

ISSN 2413-9203

# ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

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

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

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»  
 EHLEKTRONNYJ NAUCHNY ZHURNAL "TRANSPORTNYE SISTEMY I TEKHNOLOGII"  
 ELECTRONIC RESEARCH JOURNAL "TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY"

**Главный редактор** А. А. Зайцев, доктор экономических наук, профессор  
 Петербургский государственный университет путей сообщения  
 Императора Александра I  
**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. В. Дитрих  
**Online content editor** A. V. Ditriths  
**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** С. А. Зинченко  
**Editing and proofreading** S. A. Zinchenko  
**Верстка** Л. А. Каратановой  
**Layout** L. A. Karatanova

**Учредитель и издатель** Федеральное государственное бюджетное  
 образовательное учреждение высшего 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, Московский пр., 9, 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., 9, 9/11-5, tel:  
 +7(911)238-44-45, e-mail: info@transssyst.ru; сайт: www.transssyst.ru  
**Свидетельство о регистрации средства массовой информации**  
 Эл№ФС77-53673 от 17.04.2013 г. выдано Федеральной службой по надзору  
 в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций  
**Mass media registration certificate number**  
 Эл№ФС77-53673 от 17.04.2013 issued by the The Federal Service for  
 Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass  
 Communications  
 Журнал имеет институт рецензирования  
 The Journal has the Peer-review division  
 Журнал распространяется через Интернет без ограничений  
 и по адресно-целевой подписке через редакцию  
 The Journal is distributed via Internet for free and by subscription via Editorial office  
**Минимальные системные требования**  
 Тип компьютера, процессор, сопроцессор, частота: Pentium IV и выше;  
 оперативная память (RAM): 256 Мб и выше; необходимо на винчестере:  
 не менее 64 Мб; ОС MacOS, Windows (XP, Vista, 7); видеосистема:  
 встроенная; дополнительное ПО: Adobe Reader версия от 7.X или аналог.  
 Защита от незаконного распространения: реализуется встроенными  
 средствами Adobe Acrobat

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**  
**INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

**Ли Вэйли**, доктор технических наук, профессор, Пекинский технический  
 университет, Пекин, КНР  
**Weili Li**, Ph.D., Professor, Beijing University of Technology, Beijing, China,  
 Chairman of Editorial board

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

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

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

**РЕДКОЛЛЕГИЯ**  
**EDITORIAL TEAM**

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

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

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

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

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

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

1. Тема и содержание представляемой для публикации 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. Нижелечисленные 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 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 подписочной подписи. Сканирование материалов из альбомов, журналов, буклетов, газет и книг влечет за собой сильное понижение качества изображения. Используйте функцию Descreen. Если Вы сканируете фото самостоятельно, выставляйте разрешение 300 dpi (больше не имеет смысла, меньше приведет к понижению качества). То же самое касается рисунков, графиков и диаграмм, созданных в CorelDRAW и Illustrator. Помещайте в файл в формате Word рисунки только в качестве preview-версии, не забывая прилагать отдельно исходники.

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

## Содержание

<b>Киреев А. В., Кожемяка Н. М., Кононов Г. Н.</b> Предпосылки создания высокоскоростной контейнерной транспортной системы	4
<b>Kireev V., Kozhemyaka N. M., Kononov G. N.</b> Prerequisites for the Creation of a High-Speed Container Transport System	23
<b>Эрдынеев Ж. Т., Гельцер А. А., Великанова Е. П., Панокин Н. В.</b> Сравнительный анализ методов частотного масштабирования для обработки сигналов в малогабаритных подвижных платформах	41
<b>Erdyneeov Zh. T., Geltser A. A., Velikanova E. P., Panokin N. V.</b> Comparative Analysis of Frequency Scaling Algorithms for Signal Processing in Small-Size Mobile Platforms	58
<b>Серета Г. Е., Стрепетов В. М.</b> Определение индуктивности экипажного электромагнита магнитолевитационной транспортной системы	74
<b>Sereda G. E., Strepetov V. M.</b> Determination of Inductance of Vehicle Electromagnet in Magnetic Levitation Transport System	81
<b>Александров С. Е., Лямина Е. А.</b> Новый метод расчета напряженного состояния в сыпучих материалах при плоскодеформированном состоянии	88
<b>Alexandrov S. E., Lyamina E. A.</b> A New Method of Calculating the State of Stress in Granular Materials under Plane Strain Conditions	97
<b>Соломин А. В.</b> Комбинированная система тяги и боковой стабилизации для магнитнолевитационного транспорта	106
<b>Solomin A. V.</b> Combination Traction and Lateral Stabilisation System for Magnetic Levitation Transport	117
<b>Соломин В. А., Бичилова А. А., Замшина Л. Л., Трубицина Н. А.</b> Регулируемый линейный асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой для магнитнолевитационного транспорта	126
<b>Solomin V. A., Bichilova A. A., Zamshina L. L., Trybitsina N. A.</b> Adjustable Squirrel-Cage Linear Induction Motor for Magnetic Levitation Transport	138
<b>Журавлева Н. А., Панычев А. Ю.</b> Проблемы экономической оценки скорости в транспортно-логистических системах в новом технологическом укладе	149
<b>Zhuravleva N. A., Panychev A. Yu.</b> Problems of Economic Assessment of Speed in Transport and Logistical Systems in the New Technological Paradigm	164
<b>Федорова М. В.</b> Обоснование системы показателей оценки социально-экономической эффективности стратегии развития	178
<b>Fiodorova M. V.</b> Justification of Indicator System of Social and Economic Efficiency of High-Speed Urban Transport Development Strategy	191
<b>Смирнов С. А., Смирнова О. Ю.</b> Оценка эффективности видов наземного транспорта для массовых грузовых перевозок	203
<b>Smirnov S. A., Smirnova O. Yu.</b> Evaluation of Effectiveness of Different Transport Modes for Regular Mass Freight Transportation	212

**А. В. Киреев, Н. М. Кожемяка, Г. Н. Кононов**

## **ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КОНТЕЙНЕРНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ**

Дата поступления 01.10.2017

Решение о публикации 26.10.2017

**Цель.** Исследовать возможности создания скоростной транспортной системы с магнитным подвесом для контейнерных перевозок по Евро-Азиатскому сухопутному мосту.

**Методы.** Используются методы ситуационного анализа, компьютерного моделирования, транспортной географии, технико-экономического анализа.

**Результаты.** Анализ ситуации на рынке транзитных контейнерных перевозок показал, что основным препятствием реализации транзитного потенциала России является ограниченная пропускная способность транспортных коридоров. Кардинальным решением проблемы может стать строительство новой высокоскоростной транспортной системы. Выявлены условия создания новой транспортной системы: использование транспортных возможностей Азово-Черноморского бассейна, обеспечение доступности северных территорий, разработка технических решений для создания транспортной системы с низкочувствительной инфраструктурой. Разработана комбинированная тягово-левитационная система на основе предельно простого варианта линейного реактивного индукторного двигателя. Проведены экспериментальные исследования полнофункциональной физической модели транспортной платформы. Несмотря на большие первоначальные капиталовложения в путевую инфраструктуру, инвестиционный проект имеет положительную экономическую оценку.

**Практическая значимость.** Разработана компьютерная модель комбинированной тягово-левитационной системы на основе линейного реактивного индукторного двигателя. Предложена концепция построения новой транспортной системы с учетом характеристик предполагаемого полигона эксплуатации на слабо освоенных территориях. Предложен маршрут высокоскоростной трассы, связывающий Азово-Черноморского бассейн с побережьем Тихого океана, полностью проходящий по территории России, затрагивая северные регионы. Оценка транзитного потенциала показала, что за счет сокращения времени транзита можно привлечь на маршрут контейнерные грузы с объемом перевозок 1,52 млн в 20-футовом эквиваленте.

Контейнерный трафик, конвейерный контейнерный транспорт, грузовой поезд Маглев, транспортный коридор, линейный синхронный двигатель, высокотемпературная сверхпроводящая технология.

## Введение

Общей тенденцией развития мировой транспортной системы является ускорение транспортного процесса, достигаемое формированием транспортных коридоров, совершенствованием транспортно-логистической структуры перевозок, повышением скорости движения транспортных средств [1].

К 2000 г. сформировались работоспособные технические решения для высокоскоростного транспорта с магнитным подвесом. В частности, запущена первая коммерческая линия в Японии Tobu Kyuuryo Line [2], высокоскоростная транспортная система на магнитном подвесе Transrapid в Шанхае [3], транспортная система UMT в Южной Корее [4].

На начальном этапе, когда виды скоростного транспорта только появились, разработчики стремились продемонстрировать возможности новой технологии, установить рекорды скорости движения. В качестве основного критерия приняли маршрутную скорость, оставив в тени экономические и социальные эффекты.

При попытке довести проекты до конкурентоспособного вида выяснилось, что есть только два транспортных коридора, на которых можно обеспечить окупаемость системы магнитолевитационных транспортных систем (МЛТС): во Франции и в Японии. Они проходят через густонаселенные районы с очень плотным движением и были созданы до того, как начал преобладать автомобильный транспорт.

Идет интенсивный поиск локальных транспортных коридоров, обеспечивающих окупаемость системы. Известны многочисленные проекты внедрения МЛТС [5] в США, Великобритании, Германии, Японии, Китае, Иране, Индии и др. Созданы компании для развития МЛТС, например, The Northeast Maglev (TNEM), США, сотрудничающая с Central Japan Railway Company (JR Central, Япония) в вопросах внедрения SCMAGLEV в Соединенных Штатах; U.S. – Japan MAGLEV, работающая над внедрением японской высокоскоростной системы на основе сверхпроводящего эффекта компании JRC (SCMAGLEV) [6].

Таким образом, в мировой практике этот вид наземного транспорта до сих пор широко не используется из-за высоких затрат на строительство и недостаточно интенсивного пассажиропотока.

Развитие технологии высокотемпературной сверхпроводимости породило новые возможности для МЛТС. Это нашло отражение в книге James Powell «The Fight for Maglev: Making America the World Leader in 21st Century Transport» [7]. В ней предложена грузовая МЛТС, использующая эффект высокотемпературной сверхпроводимости. Наиболее привлекательной сферой грузовых перевозок являются контейнерные перевозки конвейерного типа [8].

Ранее в США фирма General Atomics создала транспортную грузовую платформу на магнитном подвесе для системы контейнерных перевозок конвейерного типа [9].

В настоящее время в России разрабатывается магнитолевитационная конвейерная линия, ориентированная на обработку контейнерных грузов в терминале порта Усть-Луга<sup>1</sup>. Проект реализуется на базе новой магнитолевитационной технологии «МагТранСити» [10].

Новое применения МЛТС в сфере грузовых перевозок требует переосмысления концепции их построения с учетом характеристик предполагаемого полигона эксплуатации.

В стратегии развития железнодорожного транспорта до 2030 г. особое внимание уделено транзитным контейнерным перевозкам [11]. Территория Российской Федерации является естественным мостом, связывающим Европу со странами Азиатско-Тихоокеанского региона. Для реализации полного транзитного потенциала страны ставится задача повысить маршрутную скорость контейнерных поездов. В настоящее время транспортное пространство развивается, главным образом, за счет ликвидации разрывов и «узких мест» путем реконструкции и строительства отдельных участков транспортной сети. Основным проектом считается строительство скоростной железной дороги для ускоренной доставки контейнеров из Китая, Центральной и Восточной Азии в Европу – Трансъевразийской контейнерной магистрали. Такая магистраль позволит организовать контейнерные перевозки со скоростью 140–160 км/ч, увеличит провозную и пропускную способность Восточного полигона железных дорог России.

Идея создания Евразийского сухопутного моста с использованием технологии магнитного подвеса возникла давно [12], однако до настоящего времени не исследовалась возможность использования МЛТС для скоростных контейнерных перевозок по Евро-Азиатскому сухопутному мосту.

Цель нашей работы – исследовать возможность создания высокоскоростной транспортной системы с магнитным подвесом для контейнерных перевозок по Евро-Азиатскому сухопутному мосту.

## 1. Постановка задачи

Основные задачи данной работы:

- оценить ситуацию на рынке контейнерных перевозок;
- выявить факторы, определяющие условия создания новой транспортной системы;
- спрогнозировать объем контейнерных транзитных перевозок новой высокоскоростной транспортной системы;
- выявить факторы, определяющие маршрут трассы;

---

<sup>1</sup> <http://port-ustluga.ru/en>.

- исследовать технические решения, обеспечивающие реализацию проекта;
- оценить эффективность инвестиционного проекта.

## 2. Материалы и методы исследования

Основные источники информации, использованные при подготовке: транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года<sup>2</sup>, обзор морского транспорта (периодического издания ЮНКТАД)<sup>3</sup>, доклад Европейской экономической комиссии ООН (ЕЭК ООН) по Евро-Азиатским транспортным связям<sup>4</sup>, материалы Комитета по внутреннему транспорту (КВТ) ЕЭК ООН<sup>5</sup>, материалы Координационного совета по Транссибирским перевозкам (КСТП)<sup>6</sup>, информация операторов контейнерных поездов Китай – Европа – РЖД<sup>7</sup>, Транс Контейнер<sup>8</sup>, DB Schenker<sup>9</sup>, Far East Landing Bridge (FELB)<sup>10</sup>.

В качестве исследовательского инструментария использованы методы ситуационного анализа, компьютерного моделирования, транспортной географии, технико-экономического анализа.

## 3. Результаты

### 3.1. Оценка ситуации на рынке контейнерных перевозок

Сегодня основная часть грузов, доставляемых из Азии в Европу и обратно, перевозится морским транспортом, с этим связан резкий рост контейнерного грузооборота между двумя континентами. Второе место по стоимости обслуживаемых поставок занимает воздушный транспорт, а замыкают список железные дороги.

Из-за того, что в схеме доставки грузов преобладает морской транспорт, постепенно исчерпывается резерв пропускной способности североевропейских портов. В связи с этим многие логистические компании в Европе и Азии начали все чаще использовать для транспортировки товаров на европейский рынок порты южного Средиземноморья. При поставках через южную Европу крупные морские суда, следующие из Азии, проводят в пути на три-четыре дня меньше. В современных условиях существующая

---

<sup>2</sup> <https://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION>.

<sup>3</sup> [http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2014\\_ru.pdf](http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2014_ru.pdf).

<sup>4</sup> [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/eatl/docs/EATL\\_Report\\_Phase\\_II-Ru.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/eatl/docs/EATL_Report_Phase_II-Ru.pdf).

<sup>5</sup> <http://www.unece.org/trans/main/eatl.html>.

<sup>6</sup> <http://icctt.com/transsib>.

<sup>7</sup> [www.rzdlog.com](http://www.rzdlog.com).

<sup>8</sup> [www.trcont.ru](http://www.trcont.ru).

<sup>9</sup> <https://www.dbschenker.com>.

<sup>10</sup> [www.felb.world](http://www.felb.world).



пропускная способность портов становится недостаточной, и некоторые из них уже приближаются к предельному объему грузооборота.

Самая большая проблема Евро-Азиатского морского транспорта – очень продолжительное время перевозки.

Альтернативой морскому транспорту являются наземные перевозки, способные удовлетворить значительную часть ожидаемого в будущем дополнительного спроса на транспортные услуги. Расстояние по суше между Европой и Азией, как правило, короче расстояния по морю, особенно если пункты отправки и назначения груза лежат в глубине обоих континентов.

Железнодорожное сообщение становится оптимальным способом обеспечения связи портов с внутренними районами материка. Эффективная эксплуатация таких железнодорожных маршрутов, как Транссибирская магистраль<sup>11</sup> и северный Трансазиатский коридор<sup>12</sup> через территорию Китая, позволит создать весомую дополнительную провозную способность и сформировать нишевой спрос на ускоренные перевозки [13].

Сегодня маршрутная скорость контейнерных поездов по Транссибу составляет 1550 км/сут. Это достигнуто в основном за счет повышения маршрутной скорости путем сокращения количества и продолжительности технологических операций с поездными формированиями, что, несомненно, повышает конкурентоспособность данного вида перевозок. В то же время стремление к достижению максимально возможной технической скорости ограничивается потерями остальной части грузового движения по Транссибу.

Следующий вопрос связан с объемом перевозок. В директивных документах Российской Федерации, касающихся транспортной стратегии, заявленный объем транзитных перевозок по Транссибирской магистрали в 2030 г. должен составить 1,44 млн двадцатифутового эквивалента (ДФЭ). Однако главной проблемой планов увеличения транзитного потока грузов является пропускная способность Транссибирской магистрали. После реконструкции магистрали к 2018 г. совокупная пропускная способность составит 185 млн т в год. При этом доля контейнерного транзита может возрасти до 0,5 млн ДФЭ, что явно недостаточно для освоения планируемых объемов перевозок.

Оценка транзитного потенциала Российской Федерации в отношении товаропотоков между Азией и Европейским союзом показывает, что за счет сокращения времени транзита на 25–30 % можно привлечь грузы с морского пути. При этом общая доля сухопутного евразийского транспорта может быть увеличена с 1,9 до 18,5 %. В табл. 1 приведены данные прогноза распределения объемов контейнерного транзита между коридорами.

---

<sup>11</sup> <http://www.transsib.ru/cat-geo.htm>.

<sup>12</sup> [http://www.unescap.org/sites/default/files/tarsc-fulltext\\_1980.pdf](http://www.unescap.org/sites/default/files/tarsc-fulltext_1980.pdf).

Таблица 1

**Распределение объемов контейнерных перевозок между транспортными коридорами, %**

Транспортный коридор	2020 год
Транссибирская железная дорога	8,1
Северный Трансазиатский коридор	6,0
Маршрут через Суэцкий канал	81,5
Прочие маршруты	4,4
Итого	100

Полагая, что среднегодовой прирост объема перевозок Трансиба составит 5,6 %, и используя данные о морских контейнерных перевозках из Азии в Европу в 2016 г. (15,3 млн ДФЭ)<sup>13</sup>, можно вычислить ожидаемый объем перевозок по Транссибу в 2020 г. Он может составить 1,52 млн ДФЭ. Таким образом, прогнозируемый объем транзитных контейнерных перевозок существенно превышает заявленные директивные показатели.

Кардинальным решением проблемы может стать строительство новой скоростной транспортной системы со скоростью передвижения контейнерных грузов не менее 2500 км/сут. Это совпадает с выводами Европейской экономической комиссии. Так, в докладе «Евро-Азиатские транспортные связи» отмечено, что существует потребность в диверсификации нынешних и в открытии новых альтернативных маршрутов между Европой и Азией и в дальнейшем развитии транссибирского сообщения.

Новая транспортная система поможет увеличить пропускную способность железных дорог для грузовых перевозок, будет способствовать прямому бесперегрузочному сообщению между Европой и Азией, а при соответствующей прокладке маршрута может обеспечить доступность транспортных услуг по перевозке грузов в районах Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока и в удаленных регионах России.

### 3.2. Факторы, определяющие условия создания новой транспортной системы

#### 3.2.1. Предполагаемый маршрут трассы

*Геополитический фактор.* В складывающихся геополитических реалиях целесообразно рассмотреть вопрос стратегического использования Россией транспортных возможностей Азово-Черноморского бассейна в долгосрочном периоде [14]. Кроме того, для снижения политических рисков желатель-

<sup>13</sup> World Maritime Review, 2016.

но, чтобы маршрут был проложен по территории одной страны с начальными пунктами на Тихоокеанском побережье России и с конечными пунктами в крупных логистических центрах Азово-Черноморского бассейна.

*Фактор транспортной доступности северных территорий.* Стратегически необходимо приоритетное строительство новых линий большой протяженности в малоосвоенных северных регионах Российской Федерации в широтном направлении севернее Транссиба и БАМа, где находятся перспективные месторождения полезных ископаемых [15].

*Технико-экономический фактор.* Из-за больших расстояний и высокой удельной стоимости эстакадного путепровода МЛТС необходимо при выборе трассы реализовать концепцию минимального расстояния. Эстакадный путепровод МЛТС, в отличие от железных дорог, не требует расчистки тайги, выравнивания грунта, обхода естественных наземных препятствий. Обеспечивается гибкое включение путевой структуры в ландшафт, что создает предпосылки для спрямления трассы.

С учетом основных факторов, определяющих предполагаемый маршрут трассы, можно наметить следующий маршрут: начальный пункт – на Тихоокеанском побережье, конечный пункт – один из портов Азово-Черноморского бассейна. Южные порты России находятся на пересечении мировых торговых путей, через них проходят несколько транспортных коридоров, кроме того, это наиболее короткий путь от крупнейших промышленных центров России в Европу, страны Ближнего Востока, Азии.

