. – № 1, – С. 12–21.
2. Мазо Л. А. Актуальные вопросы совершенствования железнодорожных грузовых тарифов / Л. А. Мазо // Экономика железных дорог, 2014. – № 4. – С. 11–23.
3. Егоров Ю.В. Влияние характера конкурентной среды в сфере предоставления грузовых вагонов в России на цены перевозимых грузов. // Сибирская финансовая школа, 2016. – №5 (118). – С. 8–12.
4. Новосельская С. А. О построении системы показателей эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД» / С. А. Новосельская // Проблемы современной экономики, 2011. – № 3. – С. 81–84.
5. Шубенцева Л. А. Повышение эффективности функционирования холдингов путем формирования системы бухгалтерского учета на принципах организационной и функциональной централизации / Л. А. Шубенцева // Аудит и финансовый анализ, 2012. – № 2. – С. 39–43.
6. Юдин С. В. К оценке эффективности инвестиционных проектов транспортного строительства / С. В. Юдин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки, 2014. – № 6 (209). – С. 171–178.
7. Опарин С. Г. Развитие теоретических основ экономической эффективности транспортного строительства в условиях саморегулирования / С. Г. Опарин, В. В. Чепель // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки, 2014. – № 2 (192). – С. 21–30.
8. Панова Ю. Н. Экономическая оценка эффективности поэтапного развития тыловых контейнерных терминалов / Ю. Н. Панова // Инженерный вестник Дона, 2012. – Т. 22. – № 4–1 (22). – С. 58.
9. Божко Л. М. О сущности эффективности управления в контексте проведения организационных изменений на основе маркетингового подхода / Л. М. Божко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика, 2013. – № 1. – С. 37–40.
10. Журавлева Н. А. Влияние скоростного режима перевозок на величину железнодорожного тарифа. // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика, 2014. – № 4. – С. 32–50.
11. Котова Е. А. Направления инновационного развития железнодорожного транспорта. // Транспортные системы и технологии, 2016. – Выпуск (3)5. – С. 36.
12. Грошев Г.М. Оценка эффективности организации контейнерных блок-поездов на станции примыкания транспортно-логистического

терминала / Г. М. Грошев, Н. В. Климова, Т. В. Васильева // Экономика железных дорог, 2013. – № 5. – С. 60–67.

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

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

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

16. Журавлева Н. А. Математическое описание и моделирование перевозок грузов в отправительских маршрутах / Н. А. Журавлева, В. Г. Карчик // Экономика железных дорог, 2014. – № 11. – С. 30–45.

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

18. Крейнин А. В. Экономические проблемы, связанные с дальнейшим совершенствованием управления железнодорожным транспортом и формированием структуры построения железнодорожных грузовых и пассажирских тарифов / А. В. Крейнин // Экономика железных дорог, 2014. – № 2. – С. 16–18.

19. Хусаинов Ф. И. Реформа железнодорожной отрасли в России: проблемы незавершенной либерализации монография / Ф. И. Хусаинов. – М.: Издательский Дом «Наука», 2015. – 272 с.

20. Годовые отчеты ОАО «РЖД» за 2004 г., 2008-2016 гг. – URL: [http://ir.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=32](http://ir.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=32) (28.09.2017).

21. Носко В. П. Эконометрика. Кн. 1. Ч. 1, 2: учебник / В. П. Носко. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2011. – 672 с.

22. Куфель Т. Эконометрика. Решение задач с применением пакета программ GRETЛ / Т. Куфель; Пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 200 с.

23. Сакс Н. В. Определение основных проектных показателей стохастическими методами на базе информационных технологий управления проектами / Н. В. Сакс, Н. В. Макарова // Актуальные проблемы экономики и управления, 2015. – вып. 4(8). – С. 146–154.