В качестве начального пункта маршрута на тихоокеанском побережье можно выбрать морской порт Ванино<sup>14</sup> (рис. 1а). Это – транспортный узел, связывающий воедино железнодорожный, морской и автомобильный пути сообщения. Через Ванино поставляются грузы в северо-восточные регионы России, в Японию, Южную Корею, Китай, Австралию, США и другие страны. Выгодное географическое расположение порта открывает выход к морю грузам, идущим по Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожным магистралям.

Конечный пункт целесообразно выбрать в районе Таманского полуострова, так как в соответствии со «Стратегией развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года»<sup>15</sup> предполагается существенно увеличить грузооборот морских портов Азово-Черноморского бассейна за счет строительства нового морского порта Тамань<sup>16</sup> суммарной мощностью к 2030 г. более 100 млн т в год. Предполагаемое местоположение порта – район мыса Панагия (рис 1б), расположенного на юго-западе Таманского полуострова Ближайший железнодорожный узел – город Крымск.

---

<sup>14</sup> <http://www.vaninoport.ru>.

<sup>15</sup> [http://www.rosmorport.ru/media/File/State-private\\_Partnership/strategy\\_2030.pdf](http://www.rosmorport.ru/media/File/State-private_Partnership/strategy_2030.pdf).

<sup>16</sup> <http://taman-seaport.ru>.

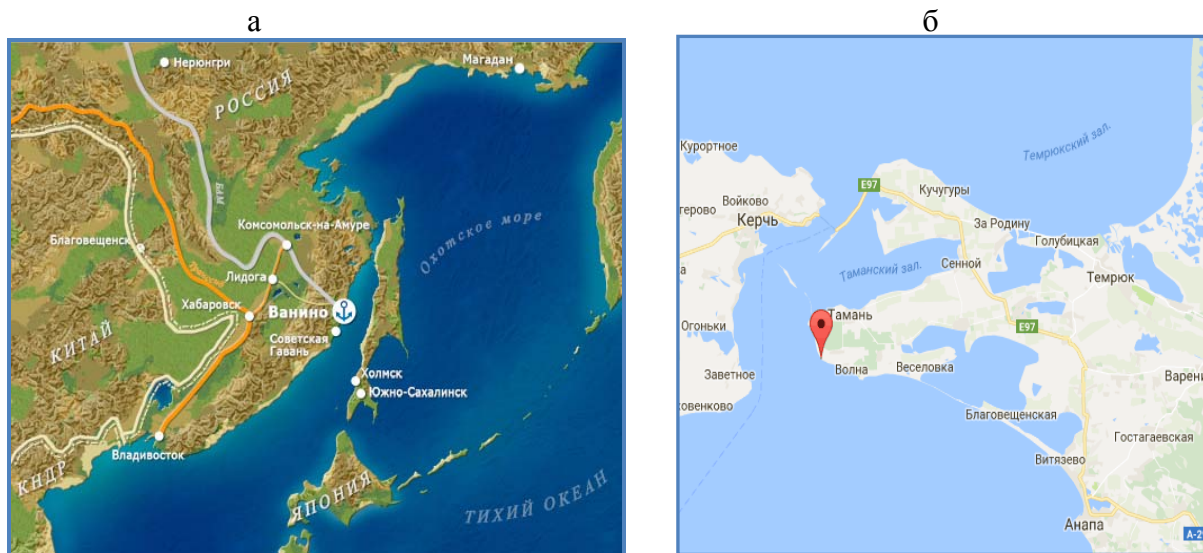


Рис. 1. Географическое положение начального (а) и конечного (б) пунктов маршрута

На рис. 2 показан предполагаемый маршрут высокоскоростной трассы МЛТС.

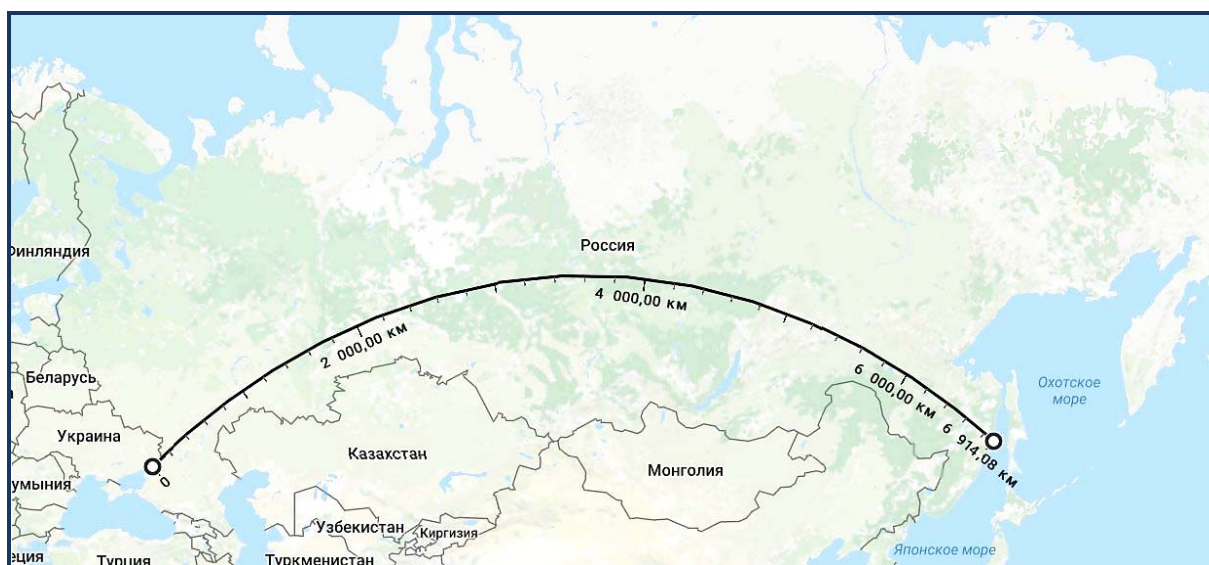


Рис. 2. Маршрут высокоскоростной трассы МЛТС

Предполагаемый маршрут трассы МЛТС характеризуется весьма большой протяженностью (около 7 тыс. км), потенциально имеет значительную полосу варьирования, ширина которой может составлять нескольких сотен километров в зависимости от особенностей рельефа местности, инженерно-геологических условий, местоположения благоприятных створов пересечения крупных рек, а также от сейсмических и других неблагоприятных условий на участках направления магистрали.

Маршрут учитывает ключевые факторы: связывает Азово-Черноморский бассейн с побережьем Тихого океана, полностью проходит по территории Российской Федерации, затрагивая северные территории (до 60 ° с. ш.), а его протяженность на 25 % короче протяженности имеющихся маршрутов.

### **3.2.2. Техническая реализация транспортной системы**

Необходимость создания высокоскоростных грузовых транспортных систем, имеющих обособленный путь с эстакадной прокладкой, вынуждает искать технические решения, позволяющие снизить затраты на создание и эксплуатацию МЛТС.

Предполагаемая трасса проходит через удаленные малообжитые труднодоступные районы (водные преграды, горные хребты, заболоченную местность и т. д.) с холодным климатом. В этих условиях необходимы транспортные системы с низкочувствительной инфраструктурой и технические решения, обеспечивающие бесперебойность транспортного потока по магистрали.

Наибольшая величина первоначальных инвестиций связана с существенными капиталовложениями при возведении путевой инфраструктуры для МЛТС. Это обстоятельство отпугивает потенциальных инвесторов. Однако если на хорошо освоенных территориях с развитой транспортной инфраструктурой экономическая эффективность МЛТС определяется конкурентной средой, то в северных труднодоступных районах для обеспечения устойчивых грузопотоков над снегом и зонами интенсивного водородного износа конструкций высокоскоростные грузовые транспортные системы эстакадного типа на магнитном подвесе по существу безальтернативны.

В России ЗАО «НТЦ ПРИВОД-Н»<sup>17</sup> в рамках Федеральной целевой программы разрабатывает элементы транспортной системы с магнитным подвесом, ориентированной на высокоскоростную транспортировку контейнерных грузов по слабо освоенным северным территориям.

Разработчики проекта выдвинули гипотезу о возможности создания простой комбинированной тягово-левитационной системы на основе предельно простого варианта линейного реактивного индукторного двигателя (ЛРИД), способного одновременно обеспечивать левитацию, тягу и курсовую стабилизацию. Такая комбинированная тягово-левитационная система позволяет использовать пассивную дискретную путевую структуру со сниженной материалоемкостью. Кроме того, простота конструкции напрямую связана с важнейшими эксплуатационными показателями, такими как живучесть и надежность системы.

---

<sup>17</sup> <http://privod-n.ru>.

Функциональная схема комбинированной системы левитации и тяги, выполненная на основе линейного реактивного индукторного двигателя, показана на рис. 3.

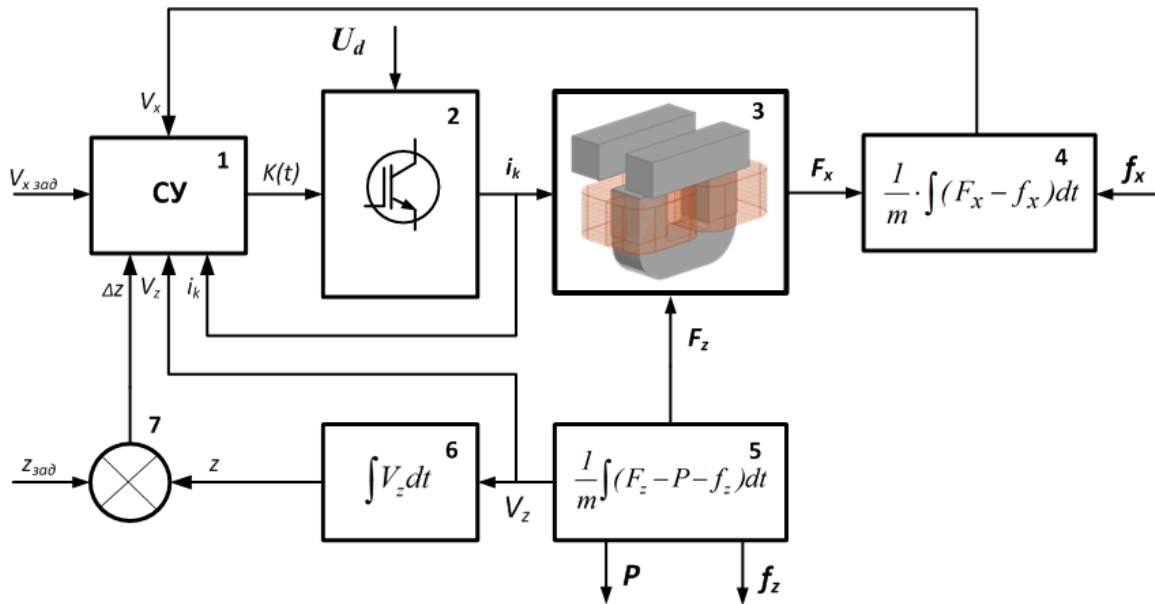


Рис. 3. Функциональная схема комбинированной системы левитации и тяги:  
 1 – система управления; 2 – силовой ключ преобразователя;  
 3 – тягово-левитационный модуль

Система управления 1 генерирует коммутационную функцию  $K(t)$ , управляющую переключением силовых ключей преобразователя 2. Под действием напряжения питания  $U_d$  преобразователь 2 формирует фазные токи  $i_k$  в обмотках тягово-левитационного модуля 3. При этом создаются сила тяги  $F_x$  и подъемная сила  $F_z$ . Под действием силы тяги  $F_x$  объект перемещается со скоростью  $V_x$ , преодолевая силу сопротивления движению  $f_x$  (блок 4). Подъемная сила  $F_z$  обеспечивает левитацию объекта, компенсируя вес объекта  $P$  и действие возмущающих сил  $f_z$  (блок 5). Под действием этих сил объект перемещается в вертикальном направлении со скоростью  $V_z$ . Сигнал зазора  $z$  формируется на выходе блока 6 путем интегрирования скорости вертикального перемещения  $V_z$ , сравнивается с заданным значением  $z_{зад}$  в блоке 7, а сигнал ошибки  $\Delta z$  подается на вход системы управления. Кроме этого, при формировании коммутационной функции  $K(t)$  используются сигналы  $V_x$ ,  $V_z$ ,  $i_k$  и сигнал задания скорости движения  $V_{x\text{ зад}}$ .

Особенностью математической модели комбинированной системы тяги и подвеса является описание потокосцепления фазного контура как функции трех переменных:

$$\Psi_k = f(i_k, x, z),$$

где  $i_k$  – ток в контуре;

$x$  – координата горизонтального перемещения;

$z$  – координата вертикального перемещения.

В общем виде математическая модель представляет систему уравнений, описывающих:

- баланс напряжений в электромагнитных контурах;
- процессы электромеханического преобразования энергии;
- уравнения движения объекта.

$$u_k = i_k \cdot R + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, z)}{\partial i_k} \cdot \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, z)}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, z)}{\partial z} \cdot \frac{dz}{dt};$$

$$F_x = \sum_{k=1}^b \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^i \Psi_k(i_k, x, z) di \right)_{\substack{i=const \\ z=const}};$$

$$F_z = \sum_{k=1}^b \frac{\partial}{\partial z} \left( \int_0^i \Psi_k(i_k, x, z) di \right)_{\substack{i=const \\ z=const}};$$

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x - f_x;$$

$$m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} = F_z - m \cdot g - f_z,$$

где  $i_k$  – ток электромагнитного контура;

$x$  – координата перемещения в горизонтальном направлении;

$z$  – координата перемещения в вертикальном направлении;

$\Psi_k$  – потокосцепление электромагнитного контура;

$k$  – номер электромагнитного контура;

$b$  – количество электромагнитных контуров;

$g$  – ускорение свободного падения;

$m$  – масса левитирующего объекта;

$R$  – активное сопротивление контура;

$u_k$  – напряжение, подводимое к электромагнитному контуру;

$F_x$  – горизонтальная сила, создаваемая электромагнитным контуром;

$F_z$  – вертикальная сила, создаваемая электромагнитным контуром;

$f_x$  – сила сопротивления движению;

$f_z$  – возмущающее воздействие.

На базе математической модели тягово-левитационной системы разработана ее компьютерная реализация в графической среде имитационного

моделирования Simulink. Компьютерная модель позволяет моделировать динамические режимы работы.

На рис. 4 представлены результаты моделирования электромеханических процессов в тягово-левитационной системе. Приведены осциллограммы мгновенных значений фазных токов в обмотках тягово-левитационного модуля, мгновенных значений сил по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Фазные токи  $i_k$  формируются таким образом, чтобы суммарное подъемное усилие, создаваемое фазными контурами, обеспечивало левитацию объекта, а суммарное тяговое усилие – заданную скорость движения. На рис. 4 показано, что при воздействии возмущения по координате  $y$  возникает сила бокового смещения  $F_y$ , обеспечивающая курсовую стабилизацию движущегося объекта.

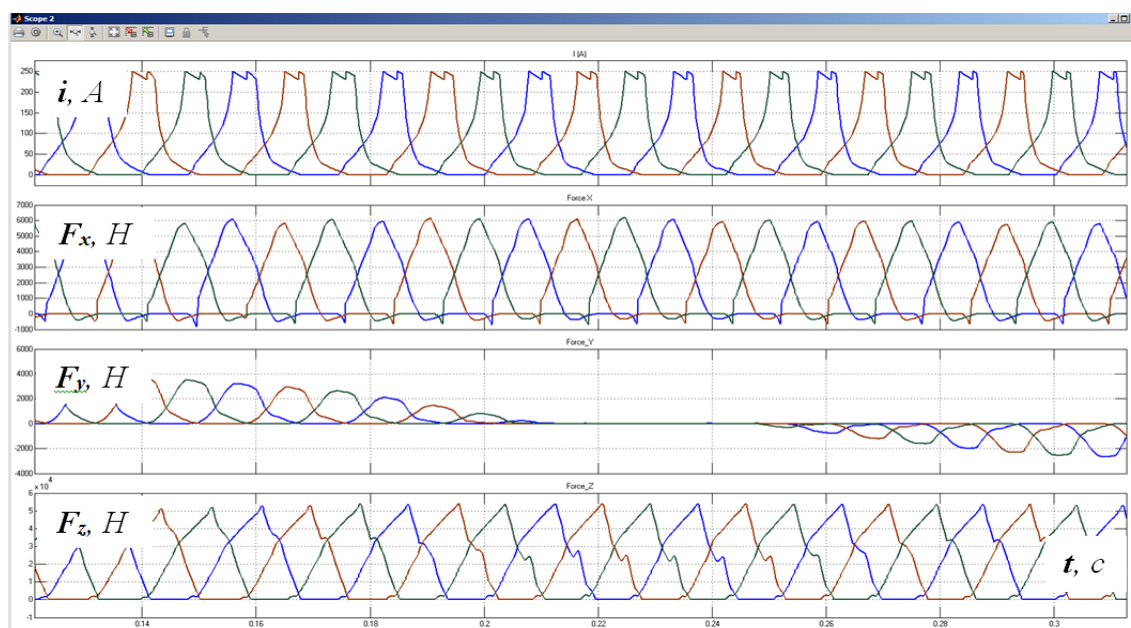


Рис. 4. Осциллограммы электромеханических процессов

По результатам компьютерного моделирования процессов в комбинированной системе тяги и подвеса разработаны основные технические решения. Для экспериментальной проверки концепции была изготовлена полнофункциональная физическая модель транспортной платформы, проведены экспериментальные исследования системы.

Основная цель эксперимента – проверить возможности совмещения в одном объекте функций левитации и тяги. Подобие процессов, протекающих в физической модели, обеспечивается подобием конфигурации магнитной системы макета тягово-левитационного модуля, выполненного в масштабе 1:7, идентичностью топологии схем силовых преобразователей модели и объекта, идентичностью алгоритмов управления и структуры системы управления. Транспортная платформа оснащена четырьмя тягово-левитационными модулями.



На рис. 5 показана функциональная схема модуля. Обмотки  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  модуля  $A1$  включены в силовую схему полумостовых преобразователей  $UZ1-UZ3$ , которые получают питание от аккумуляторной батареи  $G1$ . Система управления формирует алгоритм коммутации силовых ключей  $VT1$ ,  $VT2$  преобразователей  $UZ1-UZ3$ , обеспечивающий левитацию объекта и его линейное перемещение вдоль путевой структуры. На вход системы управления поступают сигналы, пропорциональные токам в обмотках  $I_{a1}$ ,  $I_{b1}$ ,  $I_{c1}$  от датчиков тока  $TA1-TA3$ , воздушного зазора  $\delta_1$  от датчика зазора  $B1$ , а также логические сигналы, фиксирующие положение полюсов магнитной системы модуля относительно путевых элементов от блока датчиков положения  $BL1-BL3$ .

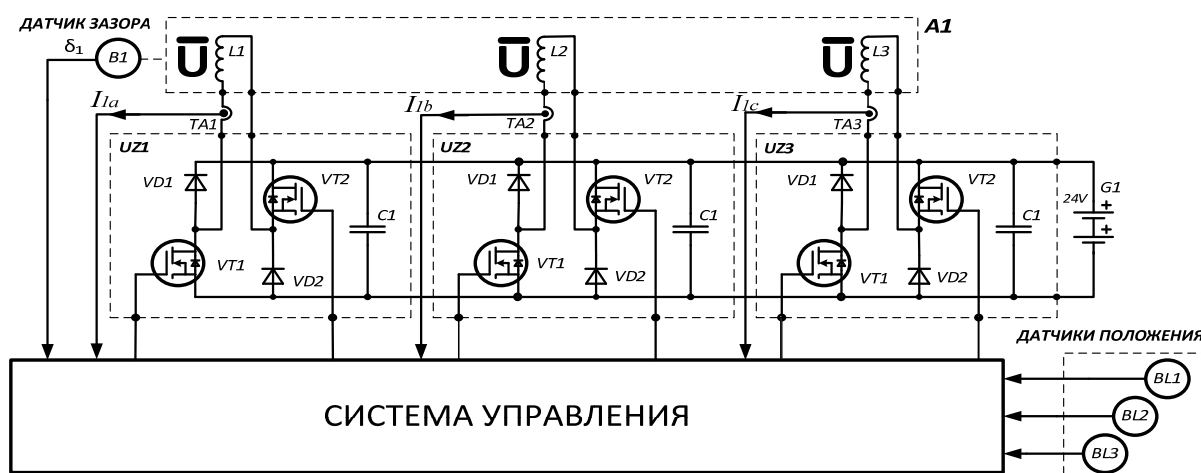


Рис. 5. Функциональная схема модуля

Конструктивно тягово-левитационный модуль полностью автономен и может быть адаптирован к различным конструктивным формам транспортной платформы.

На рис. 6 показан общий вид физической модели транспортной платформы.

Модель содержит четыре тягово-левитационных модуля, установленных на транспортной тележке; платформу с электронным оборудованием; дополнительную технологическую платформу, на которой располагается груз при экспериментах.

Во время экспериментов модель переводили в левитирующее состояние. Для этого в обмотки тягово-левитационных модулей подавали постоянный ток, регулируемый по величине в функции величины воздушного зазора между полюсами модулей и путевыми элементами. Далее запускали систему привода, при этом переключались токи в фазных обмотках по сигналам датчиков положения. При этом транспортная платформа бесконтактно перемещалась вдоль путевой структуры.



Рис. 6. Общий вид физической модели

На рис. 7 приведены осциллограммы электромеханических процессов при переходе тягово-левитационной системы из режима левитации в режим левитирующего перемещения вдоль путевой структуры. На осциллограммах показаны фазные токи модулей  $I_{1a}-I_{4c}$ , сигналы датчиков зазоров  $\delta_1-\delta_4$ , сигналы датчиков положения  $D_a, D_b, D_c$ .

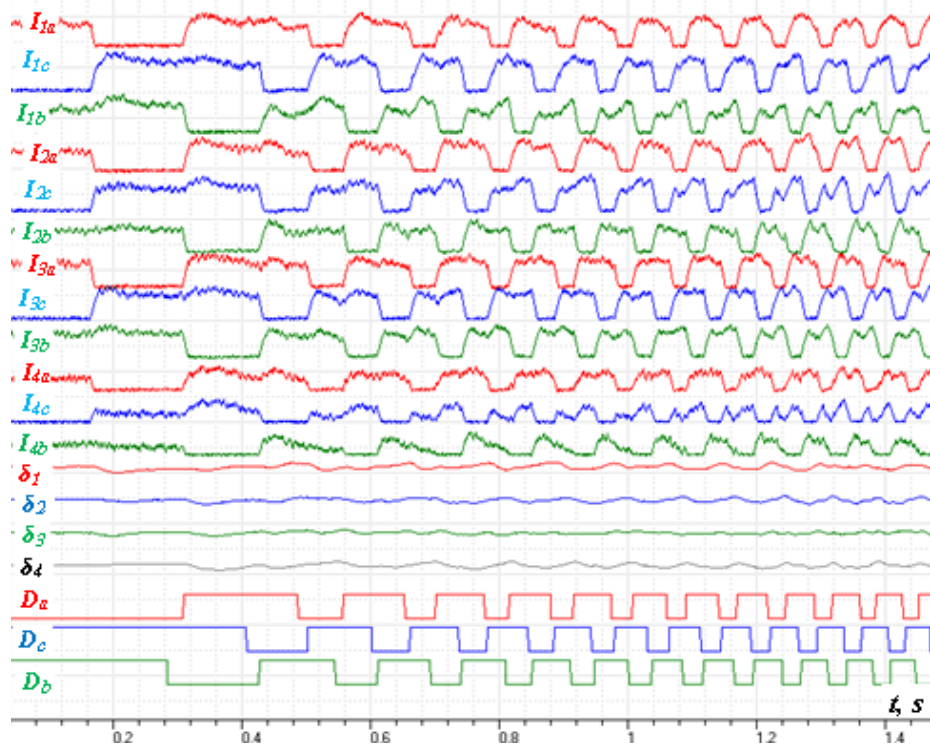


Рис. 7. Осциллограммы электромеханических процессов

Исследования физической модели транспортной платформы продемонстрировали ее работоспособность [16].

По результатам исследований предложена концепция построения грузовой МЛТС для эксплуатации на слабо освоенных территориях. Предлагаемая МЛТС должна содержать пассивную путевую структуру эстакадного типа и сцепные составы, состоящие из автономных транспортных платформ для перемещения контейнеров. Каждая платформа оснащается легкоъемными тягово-левитационными модулями и электрохимическими накопителями энергии. Подвижной состав может получать энергоснабжение как от автономных энергетических установок, так и от контактной сети. На рис. 8 показано поперечное сечение транспортной платформы.

На рис. 8 показаны: путевое полотно 1, опирающееся на опору 2; транспортная платформа 3, оснащенная колесными блоками 4, 5 для транспортировки платформы вдоль путевого полотна; передаточные устройства 6, 7, связывающие статоры линейных двигателей 8, 9 и транспортную платформу 3; элементы ротора 10, 11, установленные в ряд на путевом полотне 1 с шагом, равным полюсному делению линейного двигателя; роликовые катки 12, 13, ограничивающие боковое смещение платформы относительно путевого полотна. На поверхности путевого полотна 1 вмонтированы стальные пластины 14, 15, которые являются посадочной поверхностью для колес 4, 5 транспортной платформы 3.

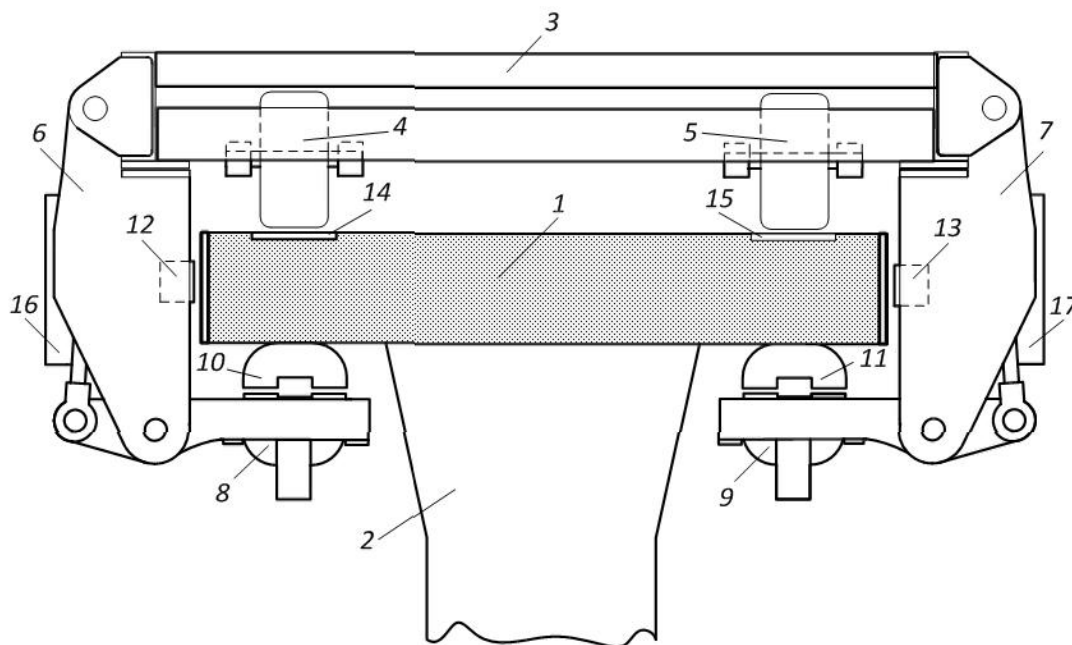


Рис. 8. Поперечное сечение транспортной платформы:

- 1 – путевое полотно; 2 – опора; 3 – транспортная платформа; 4, 5 – колесные блоки;
- 6, 7 – передаточные устройства; 8, 9 – статоры линейных двигателей;
- 10, 11 – элементы ротора; 12, 13 – роликовые катки; 14, 15 – стальные пластины;
- 16, 17 – преобразовательные устройства

При подаче импульсов тока в обмотки статоров линейных двигателей от преобразовательных устройств 16, 17 возникает силовое взаимодействие U-образных магнитопроводов статора и ротора через регулируемый по величине воздушный зазор. Создается тяговое, подъемное и боковое стабилизирующее усилие, которое передается через передаточные устройства к транспортной платформе. Это обеспечивает бесконтактное перемещение транспортной платформы вдоль путевой структуры.

Контейнерный поезд, составленный из 22 транспортных платформ, описанных выше, общей массой 1800 т может транспортировать 43 единицы 40-фунтовых контейнера с маршрутной скоростью 180 км/ч. Скорость передвижения контейнерных грузов – не менее 3600 км/сут. Чтобы реализовать прогнозируемый годовой объем транзитных контейнерных перевозок в 1,52 миллиона ДФЭ, необходимо, чтобы контейнерные поезда следовали с интервалом, равным примерно 0,5 ч (49 контейнерных поездов в сутки). При этом на линии в обоих направлениях одновременно должны находиться 156 контейнерных поездов. Парк транспортных платформ должен составлять 3432 единицы (без учета резерва).

Таким образом, предложенная концепция построения высокоскоростного контейнерного поезда физически реализуема и обеспечивает прогнозируемый годовой объем транзитных контейнерных перевозок.

#### **4. Оценка эффективности инвестиционного проекта**

Эффективность инвестиционного проекта оценивали в соответствии с Методическими рекомендациями, действующими на территории Российской Федерации. Горизонт планирования проекта – 40 лет. Денежные потоки проектов формируют следующие статьи затрат: инвестиционные затраты, эксплуатационные расходы, платежи по налогу на имущество.

В качестве основных показателей, используемых для расчетов эффективности инвестиционного проекта, выбраны: чистый доход, чистый дисконтированный доход, внутренняя норма доходности, индекс доходности инвестиций, индекс доходности дисконтированных инвестиций; срок окупаемости.

Годовой экономический эффект определяется как разность между денежными потоками соответствующего года проекта с электровозом ЭП20 [17] и проекта МЛТС с ее последующим дисконтированием. Показатели эффективности проекта МЛТС приведены в табл. 2.

Расчетные значения основных показателей эффективности позволяют сделать вывод, что предлагаемый проект применения МЛТС для контейнерных перевозок является эффективным. Несмотря на большую величину первоначальной инвестиций, связанных с более существенными капиталовложениями в путевую инфраструктуру МЛТС, значительная экономия эксплуатационных расходов выводит проект на положительный экономический результат.

Таблица 2

**Показатели эффективности проекта МЛТС**

Показатель	Значение
Чистый доход, млн руб.	264 524,4
Чистый дисконтированный доход, млн руб.	7 555,6
Внутренняя норма доходности, %	10
Индекс доходности инвестиций	2,33
Индекс доходности дисконтированных инвестиций	1,04
Срок окупаемости (простой), лет	10,1
Срок окупаемости дисконтированный, лет	26,03

При расчетах не учитывались дополнительные денежные потоки для оператора, связанные с тарифной составляющей (от роста коэффициента производительности), а также социальные аспекты данного проекта для регионов страны, в которых будет реализован данный проект. С учетом такого мультипликативного эффекта экономическая целесообразность и привлекательность проекта заметно возрастает.

**Заключение**

Развитие транспортной инфраструктуры Российской Федерации связано с географическим положением страны как естественного транспортного коридора, соединяющего Европейский, Азиатско-Тихоокеанский регионы. Создание высокоскоростной Евроазиатской транспортной системы соответствует директивным документам, касающимся транспортной стратегии Российской Федерации по развитию потенциала евро-азиатских транспортных связей и транзитных перевозок грузов.

Транспортная система может быть основана на современной магнитолевитационной технологии, позволяющей существенно снизить эксплуатационные расходы, а следовательно, и транспортные издержки за счет бесконтактного перемещения транспортной платформы относительно путевой структуры.

Новая транспортная система будет способствовать высвобождению пропускной способности железных дорог для грузовых перевозок, прямому бесперегрузочному сообщению между Европой и Азией, а при соответствующей прокладке маршрута обеспечит доступность транспортных услуг по перевозке грузов в районах Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока и в удаленных регионах России.

## Библиографический список

1. Владимиров С.А. Мировая транспортная система и логистика: основные направления развития / С.А. Владимиров // Региональная экономика и управление. – 2016. – № 2 (46). – URL: <http://eee-region.ru/article/4602> (дата обращения 10.04.2017).
2. Yuyama Y. The tobu kyuryo line (popular name: linimo) a magnetic levitation system / Y. Yuyama // The 18th Int. Conf. Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 26–28 Oct. 2004, Shanghai, China. – URL: [http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2004/topic2/IMT\\_CP\\_M2004\\_T2\\_6.pdf](http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2004/topic2/IMT_CP_M2004_T2_6.pdf) (дата обращения 10.04.2017)
3. Shanghai Maglev Transrapid Technology. Presentation Siemens AG, 2007. – URL: <http://www.ft.dk/samling/20061/almdel/tru/bilag/361/363482.pdf> (дата обращения 27.09.2017).
4. Maglev for Urban Transit. – URL: <http://www.discovery.org/scripts/viewDB/filesDB-download.php?command=download&id=950> (дата обращения 27.09.2017).
5. Wiegand D. Magnetschellbahn Moskau – Berlin: Maglev – Hochgeschwindigkeits magistrale Ost-West / D. Wiegand // The Int. Maglevboard. – München, 2010. – Juni. – P. 237–245.
6. Superconducting Maglev the World's Fastest Train – Coming to America. Website Company USJMAGLEV, 2012. – URL: <http://www.usjmaglev.com/usjmaglev/Home.html> (дата обращения 10.04.2017).
7. Powell J. The Fight for Maglev: Making America the World Leader in 21st Century Transport / J. Powell, J. Jordan, G. Danby. – USA: Create Space, 2012. – 402 p.
8. James K. Maglev Freight Conveyor Systems / K. James. – URL: [http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2008/topic1/IMT\\_CP\\_M2008\\_T1\\_5.pdf](http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2008/topic1/IMT_CP_M2008_T1_5.pdf) (дата обращения 10.04.2017).
9. General Atomics. Maglev Technologies. Website Company General Atomics (GA). – URL: <http://www.ga.com/urban-maglev> (дата обращения 10.04.2017).
10. Антонов Ю.Ф. Технология «Магтрансити» в проекте «Санкт-Петербургский Маглев» / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев, Е.И. Морозова, Ю.Ф. Хозиков // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 4. – С. 5–17.
11. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением правительства РФ от 11 июня 2014 г. № 1032-р). – URL: [http://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION\\_ID=2203#document\\_19188](http://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION_ID=2203#document_19188) (дата обращения 10.04.2017).
12. Tennenbaum J. The New Eurasian Land-Bridge Infrastructure Takes Shape, 2001. – URL: <http://www.larouchepub.com/eiw/public/2001/eirv28n42->

20011102/eirv28n42-20011102\_016-the\_new\_urasian\_land\_bridge\_inf.pdf  
(дата обращения 01.09.2017).

13. The Euro-Asian Transport Links (EATL) project. – URL: <http://www.unecsc.org/trans/main/eatl.htm> (дата обращения 10.04.2017).

14. Раровский П.Е. Российский экспорт транспортных услуг в современных условиях / П.Е. Раровский // Рос. бюл. российского фонда. – 2016. – № 5. – С. 116–131. – URL: <http://www.rfej.ru/rvv/id/0003F43CB> (дата обращения 27.09.2017).

15. Копыленко В.А. Расширение сети железных дорог в малоосвоенных регионах России – одна из важных задач развития железнодорожного транспорта страны в XXI веке / В.А. Копыленко, Ю.А. Быков, И.В. Турбин, В.В. Космин // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта (Прил. к журн. Транспорт РФ). – 2008. – № 4. – С. 4–7.

16. Kireev A.V. Starting operating mode of the combined traction levitation system of the vehicle equipped with magnetic suspension / A.V. Kireev, G.N. Kononov, A.V. Lebedev // Int. J. Power Electronics and Drive System (IJPEDS). – 2017. – № 8 (1):176. – P. 176–183.

17. Пархоменко А. Локомотивы нового класса EP20 нового поколения РЖД / А. Пархоменко // Railvolution. The Prof. Two-Monthly Magazine of Rail Transp. Worldwide. – Т. 12. – № 4/12. – С. 85–92. – URL: <https://library.e.abb.com/public/175cd263dc51cad2c1257a860040bcd2/Railvolution04-12-ABB-Traction-transformers-EP20.pdf> (дата обращения 10.04.2017).

**Сведения об авторах:**

КИРЕЕВ Александр Владимирович, к. т. н., доцент, генеральный директор.

E-mail: [akireev@privod-n.ru](mailto:akireev@privod-n.ru)

КОЖЕМЯКА Николай Михайлович, к. т. н., технический директор.

E-mail: [nkozhemuyaka@privod-n.ru](mailto:nkozhemuyaka@privod-n.ru)

КОНОНОВ Геннадий Николаевич, ведущий специалист.

E-mail: [gkononov@privod-n.ru](mailto:gkononov@privod-n.ru)

ЗАО «Научно-технический центр ПРИВОД-Н, г. Новочеркасск

© Киреев А. В., Кожемяка Н. М.,  
Кононов Г. Н., 2017

V. Kireev, N. M. Kozhemyaka, G. N. Kononov

## PREREQUISITES FOR THE CREATION OF A HIGH-SPEED CONTAINER TRANSPORT SYSTEM

Date of receipt 01.10.2017

Decision on publication 26.10.2017

The new scope of application for vehicles equipped with magnetic suspension is the freight container transportation. In order to realise the transit potential of the country, the increase in mean speed of the container trains is required.

**Objective.** The purpose of the work is to explore the possibilities to develop the high-speed transport system equipped with magnetic suspension for container transportation along Eurasian land bridge.

**Methods.** The following methods and analysis have been used as research instruments: case study, computer modeling, transport geography and technical and economic analysis.

**Results.** The market analysis results of the transit container transportation have shown that the major challenge for Russian transit development is the constrained traffic capacity of the existing transport corridors. The drastic solution of the problem can be the construction of a new high-speed transport system. The following factors determining the conditions for the creation of the new transport system have been identified: the use of the Azov-Black sea basin transportation facilities, provision of the accessibility of the northern areas; the development of technical solutions ensuring the design of the transport system with low cost infrastructure. The combined traction levitation system has been developed based on the extremely simple design of the linear switched reluctance motor. The experimental researches of the full-functional physical model of the transport platform have been performed. The assessment of investment project efficiency has shown that despite large start-up investment in the track infrastructure, the project has positive economic effect.

**Practical importance.** The computer model of the combined traction levitation system based on the linear switched reluctance motor has been designed.

The concept of the new transport system construction has been introduced taking into account the characteristics of the supposed operating test sites in poorly developed areas. The high-speed route has been proposed connecting the Azov-Black sea basin with the Pacific coastline and completely passing through the territories of Russia including some northern regions. The transit potential assessment has shown that due to the transit time reduction it is possible to attract the container freights with traffic volume of 1.52 million in twenty-pounds equivalent.

Container traffic, conveyor container transport, maglev freight train, transport corridors, linear synchronous motor, high-temperature superconducting technology.



## Introduction

The general tendency for the development of the world transport system is the acceleration of the transport process, achieved by the formation of transport corridors, improvement of the transport and logistics structure of transportation, and the increase of speed transport modes [1].

By 2000, workable technical solutions for high-speed magnetically suspended transport had been formed. In particular, the first commercial line in Japan Tobu Kyuryo Line [2], the high-speed transport system on the magnetic suspension Transrapid in Shanghai [3], the UMT transport system in South Korea [4].

In the beginning, once high-speed modes of transport emerged, the developers already showed aspiration for demonstration of the new technology capabilities. This stage is characterised by the desire to set speed records. As the main criterion the route speed was put forward, leaving in shadow the economic and social effects.

Attempting to give the projects competitive status, the developers found out that there were only two transport corridors where recoument of magnetic levitation transport systems (MLTS) could be ensured. These are ones in France and Japan, running through densely populated areas with heavy traffic. These corridors were established before the dominance of road transport.

The active search for local transport corridors that could ensure recoument of the system is being observed. Many MLTS implementation projects are known now [5] in the USA, Great Britain, Germany, Japan, China, Iran, India and others. The companies for maglev implementation emerged: The Northeast Maglev (TNEM) – American company which cooperates with the Japanese Central Japan Railway Company (JR Central) in implementation of SCMAGLEV in the USA, the American company US – Japan MAGLEV working at implementation of the Japanese superconductor-based maglev system of the company JRC (SCMAGLEV) [6].

Thus, it is obvious that the world practice has not broadly deployed this kind of ground transport yet, due to high construction expenditure costs and lack of intensive stable passenger traffic.

The development of high-temperature superconductor technology gave birth to new vision of MLTS. That was reflected in the book by James Powell “The Fight for Maglev: Making America the World Leader in 21st Century Transport” [7]. In the book, the freight high-temperature superconductor-based MLTS has been proposed. The most attractive type of freight transportation is conveyor container transport [8].

Earlier, in the USA the work of construction of transport freight platform with magnetic suspension had been conducted by General Atomics [9]. The transport was intended for conveyor transportation.