## References

1. Kazanskaya L. F. *Ekonomika Zheleznih Dorog – Railway Economics*, 2013, no. 1, pp. 12-21.

2. Mazo L. A. *Ekonomika Zheleznih Dorog – Railway Economics*, 2014, no. 4, pp. 11-23.

3. Egorov Y. V. *Sibirskaya Finansovaya Shkola – Siberian Financial School*, 2016, no. 5 (118), pp. 8-12.
4. Novosel'skaya S. A. **Problemy Sovremennoy Ekonomiki – Problems of Modern Economy**, 2011, no. 3, pp. 81-84.
5. Shubentsova L. A. **Audit i Finansoviy Analiz – Audit and Financial Analysis**, 2012, no. 2, pp. 39-43.
6. Yudin S. V. **Nauchno-tehnicheskie Vedomosti Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politehnicheskogo Universiteta. Ekonomicheskie Nauki – Scientific and Technical Journal of Saint-Petersburg State Politechnic University. Economic Sciences**, 2014, no. 6 (209), pp. 171-178.
7. Oparin S. G. & Chepel V. V. **Nauchno-tehnicheskie Vedomosti Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politehnicheskogo Universiteta. Ekonomicheskie Nauki – Scientific and Technical Journal of Saint-Petersburg State Politechnic University. Economic Sciences**, 2014, no. 2 (192), pp. 21-30.
8. Panova Y. N. **Inzhenerniy Vestnik Dona – Engineering Newsletter of Don**, 2012, vol. 22, no. 4-1 (22). p. 58.
9. Bozhko L. M. **Vestnik Astrahanskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta. Seriya: Ekonomika – Newsletter of Astrakhan State Technical University. Series: Economics**, 2013, no. 1, p. 37-40.
10. Zhuravleva N. A. **ETAP: Ekonomicheskaya Teoriya, Analiz, Praktika – ETAP: Economic Theory, Analysis, Practice**, 2014, no. 4, p. 32-50.
11. Kotova E. A. *Transportnye Systemy i Tehnologii – Transport Systems and Technologies*, 2016, no. (3)5, p. 36.
12. Groshev G. M., Klimova N. V. & Vasil`eva T. V. *Ekonomika Zheleznih Dorog – Railway Economics*, 2013, no. 5, pp. 60-67.
13. Proskuryakova E. A. *Ekonomika Zheleznih Dorog – Railway Economics*, 2015, no. 7, pp. 92-98.
14. Proskuryakova E. A. *Ekonomika Zheleznih Dorog – Railway Economics*, 2014, no. 11, pp. 11-17.
15. Zhuravleva N. A. **Ekonomicheskie Nauki – Economic Sciences**, 2015, no. 132, pp. 15-19.
16. Zhuravleva N. A. & Karchik V. G. *Ekonomika Zheleznih Dorog – Railway Economics*, 2014, no. 11, pp. 30-45.
17. Akulov M. P. **Transportnoe Delo Rossii – Transport Business of Russia**, 2014, no. 5, pp. 53-55.
18. Kreynin A. V. *Ekonomika Zheleznih Dorog – Railway Economics*, 2014, no. 2, pp. 16-18.
19. Husainov F. I. *Reforma Zheleznodorozhnoy Otrastli v Rossii: Problemy Nezavershennoy Liberalizatsii [Reform of Railway Sector in Russia: Problems of Unfinished Liberalization]*. Moscow, 2015, 272 p.

20. *Godovye Otchety OAO "RZhD" za 2004 g., 2008-2016 gg.* (Year Reports of JSC Russian Railways for 2004 year, 2008-2016 years), URL: [http://ir.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=32](http://ir.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=32) (28/09/2017).

21. Nosko V. P. *Econometrika. Kn. 1. Ch. 1, 2: Uchebnik* [Econometrics. B. 1. Ch. 1, 2: Textbook]. Moscow, 2011, 672 p.

22. Kufel T. *Ekonometrika. Reshenie Zadach s Primeneniem Paketa Programm GRETL* [Econometrics. Solving Problems with Usage of GRETL software]. Moscow, 2007, 200 p.

23. Saks N. V. & Makarova N. V. *Aktual`nye Problemy Ekonomiki i Upravleniya – Actual Problems of Economics and Management*, 2016, no. 4(8), pp. 146-154.

#### **Сведения об авторах:**

ЕГОРОВ Юрий Владимирович, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта» Петербургского Государственного Университета Путей Сообщения Императора Александра I  
E-mail: orion56@mail.ru

КАЗАНСКАЯ Лилия Фаатовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Экономика транспорта» Петербургского Государственного Университета Путей Сообщения Императора Александра I  
E-mail: yalifa@inbox.ru

САКС Надежда Вячеславовна, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта» Петербургского Государственного Университета Путей Сообщения Императора Александра I  
E-mail: sax-nad@yandex.ru

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

Yuriy Egorov, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of "Economics of transport", Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
E-mail: orion56@mail.ru

Liliya Kazanskaya, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of "Economics of transport", Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
E-mail: yalifa@inbox.ru

Nadezhda Saks, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of "Economics of transport", Emperor Alexander I Petersburg State Transport University  
E-mail: sax-nad@yandex.ru