At present, Russia is developing maglev conveyor line for processing container goods in Ust-Luga Port Terminal<sup>18</sup>. The project is being realised on the basis of new maglev technology “MagTranSiti” [10].

New application of MTLT in the sphere of freight transportation requires reconsideration of concept of its construction taking into account the properties of the area intended for operation.

The railway transport development strategy up to 2030 has special chapter for transit container transportation [11]. The territory of the Russian Federation is a natural bridge connecting Europe and Asia-Pacific Region states. For realisation of transit potential of the country, the task is set to increase container trains speed. Now, the development of transport area is conducted at the expense of liquidation of gaps and “narrow sections” by virtue of reconstruction and construction of separate sections of transport network. The main project is considered to be construction of high-speed railway for accelerated delivery of containers from China, Central Asia and Eastern Europe to Europe – the Trans-Eurasia Container Mainline. This mainline will enable organisation of container transportation with the speed of 140-160 km/h, ensure release of carrying capacity of Russia Far East railways.

Meanwhile, the idea of establishment of Eurasian Land Bridge deploying magnetic suspension technology [12]. However, until now no researches had been carried out to access capabilities of MLTTS-based container transportation on the Eurasian Land Bridge.

The purpose of the work consists in studying the possibility of creating high-speed transport system with magnetic suspension for container transportation on Eurasian Land Bridge.

## 1. Setting task

The basic tasks that were solved during the research are as follows:

- assessment of container transportation market situation;
- identification of factors that determine the conditions for the creation of a new transport system;
- forecasting the volumes of container transit traffic of a new high-speed transport system;
- identification of factors determining the route of the line;
- research of technical solutions ensuring realisation of the project;
- assessment of the project efficiency.

---

<sup>18</sup> <http://port-ustluga.ru/en>.

## 2. Materials and methods of research

The main information sources used for the work are: the Russian Federation's Transport Strategy up to 2030<sup>1</sup>, sea transport review (regular publication issued by UNCTAD)<sup>2</sup>, the UN Economic Commission for Europe (UNECE) on the Euro-Asian Transport Links (EATL)<sup>3</sup>, materials of UNECE Inland Transport Committee<sup>4</sup>, materials of the Coordinating Council on

Trans-Siberian Transportation (CCTT<sup>5</sup>), information provided by container transportation operators China-Europe: JSC "RZD"<sup>6</sup>, Intermodal container operator "Trans Container"<sup>7</sup>, DB Schenker<sup>8</sup>, Far East Landing Bridge (FELB)<sup>9</sup>.

As an instrument of research, the situation analysis methods were used, computer modelling, transport geography, technical and economic analysis.

## 3. Results

### 3.1. Assessment of container transportation market situation

Today, most of the cargo transported from Asia to Europe and back is carried by sea, which is associated with a sharp increase in container freight turnover between the two continents. The second place in the cost volume of supplies is air transport. The list is closed by railway transport.

The prevailing scheme of goods delivery by sea has led to a gradual exhaustion of turnover capacity reserves of the North European ports. In this regard, many logistics companies in Europe and Asia began to increasingly use the ports of the southern Mediterranean to transport goods to the European market. When delivering through southern Europe, large ships navigating from Asia spend three or four days less on the way. In modern conditions, the existing capacity of ports is becoming insufficient, and some of them are already rapidly approaching the maximum volumes of cargo turnover.

The biggest problem that exists in Euro-Asian maritime transport is related to very long shipment time.

---

<sup>1</sup> <https://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION...>

<sup>2</sup> [http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2014\\_ru.pdf](http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2014_ru.pdf).

<sup>3</sup> [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/eatl/docs/EATL\\_Report\\_Phase\\_II-Ru.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/eatl/docs/EATL_Report_Phase_II-Ru.pdf).

<sup>4</sup> <http://www.unece.org/trans/main/eatl.html>.

<sup>5</sup> <http://icctt.com/transsib>.

<sup>6</sup> [www.rzdlog.com](http://www.rzdlog.com).

<sup>7</sup> [www.trcont.ru](http://www.trcont.ru).

<sup>8</sup> <https://www.dbschenker.com>.

<sup>9</sup> [www.felb.world](http://www.felb.world).

An alternative to maritime transport is land transportation, which can meet a significant part of the expected additional demand for transport services in the future. Distances by land between Europe and Asia are generally shorter than the distances by sea, especially if the points of departure and destination of the cargo lie deep in both continents.

Railway transport is becoming an optimal way of ensuring connections between ports and inland regions of a continent. Efficient operation of such railway routes as the Trans-Siberian Railway<sup>1</sup> and the Trans-Asian Railway<sup>2</sup> through China will enable creation of additional passage capacity, making it possible to form the niche demand for enhanced transportation [13].

Today, the journey speed of container trains along the Trans-Siberian Railway is 1550 km per day. This is achieved, mainly, by increasing the journey speed by reducing the number and duration of technological operations with train units, which undoubtedly increases the competitiveness of this type of transportation. At the same time, the desire to achieve the maximum possible technical speed is limited by the loss of the rest of the freight traffic along the Trans-Siberian Railway.

The next issued is bound with the transportation volume. In the directive documents of the Russian Federation concerning the transport strategy, the declared volume of transit traffic along the Trans-Siberian Railway in 2030 is expected to reach 1.44 million TEU. However, the main problem in the implementation of plans to increase the transit flow of goods is the capacity of the Trans-Siberian Railway. After completion of the reconstruction of the highway by 2018, the total capacity will be 185 million tons per year. At the same time, the share of container transit can increase to 0.5 million TEU, which is clearly not enough to reach the planned traffic volumes.

The assessment of transit potential of the Russian Federation in terms of goods traffic between Asia and the EU indicates that the at the expense of transit time by 25–30 % the sea way goods can be taken as well. The total share of land Eurasian transport can be increased from 1.9 to 18.5 %. Table 1 shows the forecast data for the distribution of container transit between corridors.

Table 1

**Distribution of transit volume between corridors, %**

Transports corridor	2020
The Trans-Siberian Railway	8,1
The Trans-Asian Railway	6,0
The Suez Canal route	81,5
Other routes	4,4
Total	100

<sup>1</sup> <http://www.transsib.ru/cat-geo.htm>.

<sup>2</sup> [http://www.unescap.org/sites/default/files/tarsc-fulltext\\_1980.pdf](http://www.unescap.org/sites/default/files/tarsc-fulltext_1980.pdf).

Using the data of Table 1 for the TSR (8.1), supposing that the average volume grow makes 5.6 %, as well as data of sea container transportations to Europe in 2016 (15.3 million TEU)<sup>19</sup>, we can calculate the expected transportation volume on the TSR in 2020. The expected transportation volume may reach 1.52 million TEU. Thus, the forecast transportation volume significantly exceeds the volume stated in the directive documents.

A cardinal solution to the problem might become the construction of new rapid transport system with containers carried at least 2500 km per day. This would coincide with UNECE articles. Thus, the Euro-Asian Transport Links report suggests that there is need in diversification of today's routes and opening of new alternative ones between Europe and Asia, further developing the trans-Siberian communication.

The new transport system can facilitate the release of the capacity of railways for freight traffic, direct uninterrupted communication between Europe and Asia, and, if properly routed, can ensure the availability of transportation services for carrying goods in the Far North, Siberia, the Far East and remote regions of Russia.

### 3.2. Factors determining the conditions of creation of new transport system

#### 3.2.1 The expected route

*Geopolitical factor.* In the forming geopolitical realia, it is reasonable to consider the issue of Russia's using the transport strategic capacities of the Azov and Black Sea Basin in the long run [14]. Besides, to decrease political risk, it would be highly advisable to have the entire route laid on the territory of one country, for example with the starting points on Russia's Pacific coast and terminal points in logistical centres of the Azov and Black Sea Basin.

*Northern territories' transport accessibility factor.* There is a strategic need of priority construction of new extended lines in the poorly developed Northern regions of the country, for example north to the TSR and Baikal-Amur Mainline where the prospective natural resources can be found [15].

*Technical and economic factor.* Vast territory and high unit cost of MLTS flyover dictates demand in realisation of minimum distance when choosing the route. Unlike conventional railways, a MLTS flyover does not require cleaning taiga territories, levelling the ground, bypassing natural obstacles. The flexible inclusion of the structure into landscape is ensured, creating prerequisite for straightening the track.

---

<sup>19</sup> World Maritime Review, 2016.

Taking into account the main factors determining the proposed route, we can outline the following route: the starting point is on the Pacific coast; the terminal point is one of the ports of the Azov and Black Sea basin. The southern ports of Russia are at the crossroads of the world trade routes, several transport corridors pass through them, in addition, it is the shortest way from the largest industrial centres from Russia to Europe, the countries of the Middle East, and Asia.

As the starting point of the route on the Pacific coast, we can choose the seaport of Vanino (fig. 1a)<sup>20</sup>. It is a transport hub connecting railway, sea and road routes. Through Vanino shipments are delivered to the northeast regions of Russia, Japan, South Korea, China, Australia, the USA and other countries. The favourable geographic location of the port opens the way to the sea for cargoes travelling along the Baikal-Amur and Trans-Siberian railways

It is advisable to make the Taman peninsula area as a terminal point. Since Russia's sea infrastructure development strategy up to 2030<sup>2</sup> forecasts significant increase of cargo turnover of the Azov and Black Sea basin at the expense of construction of the port of Taman<sup>3</sup> with the expected capacity of more than 100 million tonnes by 2030. The proposed location of the port is Panagia Cape area (fig. 1b) located in Southwest of Taman Peninsula. The nearest railway hub is the city of Krymsk.



Fig. 1. Geographical location of starting (a) and terminal (b) points of the route

The fig. 2 shows the proposed high-speed MLTS route.

<sup>20</sup> <http://www.vaninoport.ru>.

<sup>2</sup> [http://www.rosmorport.ru/media/File/State-rivate\\_Partnership/strategy\\_2030.pdf](http://www.rosmorport.ru/media/File/State-rivate_Partnership/strategy_2030.pdf).

<sup>3</sup> <http://taman-seaport.ru>.

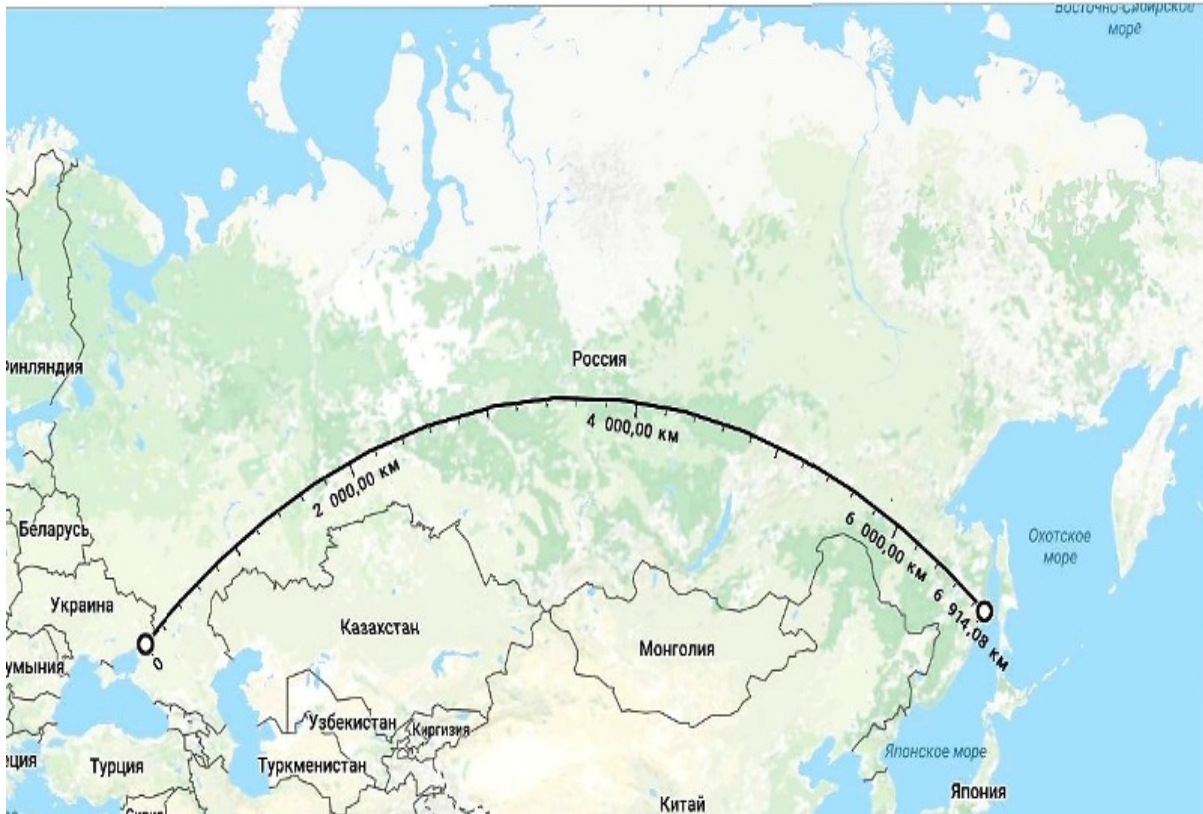


Fig. 2. MLTS high-speed route

The prospective route of the MLTS route is characterised by a very large length (approximately 7 000 km), potentially has a significant range of variation, the width of which can be several hundred kilometers, depending on the terrain features, geotechnical conditions, location of favourable crossings of broad rivers, and also from seismic and other unfavourable conditions on the sections of the direction of the mainline.

The route takes into account key factors: it connects the Azov and Black Sea basin with the Pacific coast, completely passes through the territory of the Russian Federation, including northern territories (up to 60° N), and its length is 25 % shorter than the length of existing routes.

### 3.2.2. Technical realisation of the transport system

The critical need in creation of high-speed freight transportation systems, having a separate flyover route, generates the task to search for technical solutions, enabling us to decrease costs for construction and maintenance of MLTS.

The proposed route passes through remote low-accessible areas (water barriers, mountain ranges, wetlands, etc.) with a cold climate. In these conditions, transport systems with low-cost infrastructure and technical solutions are needed to ensure uninterrupted traffic on the mainline.

The largest amount of initial investment is associated with significant capital investment in the construction of a track infrastructure for MLTS. This circumstance discourages potential investors. However, if the economically effective MLTS is determined by a competitive environment in well-developed territories with a developed transport infrastructure, in high-traffic areas of the northern hard-to-reach areas to ensure stable cargo flows over the snow and zones of intensive hydrogen wear of structures, the high-speed cargo transport systems of the flyover type on magnetic suspension are essentially non-alternative

In Russia, Ltd. “PRIVOD-N”<sup>21</sup> within the Federal Target Programme (*Federal'naya Tselevaiia Programma*) is developing transport system elements with magnetic suspension aimed at transporting goods through poorly developed northern territories.

The developers of the project have formulated a working hypothesis about construction of simple combined traction and levitation system on the basis of the switched reluctance motor, capable to simultaneously ensure levitation, traction and stabilisation. This combined traction and levitation system enables using the passive discrete guideway with a decreased materials consumption. Besides, the simplicity of the construction is directly related to the most important operational factors, such as survivability and reliability of the system.

The functional scheme of the combined traction and levitation system, arranged on the basis of the switched reluctance motor, is shown in the fig. 3.

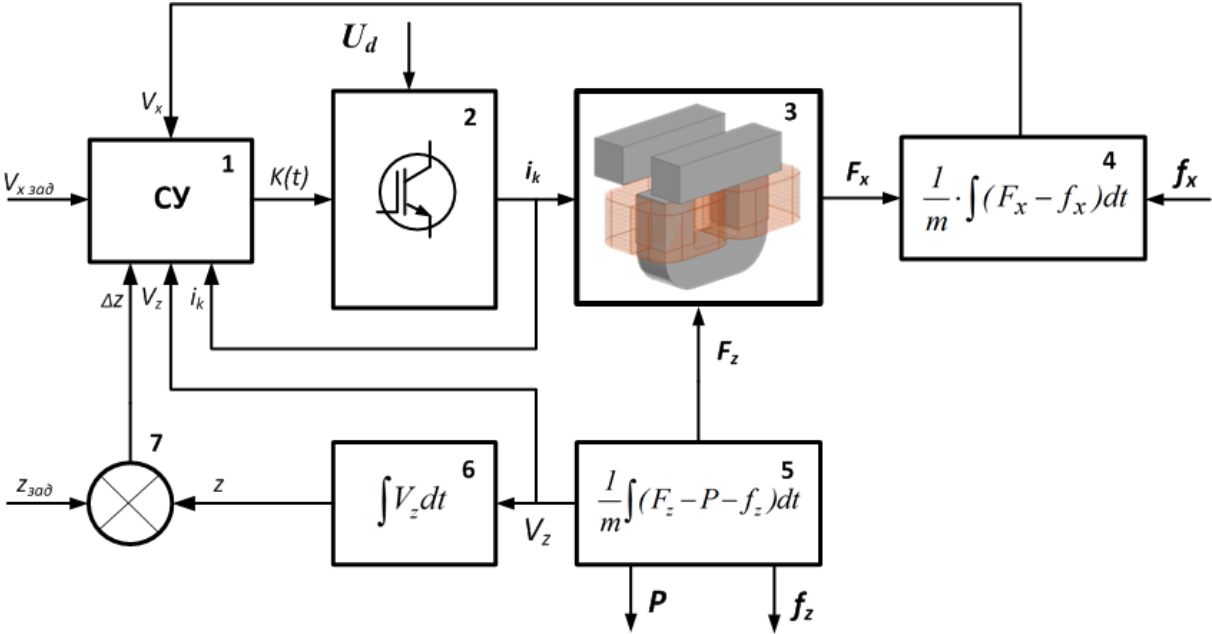


Fig. 3. Functional system of combined traction and levitation system

<sup>21</sup> <http://privod-n.ru>.



The system of operation 1 generates commutation function  $K(t)$ , operating switches of power keys of converter 2. Under the influence of the supply voltage  $U_d$ , the converter 2 generates phase currents  $i_k$  in the windings of the traction and levitation module 3. This generates the traction force  $F_x$  and the lifting force  $F_z$ . Under the action of the traction force  $F_x$ , the object moves at a speed  $V_x$ , overcoming the resistance to movement  $f_x$  (block 4). Lifting force  $F_z$  provides levitation of the object, compensating the weight of the object  $P$  and the action of the disturbing forces  $f_z$  (block 5). Under the action of these forces, the object moves in the vertical direction at a speed  $V_z$ . The gap signal  $z$  is formed at the output of the unit 6 by integrating the vertical travel speed  $V_z$ , is compared with the set value  $z_{set}$  in the block 7, and the error signal  $\Delta z$  is supplied to the input of the control system. In addition, when forming the switching function  $K(t)$ , the signals  $V_x$ ,  $V_z$ ,  $i_k$  and the speed reference signal  $V_{x\ set}$  are used.

A peculiarity of the mathematical model of the combined traction and suspension system is the description of the linkage of the phase contour as a function of three variables:

$$\Psi_k = f(i_k, x, z),$$

where  $i_k$  – contour current;

$x$  – horizontal motion coordinate;

$z$  – vertical motion coordinate.

Generally, the mathematical model shows the system of equations describing:

- current balance in electromagnetic contours;
- electromechanical energy converters processes;
- object motion equations.

$$u_k = i_k \cdot R + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, z)}{\partial i_k} \cdot \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, z)}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, z)}{\partial z} \cdot \frac{dz}{dt};$$

$$F_x = \sum_{k=1}^b \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^i \Psi_k(i_k, x, z) di \right)_{\substack{i=const \\ z=const}};$$

$$F_z = \sum_{k=1}^b \frac{\partial}{\partial z} \left( \int_0^i \Psi_k(i_k, x, z) di \right)_{\substack{i=const \\ z=const}};$$

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x - f_x;$$

$$m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} = F_z - m \cdot g - f_z,$$

where  $i_k$  – electromagnetic contour current;  
 $x$  – horizontal motion coordinate;  
 $z$  – vertical motion coordinate;  
 $\Psi_k$  – electromagnetic contour linkage;  
 $k$  – number of electromagnetic contour;  
 $b$  – number of electromagnetic contours;  
 $g$  – gravitational acceleration;  
 $m$  – weigh of levitated object;  
 $R$  – active resistance of contour;  
 $u_k$  – voltage applied to the electromagnetic contour;  
 $F_x$  – horizontal force generated by electromagnetic contour;  
 $F_z$  – vertical force generated by electromagnetic contour  
 $f_x$  – force of resistance to motion;  
 $f_z$  – disturbing action.

On the basis of mathematical model of traction and levitation system, its computer realisation in the graphical environment of imitation modelling Simulink has been developed. The computer model enables conducting modelling of dynamic regimes of the work.

The fig. 4 shows results of modelling of electromechanical processes in traction and levitation system. The oscillograms of instant values of phase currents in traction and levitation module windings, instant force values on the coordinates  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Phase currents are formed in such a way that the total lifting force produced by the phase contours provides levitation of the object, and the total traction force – the predetermined speed. The picture shows that when a disturbance on the coordinate  $y$  acts, a lateral displacement force  $F_y$  appears, which provides a course stabilisation of the moving object.

Based on the results of computer simulation of processes in the combined traction and suspension system, the main technical solutions were developed. For experimental verification of the concept, a full-featured physical model of the transport platform was made and experimental studies of the system were carried out.

The main purpose of the experiment was to test the possibility of combining the functions of levitation and traction. The similarity of the processes taking place in the physical model is ensured by the similarity of the configuration of the magnetic system of the model of the traction and levitation module made on a scale of 1:7, the identity of the topology of the schemes of power converters of the model and the object, the identity of the control algorithms with the structure of the control system. The transport platform is equipped with four traction and levitation modules.

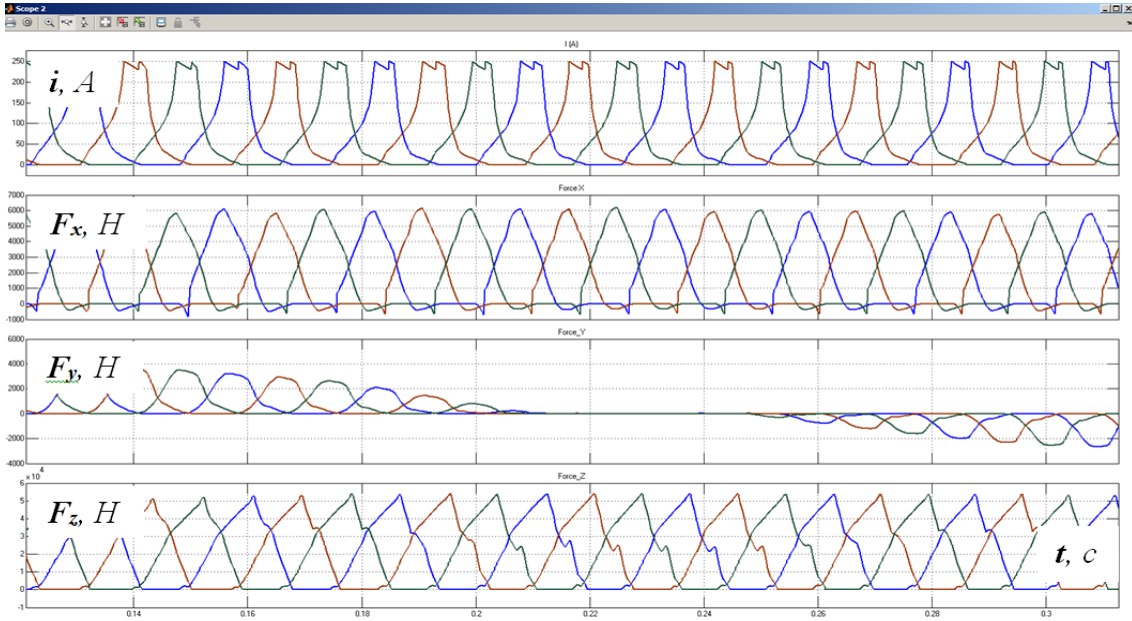


Fig. 4. Elektromechanical processes oscillograms in traction and levitation system

The fig. 5 shows functional scheme of the module. Windings  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  of the module  $A1$  are embedded into the power scheme of push–pull converter  $UZ1$ – $UZ3$ , which are powered by accumulator battery  $G1$ . The control system forms algorithms of commutation of power keys  $VT1$ ,  $VT2$ , converters  $UZ1$ – $UZ3$ , ensuring levitation of the object and its linear motion along the guideway.

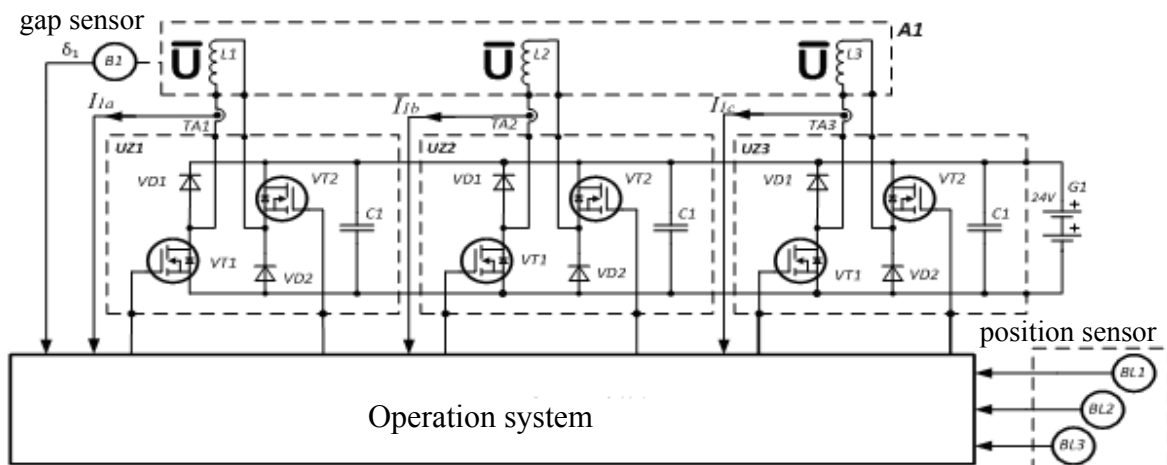


Fig. 5. Functional scheme of the module

The input of the control system receives signals proportional to the currents in the windings  $I_{a1}$ ,  $I_{b1}$ ,  $I_{c1}$  from the current sensors  $TA1$ – $TA3$ , the air gap  $\delta_1$  from the gap sensor  $B1$ , and also the logic signals fixing the position of the poles of the module magnetic system relative to the track elements from the block of position sensors  $BL1$ – $BL3$ .

In terms of construction, the traction and levitation module is fully autonomous and may be adapted to various construction forms of the transport platform.

The fig. 6 shows the general view of the physical model of the transport platform.



Fig. 6. General view of the physical model

The model has four traction and levitation modules, installed on the transport bogie; a platform on which electrical equipment is installed; additional technological platform on which cargo is installed during experiments.

During the experiments, the model was given a levitation regime. To achieve this, the windings of traction and levitation modules were supplied with DC, adjustable in magnitude as a function of the magnitude of the air gap between the module poles and the track elements. Further, the drive system was started, at which the currents in the phase windings were switched by the signals of the position sensors. The transport platform moved contactlessly along the track structure all this time.

The fig. 7 shows oscillograms of electromechanical processes during transition of traction and levitation system from levitation regime to levitated motion regime. The oscillograms show the phase currents of the modules  $I_{1a}-I_{4c}$ , the signals of the gap sensors  $\delta_1-\delta_4$ , the signals of the position sensors  $D_a, D_b, D_c$ .

The research of the physical model of the transport system has proved its working status [16].

After the research, the construction concept of freight magnetic levitation transport system was proposed for operation in poorly developed areas. The proposed MLTS should have passive guideway structure of flyover type and coupled stock consisting of autonomous platforms for carrying containers. Each

platform is equipped with easily-dismounted traction and levitation modules and electric and chemical energy accumulators. Power supply of the rolling stock may be carried out both from autonomous power plants and contact network. The fig. 8 shows cross-sectional view of the transport platform.

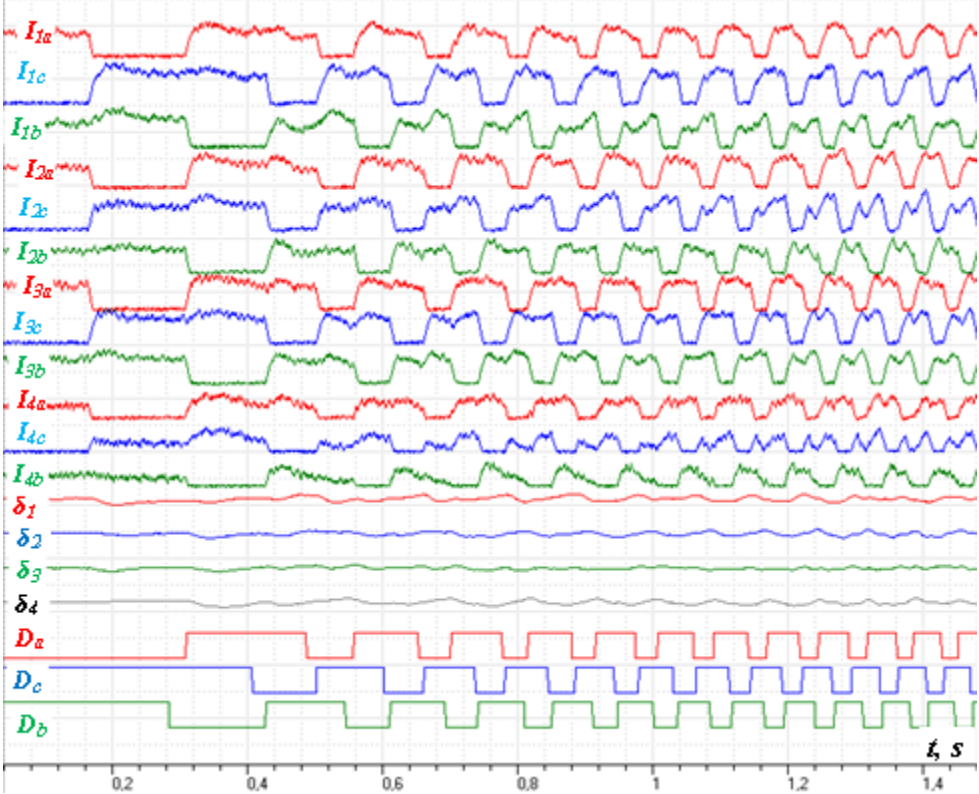


Fig. 7. Electromechanical processes oscillograms

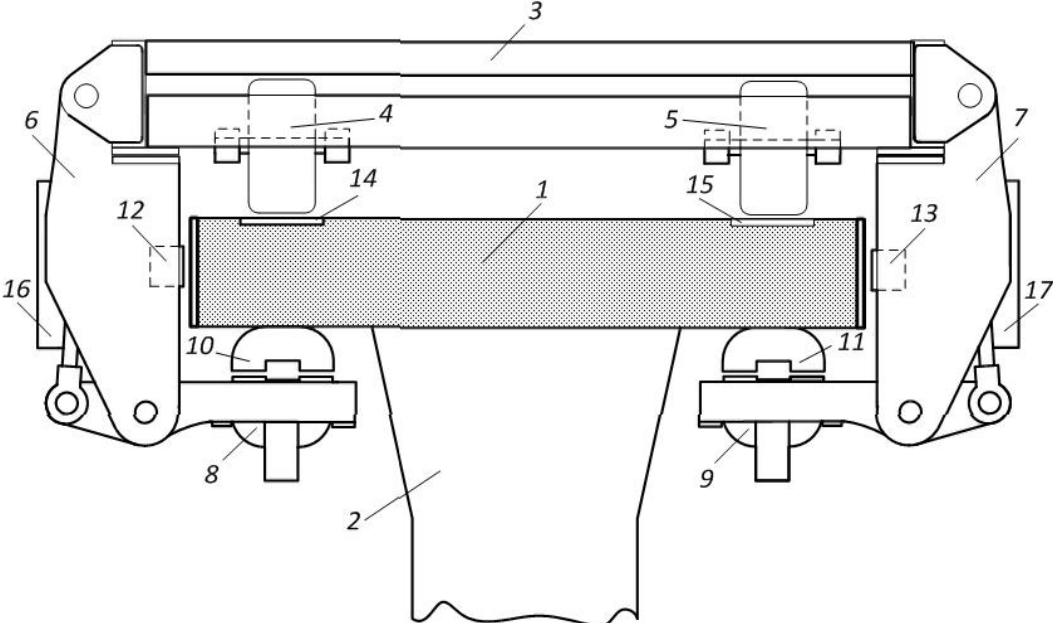


Fig. 8. Cross-sectional view of the transport platform

The fig. 8 shows: guideway 1, resting on support 2; transport platform 3, equipped with wheel blocks 4 and 5 for moving platform along the guideway; transfer units 6 and 7, connecting stators of linear motors 8 and 9 and transport platform 3; rotor elements 10 and 11, installed in a row on the guideway 1 with the step equaling pole pitch of linear motor; rollers 12, 13 limiting lateral displacement of the platform. The surface of the guideway 1 has steel plates 14, 15 which serves as the groove for wheels 4 and 5 of the platform 3.

When current pulses are directed to the windings of the stators of linear motors from the converter devices 16, 17, a force interaction of the U-shaped magnetic circuits of the stator and the rotor occurs via an adjustable air gap. A traction, lifting and lateral stabilising force is created, which is transmitted through the transfer units to the transport platform. This ensures a non-contact motion of the transport platform along the track structure.

A container train consisting of the 22 transport platforms described above with a total mass of 1,800 tonnes can transport 43 units of a 40-pound container at a speed of 180 km / h. The speed of motion of container cargo is not less than 3600 km / day. To realise the designed annual volume of transit container traffic of 1.52 million TEU, it is necessary that container trains follow with an interval of approximately 0.5 hours (49 container trains per day). At the same time, 156 container trains must be simultaneously on the line in both directions. The park of transport platforms should be 3432 units (excluding reserve).

Thus, the proposed concept of constructing a high-speed container train is physically feasible and provides the forecasted annual volume of transit container traffic.

#### **4. Assessment of efficiency of investment project**

The assessment of the efficiency of the investment project was carried out in accordance with the Methodological Recommendations of the Russian Federation. The horizon of project planning is 40 years. The cash flows of projects form the following items of costs: investment costs; operating costs; payments on property tax.

As the main indicators used to calculate the effectiveness of the investment project, the following ones are selected: net income; net present value; internal rate of return; profitability index; index of profitability of discounted investments; payback period.

The annual economic effect is defined as the difference between the cash flows of the corresponding year of the project with the electric locomotive EP20 [17] and the MLTS project with its subsequent discounting.

Indicators of MLTS project are shown in the table 2.

Table 2

Indicator	Value
Net income, million rubles	264 524,4
Net present value, million rubles	7 555,6
Internal rate of return, %	10
Profitability index	2,33
Индекс доходности дисконтированных инвестиций	1,04
Payback period, years	10,1
Discounted payback period, years	26,03

The calculated values of the key performance indicators allow us to conclude that the proposed MLTS project for container transportation is effective. Despite the large amount of initial investment associated with more substantial investments in the MLTS track infrastructure, a significant saving in operating costs leads the project to a positive economic result.

The calculations did not take into account the additional cash flows for the operator associated with the tariff component (from the growth of the productivity ratio), as well as the social aspects of the implementation of this project for the regions of the country in which the project will be implemented. Taking into account such multiplicative effect, the economic feasibility and attractiveness of the project is substantially increased.

## Conclusion

The development of the transport infrastructure of the Russian Federation is connected with the geographical location of the country as a natural transport corridor connecting the European and Asian-Pacific regions. The creation of a high-speed Euro-Asian transport system complies with the directive documents relating to the transport strategy of the Russian Federation for developing the potential of Euro-Asian transport links and transit freight.

The transport system can be implemented on the basis of modern magnetic levitation technology, which allows significant reducing operating costs, and, consequently, transport costs, due to contactless running of the transport platform along the track structure.

The new transport system will facilitate the release of the capacity of railways for freight transport, the direct transfer of cargo between Europe and Asia, and, if properly routed, will ensure the availability of transport services for the transportation of goods in the Far North, Siberia, the Far East and remote regions of Russia.

## References

1. Vladimirov S.A. *Regional economy and management [Regional'naya ekonomika i upravlenie]*, 2016, no. 2 (46). Available at: <http://eee-region.ru/article/4602> (accessed 10.04.2017).
2. Yuyama Y. The Tobu Kyuryo Line (Popular name: Linimo) a Magnetic Levitation System. *The 18th Int. Conf. Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, 26–28 Oct. 2004, Shanghai, China. Available at: [http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2004/topic2/IMT\\_CP\\_M2004\\_T2\\_6.pdf](http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2004/topic2/IMT_CP_M2004_T2_6.pdf) (accessed 10.04.2017).
3. Shanghai Maglev Transrapid Technology. Presentation Siemens AG, 2007. Available at: <http://www.ft.dk/samling/20061/almdel/tru/bilag/361/363482.pdf> (accessed 27.09.2017).
4. Maglev for Urban Transit. Available at: <http://www.discovery.org/scripts/viewDB/filesDB-download.php?command=download&id=950> (accessed 27.09.2017).
5. Wiegand D. *The Int. Maglevboard*. Munich, 2010, pp. 237–245.
6. Superconducting Maglev the World's Fastest Train – Coming to America. Website Company USJMAGLEV 2012. Available at: <http://www.usjmaglev.com/usjmaglev/Home.html> (accessed 10.04.2017).
7. Powell J., Jordan J., Danby G. *The Fight for Maglev: Making America the World Leader in 21st Century Transport*. USA, Create Space, 2012, 402 p.
8. James K. Maglev Freight Conveyor Systems. Available at: [http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2008/topic1/IMT\\_CP\\_M2008\\_T1\\_5.pdf](http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2008/topic1/IMT_CP_M2008_T1_5.pdf) (accessed 10.04.2017)
9. General Atomics. Maglev Technologies. Website Company General Atomics (GA). Available at: <http://www.ga.com/urban-maglev> (accessed 10.04.2017).
10. Antonov Y.F., Zaitsev A.A., Morozova E.I., Khozikov Yu.F. Mag-TransCity technology within the Saint Petersburg Maglev Train Project. *Notice of the Petersburg State Transp. Univ.*, 2013, Is. 4, pp. 5–17.
11. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030. Available at: [http://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION\\_ID=2203#document\\_19188](http://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION_ID=2203#document_19188) (accessed 10.04.2017)
12. Tennenbaum J. *The New Eurasian Land-Bridge Infrastructure Takes Shape*, 2001. Available at: [http://www.larouchepub.com/eiw/public/2001/eirv28n42-20011102/eirv28n42-20011102\\_016-the\\_new\\_eurasian\\_land\\_bridge\\_inf.pdf](http://www.larouchepub.com/eiw/public/2001/eirv28n42-20011102/eirv28n42-20011102_016-the_new_eurasian_land_bridge_inf.pdf) (accessed 01.09.2017).
13. The Euro-Asian Transport Links (EATL) project. Available at: <http://www.unece.org/trans/main/eatl.htm> (accessed 10.04.2017).
14. Rarovskiy P.E. *Russian Foreign Econ. Bull.* 2016, no 5, pp. 116–131, Available at: <http://www.rfej.ru/rvv/id/0003F43CB> (accessed 27.09.2017).



15. Kopylenko V.A., Bykov Yu.A., Turbin I.V., Kosmin V.V. *Sci. and Transp. Modernization of Transport Russian Federation*, 2008, no. 4, pp. 4–7.
16. Kireev A.V., Kononov G.N., Lebedev A.V. *Int. J. Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 2017, no. 8 (1):176, pp. 176–183.
17. Parkhomenko A. *Railvolution The Prof. Two-Monthly Magazine of Rail Transp. Worldwide*, vol. 12, no. 4/12, pp. 85–92. Available at: <https://library.e.abb.com/public/175cd263dc51cad2c1257a860040bcd2/Railvolution04-12-ABB-Traction-transformers-EP20.pdf> (accessed 10.04.2017).

**Information about the authors:**

Alexander V. KIREEV, Cand. Sci. (Eng), Associate Prof., General Director.

E-mail: akireev@privod-n.ru

Nikolay M. KOZHEMYAKA, Cand. Sci. (Eng), Technical Director.

E-mail: nkozhemiyaka@privod-n.ru

Gennadiy N. KONONOV, Lead. Specialist.

E-mail: gkononov@privod-n.ru

Closed Joint-Stock Co. “Scientific-Technical Centre PRIVOD-N”, Novocherkassk

© Kireev A. V., Kozhemyaka N. M.,  
Kononov G. N., 2017

Ж. Т. Эрдынеев, А. А. Гельцер, Е. П. Великанова, Н. В. Панокин

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЧАСТОТНОГО МАСШТАБИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В МАЛОГАБАРИТНЫХ ПОДВИЖНЫХ ПЛАТФОРМАХ

Дата поступления 22.09.2017

Решение о публикации 26.10.2017

**Введение.** С развитием аппаратных и вычислительных систем, позволяющих улучшить качественные характеристики радаров с синтезированием апертуры при их ограниченных габаритах, появилось множество новых систем, благодаря которым можно использовать более доступные и распространенные подвижные платформы, такие как автомобили, квадрокоптеры, беспилотные летательные аппараты.

**Постановка проблемы.** Из-за новых типов платформ возникают дополнительные искажения, связанные с особенностями геометрических параметров работы радара и с более сильными траекторными нестабильностями. Таким образом, к новым системам радаров с синтезированием апертуры должны предъявляться особые требования к программной и к аппаратной частям, которые отличаются от классических систем.

**Цель.** Сравнить алгоритмы, которые используются в современных системах радиовидения для получения качественных радиолокационных изображений и которые могут интегрироваться в подвижные платформы.

**Методы.** В качестве базового алгоритма взят метод частотного масштабирования и его модификации, включая дополнительные алгоритмы компенсации траекторных нестабильностей. Для сравнения алгоритмов рассмотрены геометрические параметры работы системы для автомобильных и самолетных систем и проведено имитационное моделирование с точечными отражателями при разных показателях дальности и характере движения платформы.

**Результаты.** Показано различие рассматриваемых алгоритмов на примере блок-схем и математических формул. Согласно результатам моделирования, использование базового алгоритма частотного масштабирования на расстояниях, соответствующих геометрическим параметрам работы автомобильной системы, приводит к искажению отклика вдоль азимута. Кроме того, модифицированный алгоритм компенсации траекторных искажений позволяет корректно сфокусировать цели на разной дальности.

**Заключение.** Предлагаемая комбинация модифицированных алгоритмов траекторных искажений и частотного масштабирования позволяет равномерно сфокусировать изображение по всему кадру и улучшить качество изображения в ближней зоне.

Автомобиль, БПЛА, радиовидение, РЛИ, PCA, FMCW, FSA.

## Введение

С развитием аппаратных и вычислительных систем, позволяющих улучшить качественные характеристики радаров с синтезированием апертуры (РСА) при их ограниченных габаритах, появилось множество новых систем РСА [1–7], благодаря которым можно использовать более доступные и распространенные подвижные платформы, такие как автомобили, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), квадрокоптеры, чем самолеты и спутники. Масштаб задач, которые могут быть решены благодаря таким системам, колоссален [8]. Автомобили смогут формировать радиолокационное изображение (РЛИ) бокового пространства за счет скорости автомобиля, используя только одну антенную систему, что уменьшает требования к габаритам устройства [4, 5].

К новым системам РСА должны предъявляться особые требования как к программной, так и к аппаратной частям, которые отличаются от классических систем. В примерах наработок алгоритмов и готовых реализаций для малогабаритных систем РСА можно выделить использование непрерывного ЛЧМ-сигнала (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW), алгоритмов компенсации траекторных искажений и методов частотного масштабирования (Frequency Scaling Algorithm, FSA) [9–13]. Использование FMCW действительно позволяет работать в ближней зоне, а также уменьшать требования к архитектуре цифровой обработки [6], в то же время среди методов частотного масштабирования [12, 13] есть модификации, где используются разные формулы. В данной статье поставлены следующие задачи:

- сравнить алгоритм FSA из статьи [12] с модифицированным алгоритмом FSA из статьи [13] (далее FSA-M);
- применить алгоритм компенсации траекторного искажения из статьи [12] для алгоритмов FSA и FSA-M и сравнить характеристики полученных радиолокационных изображений;
- сравнить характеристики РЛИ при различных наклонных дальностях и азимутальных положениях точечных отражателей для выявления различных геометрических искажений.

В первой части статьи представлена геометрия работы РСА при использовании беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и автомобиля в качестве платформы-носителя. Показаны особенности и различия между ними. Во второй части кратко приводится алгоритм обработки FSA и модифицированного FSA-M. В третьей части даны результаты обработки сигналов, полученных при моделировании работы РСА различными методами сжатия и компенсации радиолокационного изображения. В конце приведены выводы по полученным результатам.

## 1. Геометрия работы РСА

Предварительно необходимо задать начальные условия, а для этого рассмотрим принцип и геометрию работы радара с синтезированием апертуры, выведем формулу, соответствующую принятому сигналу после перемножения с опорным сигналом.

Предположим, что зондирующий сигнал  $s_t(t)$  излучается в момент времени  $\tau$ , при котором дальность равна  $R(\tau)$  и возвращается обратно в приемное устройство в момент времени  $\tau + \tau_d$ , пройдя расстояние  $R(\tau + \tau_d)$ . Таким образом, задержку двойного распространения сигнала можно выразить как

$$\tau_d = \frac{R(\tau) + R(\tau + \tau_d)}{c}, \quad (1)$$

где  $R(\tau + \tau_d) = \sqrt{R_0^2 + v^2 \cdot (\tau + \tau_d - \tau_0)^2}$ ;

$c$  – скорость света;

$v$  – скорость движения платформы.

Упрощаем формулу (1) через квадратное уравнение, ограничиваясь квадратичными членами разложения, и получаем следующую формулу значения задержки:

$$\tau_d(\tau) = \frac{2 \left( \frac{R(\tau)}{c} + \frac{v^2}{c^2} (\tau - \tau_0) \right)}{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (2)$$

С учетом формулы (2) и использования сигнала с линейной частотной модуляцией принятый сигнал можно выразить следующим образом:

$$s_r(t, \tau) = \sigma(\tau_0, r_0) \cdot s_t(t - \tau_d(\tau)) \cdot \exp[j2\pi f_0(t - \tau_d(\tau))],$$

где  $\sigma(\tau_0, r_0)$  – эффективная площадь рассеяния цели с соответствующими координатами;

$f_0$  – частота несущего колебания;

$s_t(t) = \exp(j\pi K_r t^2)$  – сигнал с линейной частотной модуляцией, где  $K_r$  – скорость изменения частоты, которая рассчитывается как  $\Delta F / T$ , где  $\Delta F$  – полоса сигнала;

$T$  – длительность одного импульса (период излучения импульса).

Когда используется FMCW, принятый сигнал перемножается с опорным комплексно-сопряженным сигналом:

$$s_{ref}(t) = s_t^*(t) \cdot \exp(j2\pi f_0 t).$$

После перемножения с комплексно-сопряженным сигналом получим сигнал следующего вида:

$$s_b(t, \tau) = \sigma(\tau_0, r_0) \cdot \exp[-j2\pi K_r \tau_d(\tau) \cdot t] \times \exp[-j2\pi f_0 \tau_d(\tau)] \cdot \exp[-j2\pi K_r \tau_d^2(\tau)]. \quad (3)$$

Разберем подробнее формулу (3). Первая экспонента формирует гармонический сигнал с частотой, соответствующей произведению задержки  $\tau_d(\tau)$  и скорости изменения частоты  $K_r$  и таким образом отвечает за *положение цели по дальности*. Вторая экспонента формирует доплеровский спектр вдоль азимута, и по нему можно определить *положение цели по азимуту*. Третья экспонента называется остаточной видеофазой и в большинстве случаев компенсируется за ненадобностью [14].

Рассмотрим разницу между БПЛА и автомобилем в качестве платформы для синтезирования апертуры. Для демонстрации разницы в геометрии работы РСА на автомобильной и самолетной платформе приведен рис. 1. Допустим, параметры антенной системы и высота полета для самолетной платформы составляют величины, приведенные в табл. 1.

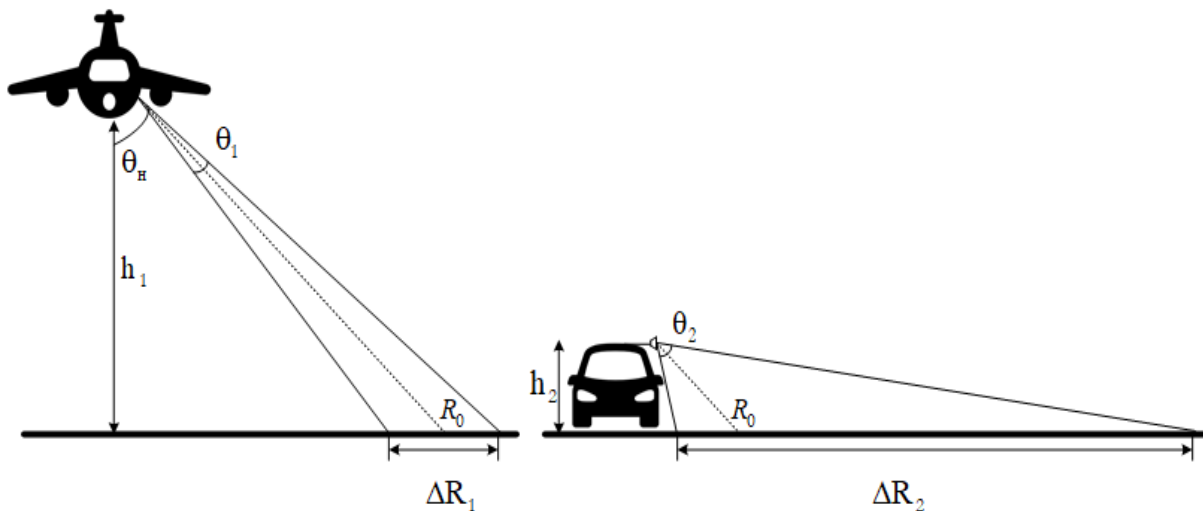


Рис. 1. Геометрия работы РСА для самолетной и автомобильной платформы

Таблица 1

**Геометрические параметры самолетного и автомобильного РСА**

Параметр	Значение
Угол наклона антенной системы, $\theta_n$ , град	45°
Ширины диаграммы направленности антенны по азимуту, $\theta$ , град	15°
Ширины диаграммы направленности антенны по углу места, $\theta_1$ , град	15°
Высота самолетной платформы, $h_1$ , м	1000
Высота автомобильной платформы, $h_2$ , м	2

Если рассчитать ширину обзора вдоль дальности через угол наклона антенны и ширину ДН по углу места, то получится следующее:

$$\Delta R_1 = (h_1 / \cos(\theta_n + \theta_1 / 2)) - (h_1 / \cos(\theta_n - \theta_1 / 2)) = 382 \text{ м.}$$

Рассчитать длину синтезирования апертуры можно по формуле

$$L_s = 2 \cdot R_0 \cdot \tan(\theta / 2) = 372 \text{ м.}$$

Как видно, размеры зон по обеим координатам соизмеримы, что удобно для представления конечного радиолокационного изображения. Если оставить параметры антенной системы такими же, но при этом расположить ее на автомобильной платформе высотой  $h_2 = 2$  м, то ширина обзора будет  $\Delta R_2 = 0,76$  м. В результате на конечном изображении размер изображения по дальности составит всего 0,76 м, что совсем непрактично для данной системы.

Поэтому необходимо использовать антенную систему с более широкой диаграммой направленности по углу места при использовании автомобильной платформы или той, которая предполагает малую высоту синтезирования антенны. К примеру, если взять антенну с шириной ДН по углу  $\theta_2 = 80^\circ$ , то  $\Delta R_2 = 21$  м. В некоторых случаях антенную систему располагают выше за счет дополнительных креплений, как, например, в [5, 7], что неудивительно, если надо получить данные с дальних зон.

Теперь, когда сформирована математическая модель принимаемого сигнала и геометрические особенности работы, проведем имитационное моделирование работы РСА и обработку данных алгоритмами FSA и FSA-M при наличии точечного отражателя для сравнения параметров:

- разрешающей способности (РС) по дальности и азимуту;
- отношения уровня боковых лепестков (УБЛ) к главному;
- интегрального отношения УБЛ к главному.

## 2. Алгоритмы обработки

Как уже говорилось, в качестве алгоритма обработки возьмем две реализации алгоритма FSA, блок-схемы которых приведены на рис. 2 [12, 13].

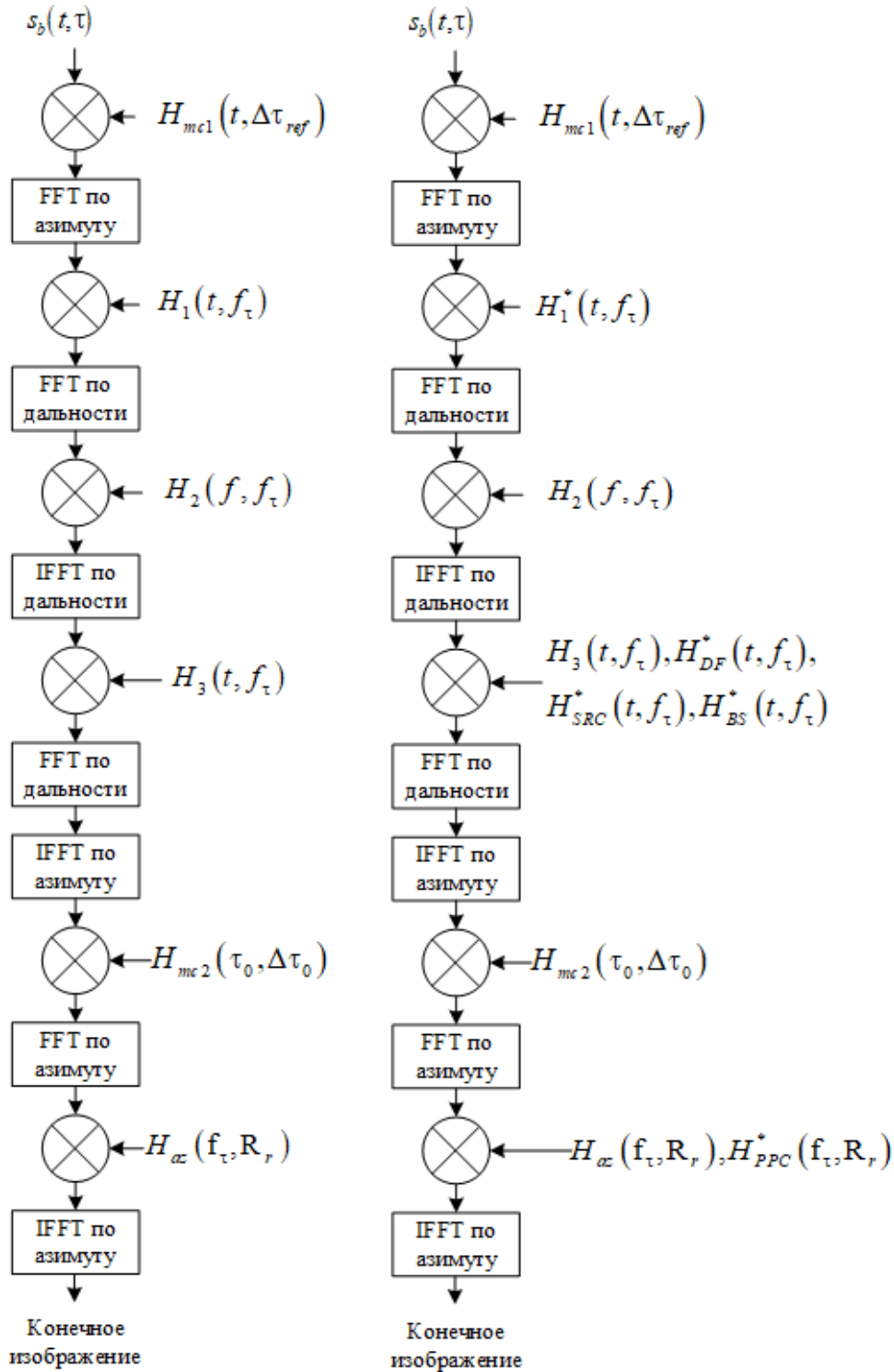


Рис. 2. Блок-схема алгоритмов FSA (слева) и FSA-M (справа)

Полная информация об этапах обработки и формулы опорных сигналов приведены в источниках [12, 13]. Ниже отметим формулы, которые используются либо для одной модификации, либо для компенсации траекторных нестабильностей, которая также была рассмотрена в рамках только одной модификации.

Главной особенностью алгоритмов с частотным масштабированием является то, что миграцию по дальности для разных целей можно компенсировать без интерполяции путем простых перемножений. Это преимущество делает данный алгоритм более привлекательным для интеграции в блок обработки сигналов, так как операции перемножения реализовать проще, чем операции с интерполяцией.

Входными данными алгоритма является массив сигналов с выхода перемножителя, согласно формуле (3).

Алгоритм FSA включает в себя серии преобразований Фурье и фазовые перемножения. Если отбросить этапы компенсации собственного движения платформы, то ключевые различия между алгоритмами выражены следующими формулами.

Функция частотного масштабирования для FSA, которая убирает доплеровские сдвиги:

$$H_1(t, f_\tau) = \exp\left(-j \cdot \left(2\pi \cdot f_\tau \cdot t + \pi \cdot K_r \cdot t^2 (1 - D(f_\tau, v))\right)\right),$$

где  $D(f_\tau, v) = \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot f_\tau^2 / 4v^2}$ ;

$\lambda$  – длина волны;

$f_\tau$  – частота азимутальной сетки.

Формула для модифицированного алгоритма FSA-M:

$$H_1^*(t, f_\tau) = \exp\left(-j \cdot \pi \cdot K_r \cdot t^2 (1 - D(f_\tau, v))\right).$$

В модифицированном алгоритме после обратного преобразования Фурье происходит перемножение с еще тремя функциями:

1) коррекции доплеровского фактора:

$$H_{DFC}^*(t, f_\tau) = \exp\left(-j \cdot 2\pi \cdot f_\tau \cdot D(f_\tau, v) \cdot t\right);$$

2) сжатия по дальности второго порядка:

$$H_{SRC}^*(t, f_\tau) =$$



$$= \exp \left( -j \frac{2\pi \cdot R_{ref} \cdot K_r^2 \cdot \lambda}{c^2} \cdot \frac{(D^2(f_\tau, \nu) - 1)}{D^3(f_\tau, \nu)} \cdot \left( D(f_\tau, \nu) \cdot t - \frac{2 \cdot R_{ref}}{c} \right)^2 \right) \cdot \exp \left( -j \frac{2\pi \cdot R_{ref} \cdot K_r^3 \cdot \lambda^3}{c^3} \cdot \frac{(D^2(f_\tau, \nu) - 1)}{D^5(f_\tau, \nu)} \cdot \left( D(f_\tau, \nu) \cdot t - \frac{2 \cdot R_{ref}}{c} \right)^3 \right);$$

3) функция группового сдвига фаз:

$$H_{BS}^*(t, f_\tau) = \exp \left( j \cdot \frac{4\pi \cdot K_r}{c} \cdot R_{ref} \cdot \left( \frac{1}{D(f_\tau, \nu)} - 1 \right) \left( D(f_\tau, \nu) \cdot t - \frac{2 \cdot R_{ref}}{c} \right) \right),$$

где  $R_{ref}$  – опорная дальность.

На последнем этапе происходит перемножение с функцией сохранения фазы:

$$H_{PPC}^*(f_\tau, f_r) = \exp \left( j \frac{4\pi \cdot R_{ref}}{c} \frac{f_r}{D(f_\tau, \nu)} \right),$$

где  $f_r$  – частотная сетка по дальности.

Рассмотрим особенности компенсации собственного движения радара. Алгоритмы, рассмотренные выше, учитывали только равномерное прямолинейное движение. В реальной ситуации платформа будет неоднократно отклоняться от своей номинальной траектории, что существенно ухудшит качество радиолокационного изображения.

На основе [12, 15] предлагается следующий алгоритм компенсации собственного движения. Принятый сигнал  $s_b(t, \tau)$  перемножается с функцией следующего вида:

$$H_{mcl}(t, \Delta\tau_{ref}) = \exp \left( -j \left( \begin{array}{l} \omega_0 \cdot \Delta\tau_{ref} + 2\pi \cdot K_r \cdot t \cdot \Delta\tau_{ref} - \\ -\pi \cdot K_r \cdot (2 \cdot \tau_{ref} \cdot \Delta\tau_{ref} - \Delta\tau_{ref}^2) \end{array} \right) \right), \quad (4)$$

где  $\Delta\tau_{ref} = 2 \cdot \Delta R_{ref} / c$ ;  $\Delta R_{ref} = R_{actual} - R_{ideal}$ , где  $R_{actual}$  – наклонная дальность от платформы до точечной цели с учетом известных отклонений при движении платформы;

$R_{ideal}$  – идеальная траектория движения платформы для того же положения точечной цели.

Следующий этап выполняет дифференцированную коррекцию после сжатия по дальности, где информация о позиции усредняется вдоль всего импульса. Это утверждение опирается на факт, что когда данные сжимаются по дальности, каждая ячейка по дальности формируется из данных, которые распределяются вдоль всего импульса. Корректирующая функция рассчитывается для каждой ячейки по дальности:

$$H_{mc2}(\tau_r, \Delta\tau_r) = \exp \left( j \begin{pmatrix} -\omega_0 \cdot \Delta\tau_r + 2\pi \cdot K_r \cdot \tau_r \cdot \Delta\tau_r - \pi \cdot K_r \cdot \Delta\tau_0^2 + \\ +\omega_0 \cdot \Delta\tau_r - 2\pi \cdot K_r \cdot \tau_r \cdot \Delta\tau_r + \pi \cdot K_r \cdot \Delta\tau_{ref}^2 \end{pmatrix} \right) \quad (5)$$

Представленная методика схожа с традиционной компенсацией движения, но при этом обладает рядом преимуществ. Во-первых, здесь учитывается движение во время излучения, что очень важно для модуляции с непрерывным ЛЧМ. Во-вторых, коррекция здесь происходит без использования интерполяции.

Теперь выполним имитационное моделирование с параметрами, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры моделирования**

Параметр	Значение
Тип модуляции сигнала	ЛЧМ
Скорость движения платформы	100 км/ч
Частота несущего колебания	10 ГГц
Длительность импульса	1 мс
Полоса перестройки ЛЧМ	50 МГц
Координаты целей, [дальность, м; азимут, м]	[650; 0], [20; 0], [300; 0], [100; 0]

Сравним алгоритмы с разными модификациями в такой последовательности:

- 1) РЛИ цели на 650 м, полученное методами FSA и FSA-M с идеальной траекторной коррекцией;
- 2) РЛИ цели на 20 м, полученное методами FSA и FSA-M с идеальной траекторной коррекцией;
- 3) РЛИ двух целей на 100 м и 300 м, полученное методами FSA и FSA-M с грубой траекторной коррекцией, где 100 м – опорная дальность;
- 4) РЛИ двух целей на 100 м и 300 м, полученное методами FSA и FSA-M с предлагаемой траекторной коррекцией, где 100 м – опорная дальность.

### 3. Моделирование. Результаты обработки

Результаты моделирования первых двух пунктов показаны на рис. 3–6 и в табл. 3.

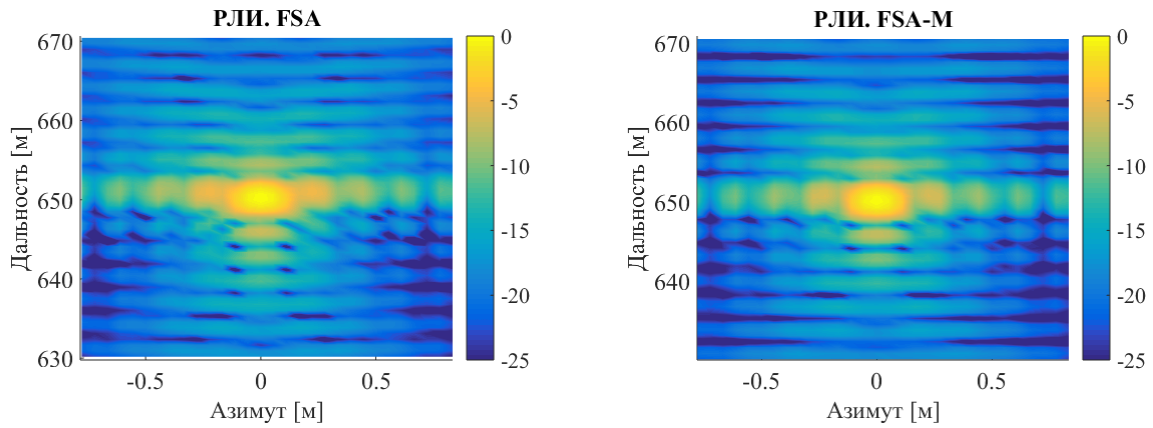


Рис. 3. Радиолокационное изображение точечной цели, полученной методами FSA (слева) и FSA-M (справа) при дальности 650 м

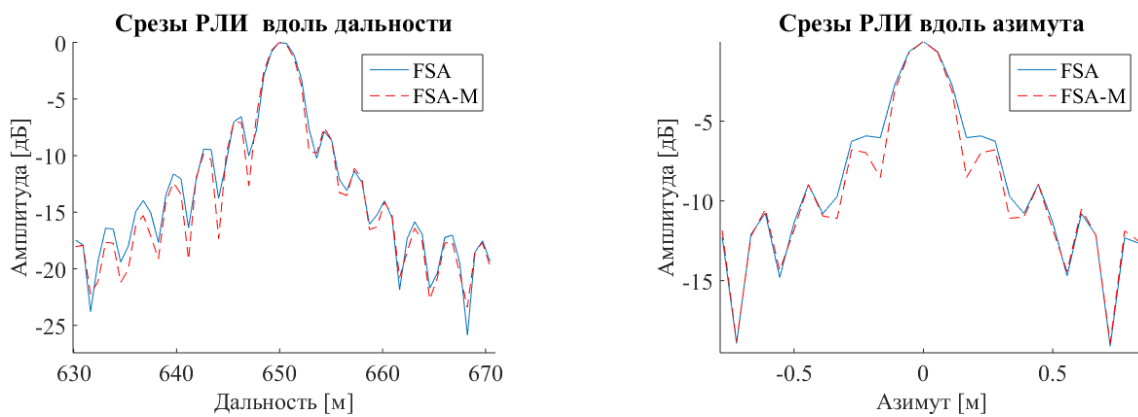


Рис. 4. Срезы РЛИ точечной цели (дальность 650 м) вдоль дальности (слева) и азимута (справа) для методов FSA и FSA-M

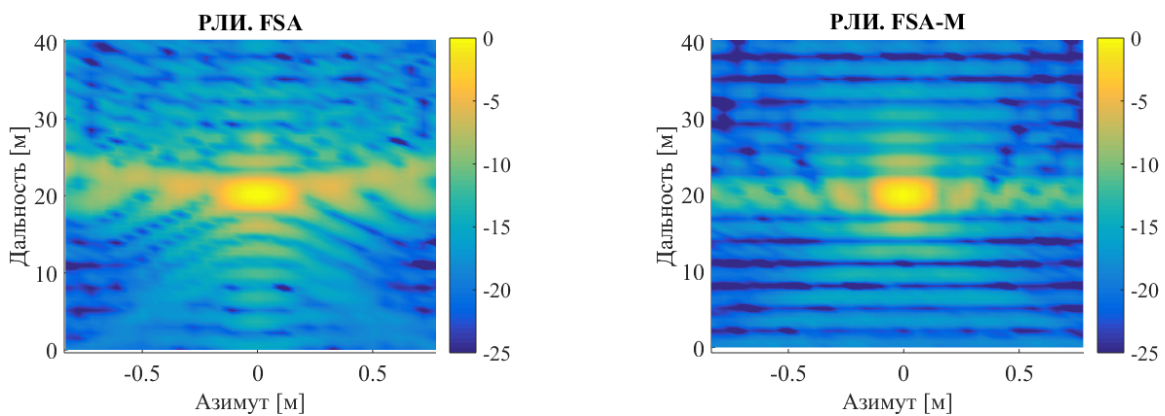


Рис. 5. Радиолокационное изображение точечной цели, полученной методами FSA (слева) и FSA-M (справа) при дальности 20 м

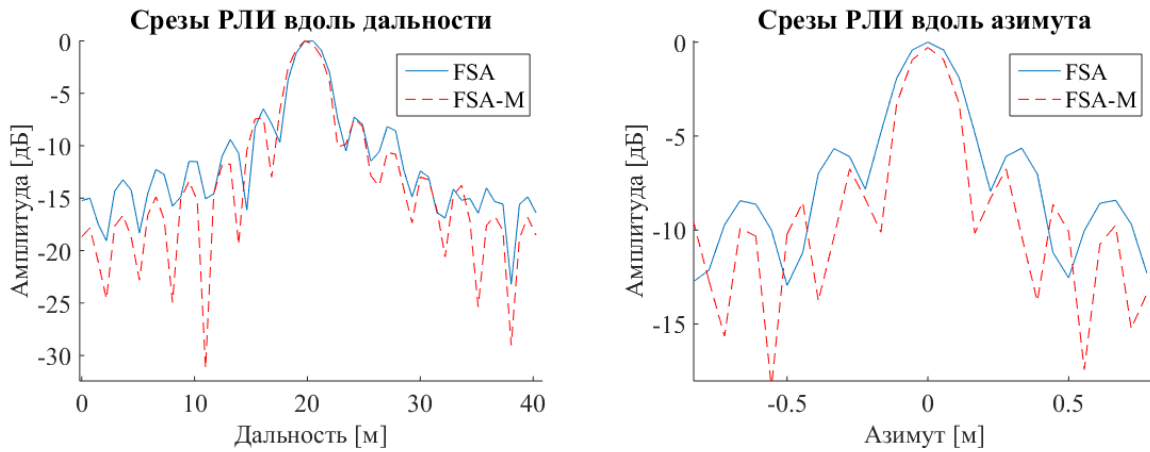


Рис. 6. Срезы РЛИ точечной цели (дальность 20 м) вдоль дальности (слева) и азимута (справа) для методов FSA и FSA-M

Таблица 3

**Характеристики РЛИ, полученных методами FSA, FSA-M при имитационном моделировании целей дальности на 650 м и 20 м**

Характеристика	FSA	FSA-M	FSA	FSA-M
Дальность, м	650		20	
РС по дальности	3,6	3,58	3,5	3,6
РС по азимуту	0,23	0,22	0,27	0,21
УБЛ по дальности	-7,2	-7,2	-7	-7,4
УБЛ по азимуту	-5,9	-6,8	-5,7	-6,9
Интегральный УБЛ по дальности	5,1	5,5	4	5,6
Интегральный УБЛ по азимуту	1,4	1,6	1	1,5

При анализе траекторной нестабильности было введено синусоидальное искажение в движение платформы вдоль дальности. Оно представлено на рис. 7. Соответственно, в каждом  $i$ -м импульсе произойдет фазовый сдвиг, соответствующий значению  $\exp(-j \cdot 4 \cdot \pi i \cdot R(i)/\lambda)$ . С учетом того, что траектория известна, сравним два подхода для устранения соответствующих фазовых искажений. Первый случай – классический, для него используется формула (4), для второго (модифицированного) – формулы (4) и (5). Отметим, что в качестве опорной была выбрана дальность 100 м. На рис. 8–11 и в табл. 4, 5 показаны результаты моделирования.

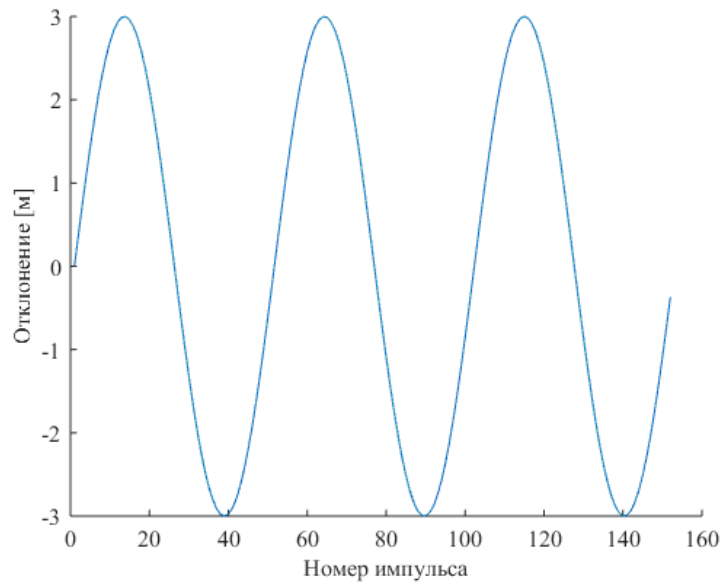


Рис. 7. Траекторная нестабильность платформы

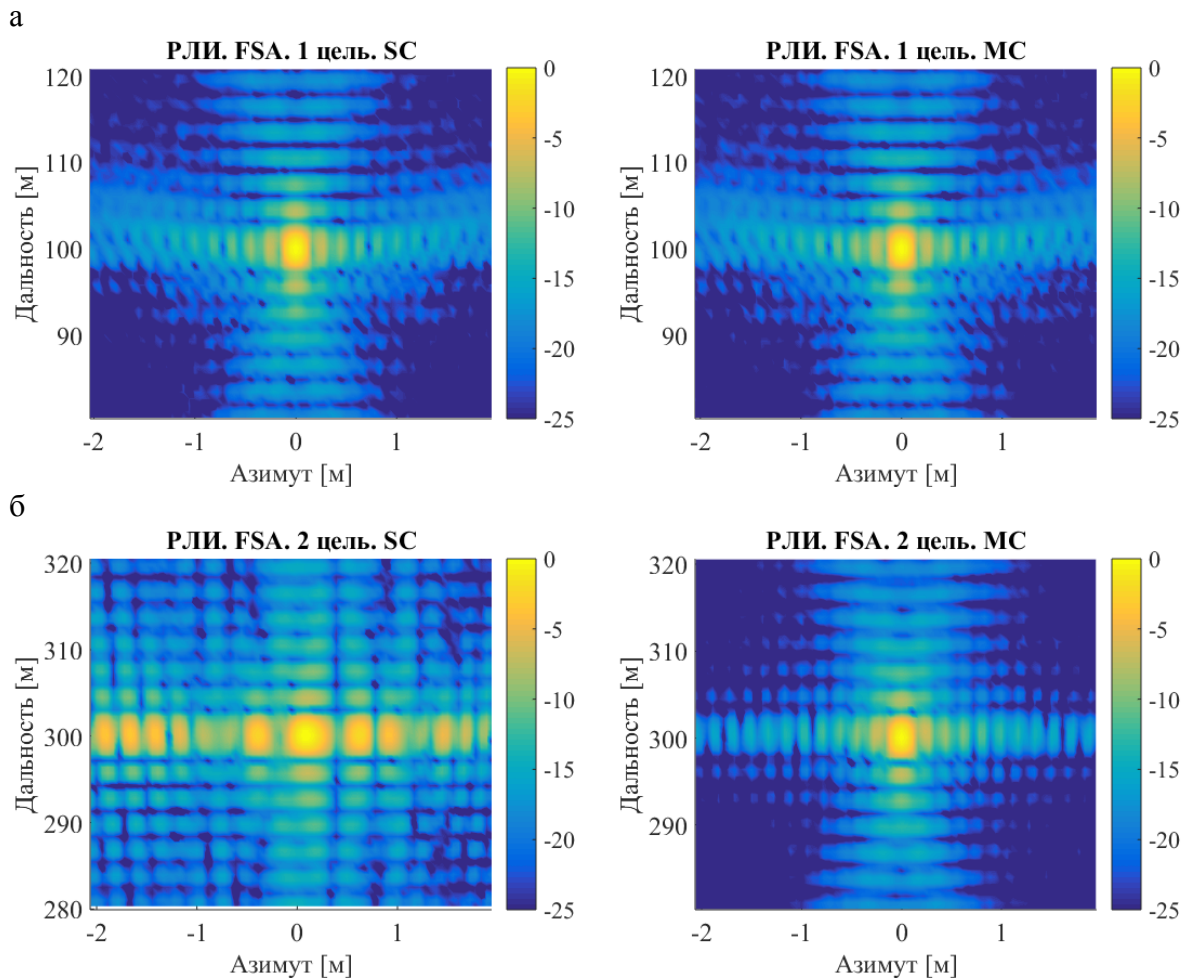


Рис. 8. Радиолокационные изображения точечных целей, полученные методом FSA, находящихся на позициях по дальности 100 м (а), 300 м (б), и полученные классическим (слева) и модифицированным (справа) методом компенсации траекторных искажений

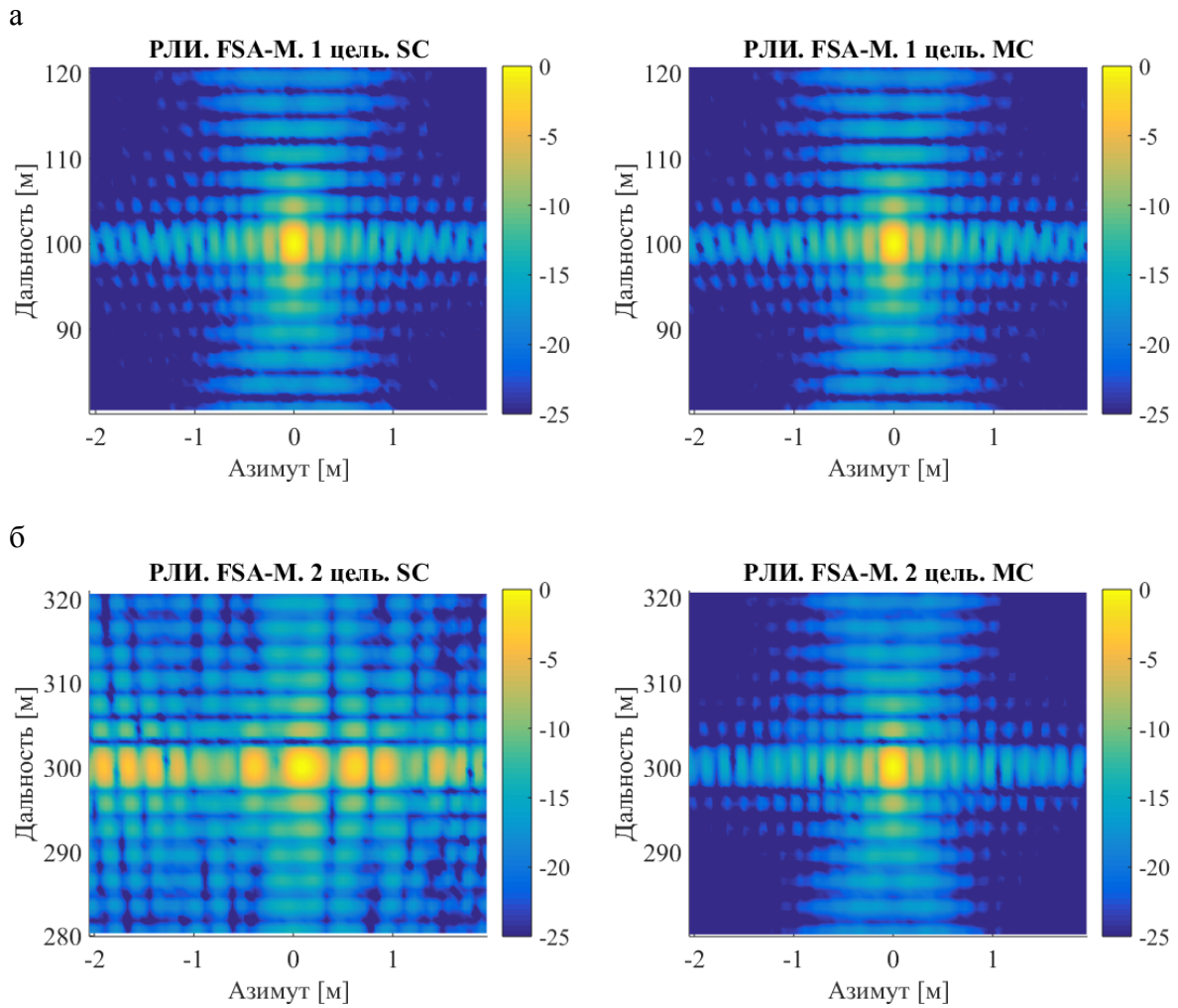


Рис. 9. Радиолокационные изображения точечных целей, полученные методом FSA-M, находящихся на позициях по дальности 100 м (а), 300 м (б), и полученные классическим (слева) и модифицированным (справа) методом компенсации траекторных искажений

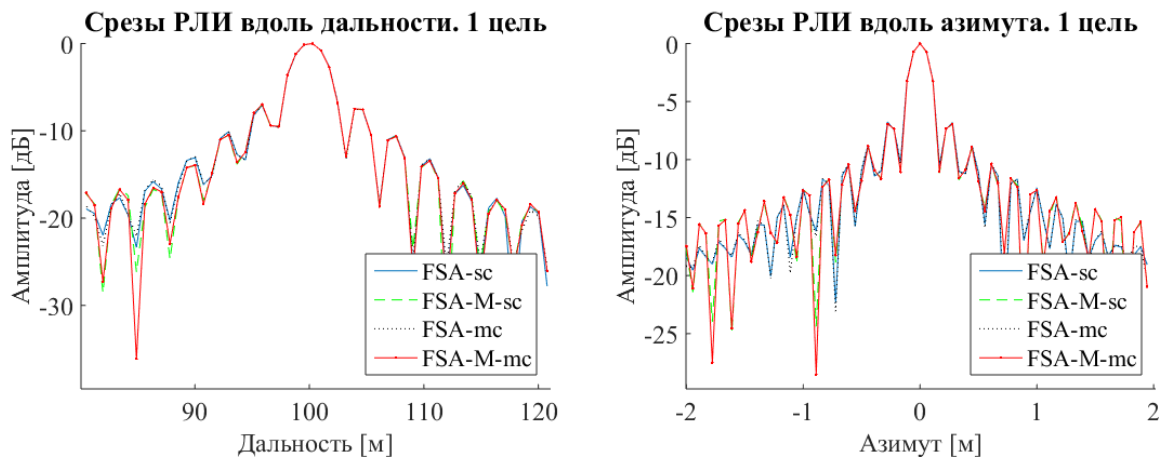


Рис. 10. Срезы РЛИ точечной цели (дальность 100 м), полученные методами FSA и FSA-M вдоль дальности (слева) и азимута (справа) для классического метода (sc) и для модифицированного метода (mc) компенсации траекторных искажений

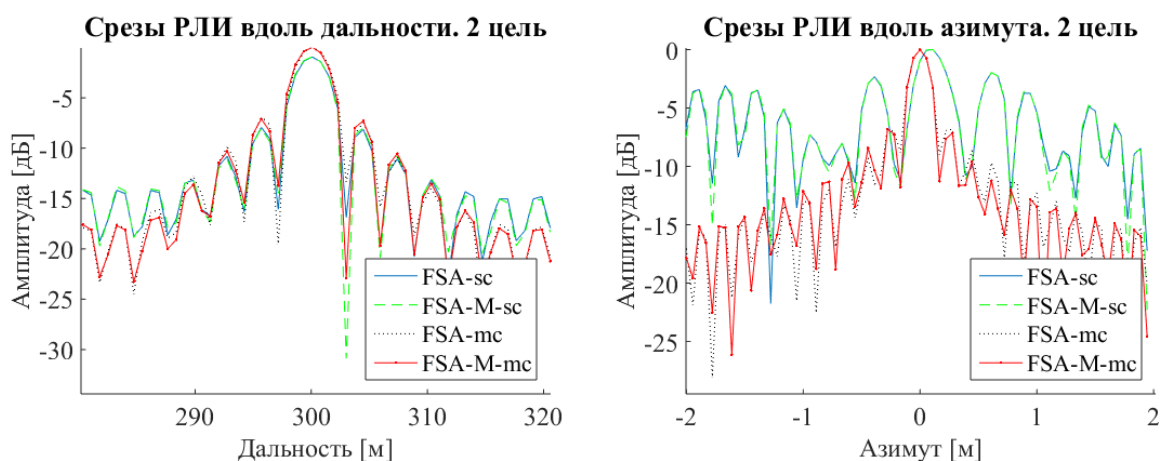


Рис. 11. Срезы РЛИ точечной цели (дальность 300 м), полученные методами FSA и FSA-M вдоль дальности (слева) и азимута (справа) для классического метода (sc) и для модифицированного метода (mc) компенсации траекторных искажений

Таблица 4

**Характеристики РЛИ, полученных методами FSA при имитационном моделировании для точечных целей с классической и модифицированной компенсацией траекторных искажений**

Параметры	Классическая компенсация		Модифицированная компенсация	
	1-я цель	2-я цель	1-я цель	2-я цель
Номер цели				
Координаты целей по дальности, м	100	300	100	300
РС по дальности	3,6	3,62	3,6	3,65
РС по азимуту	0,22	0,3	0,21	0,21
УБЛ по дальности	-7,3	-6,9	-7,3	-7,2
УБЛ по азимуту	-6,8	-2,1	-6,8	-6,8
Интегральный УБЛ по дальности	3,5	-9,7	3,5	-16,2
Интегральный УБЛ по азимуту	1,35	0,03	1,32	1,6

Таблица 5

**Характеристики РЛИ, полученных методами FSA-M при имитационном моделировании для точечных целей с классической и модифицированной компенсацией траекторных искажений**

Параметры	Классическая компенсация		Модифицированная компенсация	
	1-я цель	2-я цель	1-я цель	2-я цель
Номер цели				
Координаты целей по дальности, м	100	300	100	300
РС по дальности	3,58	3,64	3,6	3,6
РС по азимуту	0,21	0,31	0,21	0,21
УБЛ по дальности	-7,3	-6,8	-7,25	-7,2
УБЛ по азимуту	-6,9	-2,1	-6,9	-7
Интегральный УБЛ по дальности	3,6	11,4	3,6	-15
Интегральный УБЛ по азимуту	1,32	-0,27	1,3	1,7

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

Использование алгоритма FSA на расстояниях, соответствующих геометрическим параметрам работы автомобильной системы, приводит к размазыванию отклика точечной цели преимущественно вдоль азимутальной плоскости. Если сравнить результаты, полученные алгоритмом FSA-M, где изображение получилось более сфокусированным, то разрешающая способность по азимуту улучшилась на 23 %, уровень боковых лепестков по азимуту стал ниже на 1,2 дБ. Уровень ИУБЛ по обеим осям стал больше при использовании FSA-M, но это связано с уменьшением разрешающей способности. По дальности также есть изменения, но они несущественны. При геометрических параметрах работы, соответствующей летательному аппарату, также есть улучшение при использовании модифицированного алгоритма FSA, но не значительное.

Использование модифицированной компенсации траекторных искажений, в отличие от стандартной, позволяет корректно сфокусировать цели, находящиеся на разном удалении, как это видно на рис. 11. Численно ИУБЛ в модифицированном случае для второй цели становится лучше на 6,5 дБ при FSA и на 26,4 дБ – при FSA-M. Общий уровень ИУБЛ в модифицированном случае для обоих методов FSA и FSA-M отличается на 1,2 дБ. Также наблюдается улучшение разрешающей способности на 30 %.

## **Заключение**

По результатам данной работы проведены имитационное моделирование двух алгоритмов FSA (традиционного и модифицированного) для обработки сигналов в PCA и их сравнительный анализ по разрешающей способности, уровню боковых лепестков, интегральному уровню боковых лепестков. По итогам моделирования можно сделать вывод, что использование модифицированного алгоритма FSA с усложненным алгоритмом компенсации траекторных искажений позволяет получить более качественное и сфокусированное изображение в независимости от геометрических параметров работы системы и выбора опорной дальности при устранении траекторных искажений и тем самым подходит для использования на любых платформах.



## Библиографический список

1. González-Partida J.T. SAR system for UAV operation with motion error compensation beyond the resolution cell / J.T González-Partida, P. Almorox-Gonzalez, M. Burgos-Garsia, B.P. Dorta-Naranjo // *Sensors*. – 2008. – Т. 8. – № 5. – P. 3384–3405.
2. Chang W. FMCW SAR: From design to realization, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) / W. Chang, H. Tian, C. Gu // *IEEE Int.* – 2016. – P. 1122–1125.
3. Chang W. Miniature high resolution FMCW SAR system, Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST) / W. Chang, H. Tian, X. Li // *5th Int. Conf. IEEE.* – 2016. – P. 1–4.
4. Luo Y. High-resolution automobile FMCW SAR and signal processing / Y. Luo, S. Hongjun, R. Wang, Z. Shichao // *J. Electron. (China)*. – 2013. – Т. 30, № 6. – P. 561–566.
5. Cho B.L. Automobile-based SAR/InSAR system for ground experiments / B.L. Cho, Y.K. Kong, H.G. Park, Y.S. Kim // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* – 2006. – Т. 3, № 3. – P. 401–405.
6. Meta A. Signal processing of FMCW synthetic aperture radar data. PhD thesis, TU Delft, Delft. – Univ. Technol., 2006.
7. Gromek D. FMCW SAR based on USRP hardware platform / D. Gromek, P. Krysik, K. Ndini, P. Samczynski // *Radar Conf. IEEE.* – 2014. – P. 0552–0555.
8. Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // *Remote Sens.* – 2013. – Т. 5, № 2. – P. 716–807.
9. Lort Cuenca M. Ground-based SAR imaging basics and land clutter effects on the focused image: Univ. Politècnica de Catalunya, 2014.
10. De Wit J.J.M. Development of an Airborne Ka-band FMCW Synthetic Aperture Radar. 2005.
11. Stringham C. Developments in LFM-CW SAR for UAV Operation, PhD thesis, Brigham Young Univ., 2014.
12. Zaugg E.C. Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR / E.C. Zaugg, D.G. Long // *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing.* – 2008. – Т. 46, № 10. – P. 2990–2998.
13. Jiang Z. Modified frequency scaling algorithm for FMCW SAR data processing / Z. Jiang, F. Huang, J. Wan, Z. Cheng // *Chin. J. Aeronaut.* – 2007. – Т. 20, № 4. – P. 339–345.
14. Carrara W.G. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms / W.G. Carrara, R.S. Goodman, R.M. Majewski. – Boston, MA: Artech House, 1995.

15. Fornaro G., Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation / G. Fornaro // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 1999. – Vol. 35, № 3. – P. 997–1009.

**Сведения об авторах:**

ЭРДЫНЕЕВ Жаргал Тумэнович, аспирант.

E-mail: erdineevzh@gmail.com

ГЕЛЬЦЕР Андрей Александрович, к. т. н., заведующий кафедрой.

E-mail: gaa.pochta@gmail.com

ВЕЛИКАНОВА Елена Павловна, к. т. н., доцент.

E-mail: Raliens@mail.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ПАНОКИН Николай Викторович, к. т. н., начальник управления науки

E-mail: n.panokin@misis.ru

НИТУ «МИСиС»

© Эрдынеев Ж. Т., Гельцер А. А.,  
Великанова Е. П., Панокин Н. В., 2017

**Zh. T. Erdyneev, A. A. Geltser, E. P. Velikanova, N. V. Panokin**

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF FREQUENCY SCALING ALGORITHMS FOR SIGNAL PROCESSING IN SMALL-SIZE MOBILE PLATFORMS**

Data of receipt 22.09.2017

Decision on publication 26.10.2017

**Introduction.** With the development of hardware and computer systems, which improve qualitative characteristics of synthetic aperture radars, with their dimensions limited, many new systems have appeared that allow using more accessible and widespread mobile platforms such as a car, quadcopters, unmanned aerial vehicles (UAV).

**Problem.** The use of new types of platforms leads to additional distortions associated with features of the geometry of the radar performance and more severe trajectory instabilities. Thus, new synthetic aperture radar systems should have special requirements for both software and hardware, which differ from classical systems.

**Objective.** The aim of the work is the comparison various algorithms that are used in modern radiovision systems to obtain high-quality radar images that can be integrated into various kinds of mobile platforms.

**Methods.** The method of frequency scaling and various modifications of this method are taken as a basic algorithm, including additional algorithms for compensating trajectory instabilities. For comparison of algorithms, the system geometry for automobiles and aircraft systems are considered and simulations were performed with the presence of point reflectors at different distances and the distortion of the platform motion.

**Results.** The difference of the considered algorithms in the form of flowcharts and mathematical formulas is shown. Based on results of the simulation the use of the basic frequency scaling algorithm at distances corresponding to the geometry of the automobile system leads to the distortion of the response along the azimuth. In addition, the use of the modified algorithm for compensating trajectory distortion allows correct focusing the targets at different distances.

**Conclusion.** The proposed combination of modified algorithms of trajectory distortion and frequency scaling allows focusing the image evenly throughout the frame and improving the quality of the image in the near zone.

Automobile, UAV, radiovision, radiolocation image (RLI), synthetic aperture radars (SAR), frequency modulated continuous wave (FMCW), frequency scaling algorithm (FSA).

## Introduction

With the development of hardware and computer systems, which improve qualitative characteristics of synthetic aperture radars (SAR) [1–7], with their dimensions limited, many new systems have appeared that allow using more accessible and widespread mobile platforms such as a car, quadcopters, unmanned aerial vehicles (UAV), in comparison with planes and satellites. The magnitude of the tasks which can be solved by means of these systems is enormous [8]. Cars would be able to generate panoramic radiolocation images (RLI) at the expense of their speed, using only one antenna system, which would decrease size requirements of the equipment [4, 5].

The new synthetic aperture radar systems should have special requirements for both software and hardware, which differ from classical systems. In the considered examples of the existing elaborations of algorithms and those ready for realisation in small-size SAR, one may point out the following [9–13]: the use of frequency modulated continuous wave (FMCW), algorithms for compensating trajectory distortions, and frequency scaling algorithm (FSA). The use of FMCW actually allows working in the near zone as well as decreases requirements for digital signal processing architecture [6], whereas among the frequency scaling methods [12, 13] there are different modifications, where different formulae are used. Consequently, in the article the following objectives have been set:

- to compare frequency scaling algorithm from the article [12] with the modified frequency scaling algorithm from the article [13] (hereinafter FSA-M);
- to apply the algorithm for compensating trajectory distortions from the article [12] for FSA and FSA-M and compare properties of the obtained radiolocation images;
- to compare properties of the radiolocation images at different slant ranges and azimuth position of point reflectors for detection of geometric distortions.

The article is arranged as follows. In the first part, the geometry of SAR performance is presented for the cases when UAV and cars are used as the bearing platforms. Their peculiarities and differences are demonstrated as well. In the second part, the processing algorithms of FSA and FSA-M are briefly discussed. In the third part, the results of processing of signals are shown, which are obtained during simulation of SAR performance by virtue of different methods of compression and compensation of radiolocation image. In the end of the article, the conclusion is given.

## 1. The geometry of SAR performance

First of all, it is necessary to set the source conditions, therefore let us consider the principle and geometry of the synthetic-aperture radar performance, derive formula, corresponding to the received signal after its multiplying by reference signal.

Let us suppose, that the sounding signal  $s_t(t)$  radiates in the moment of time  $\tau$  at which the distance is  $R(\tau)$  and returns to the receiver in the moment of time  $\tau + \tau_d$ , covering the distance  $R(\tau + \tau_d)$ . Thus, the delay of signal double scattering may be expressed as:

$$\tau_d = \frac{R(\tau) + R(\tau + \tau_d)}{c}, \quad (1)$$

where  $R(\tau + \tau_d) = \sqrt{R_0^2 + v^2 \cdot (\tau + \tau_d - \tau_0)^2}$ ;

$c$  – the speed of light;

$v$  – the velocity of the moving platform.

Simplifying the formula (1) by quadratic equation, confining ourselves to quadratic terms of expansion, we obtain the following formula of the delay value:

$$\tau_d(\tau) = \frac{2 \left( \frac{R(\tau)}{c} + \frac{v^2}{c^2} (\tau - \tau_0) \right)}{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (2)$$

Considering the formula (2) and the use of the linear frequency modulation signal, the received signal may be expressed as follows:

$$s_r(t, \tau) = \sigma(\tau_0, r_0) \cdot s_t(t - \tau_d(\tau)) \cdot \exp[j2\pi f_0(t - \tau_d(\tau))],$$

where  $\sigma(\tau_0, r_0)$  – target cross-section with the corresponding coordinates;

$f_0$  – carrier wave frequency;

$s_t(t) = \exp(j\pi K_r t^2)$  – linear frequency modulation signal, where  $K_r$  – frequency slew rate, which is calculated as  $\Delta F / T$ , where  $\Delta F$  – signal band;

$T$  – period of one pulse (period of pulse radiation).

For the cases when FMCW is used, the received signal is multiplied by reference complex conjugate signal:

$$s_{ref}(t) = s_t^*(t) \cdot \exp(-j2\pi f_0 t).$$

After multiplying by reference complex conjugate signal we obtain the following signal:

$$s_b(t, \tau) = \sigma(\tau_0, r_0) \cdot \exp[-j2\pi K_r \tau_d(\tau) \cdot t] \times \exp[-j2\pi f_0 \tau_d(\tau)] \cdot \exp[-j2\pi K_r \tau_d^2(\tau)]. \quad (3)$$

Let us analyse the formula (3) in detail. The first exponent forms harmonic signal with the frequency corresponding to multiplication of delay  $\tau_d(\tau)$  and the frequency slew rate  $K_r$ , and thus, it is responsible for *the location of the target by range*. The second exponent forms the Doppler spectrum along the azimuth making it possible to determine *the location of the target by azimuth*. The third exponent is called residual video phase and is compensated in most cases due to its uselessness [14].

Let us analyse the difference between UAV and an automobile used as platforms for aperture synthesis. To illustrate the difference in the geometry of SAR on automobile and aircraft platforms, the fig. 1 is given below. Let us assume that antenna system parameters and the height of the aircraft platform make the following values, given in the table 1.

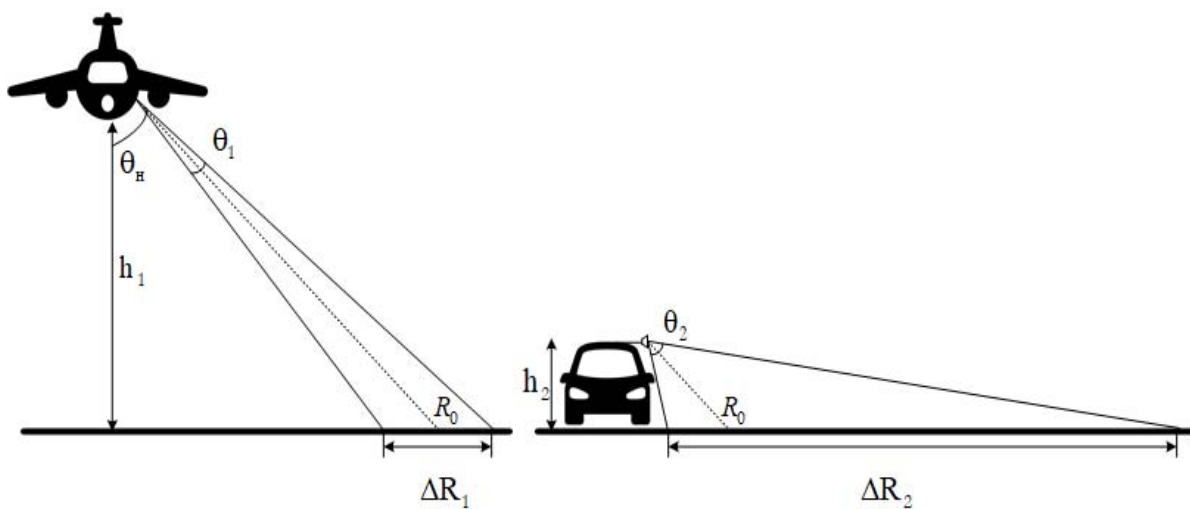


Fig. 1. The geometry of SAR on automobile and aircraft platforms

Table 1

**Parameters of the geometry of aircraft and automobile SAR**

Parameter	Value
Antenna system look angle, $\theta_H$ , degrees	45°
Width of directional diagram by azimuth, $\theta$ , degrees	15°
Width of directional diagram by elevation, $\theta_1$ , degrees	15°
Height of the aircraft platform, $h_1$ , m	1000
Height of the automobile platform, $h_2$ , m	2

Now, if we calculate the swath width along the range via antenna system look angle and width of directional diagram by elevation, we obtain:

$$\Delta R_1 = (h_1 / \cos(\theta_H + \theta_1 / 2)) - (h_1 / \cos(\theta_H - \theta_1 / 2)) = 382 \text{ m.}$$

If we calculate the length of aperture synthesis by the formula:

$$L_s = 2 \cdot R_0 \cdot \tan(\theta / 2) = 372 \text{ m.}$$

As it may be seen, the sizes of zones in both coordinates are commensurate, which is convenient for displaying the final radiolocation image. If the parameters of the antenna system remain the same, with the antenna system placed on the automobile platform of 2 metres high ( $h_2 = 2 \text{ m}$ ), the width of the look will be:  $\Delta R_2 = 0,76 \text{ m}$ . As a result, in the final image the size of the image in terms of range will be only 0,76 metres, which is absolutely impractical for this system.

Therefore, it is advisable to use an antenna system with a broader directional diagram by elevation when the automobile platform is used or any other platform requiring low height of antenna synthesis. For instance, if we now take an antenna with the directional diagram width by elevation  $\theta_2 = 80^\circ$ , then  $\Delta R_2 = 21 \text{ m}$ . In some cases the antenna system is installed higher by virtue of additional fastenings, as it may be seen from [5, 7], which is not surprising when it comes to receiving data from remote zones.

Now that we have formed the mathematical model of the received signal and the geometry of the performance, let us carry out simulation of the SAR performance and data processing by FSA and FSA-M algorithms with a point reflector for comparison of the following parameters:

- the azimuth and range resolution;
- the relation of the side lobes' level to the main lobe one;
- integral relation of side lobes' level to that of the main one.

## 2. Processing algorithms

As it was previously mentioned, let us take two realisation of FSA algorithms for processing algorithms. Their flowcharts are given in the fig. 2 [12, 13].

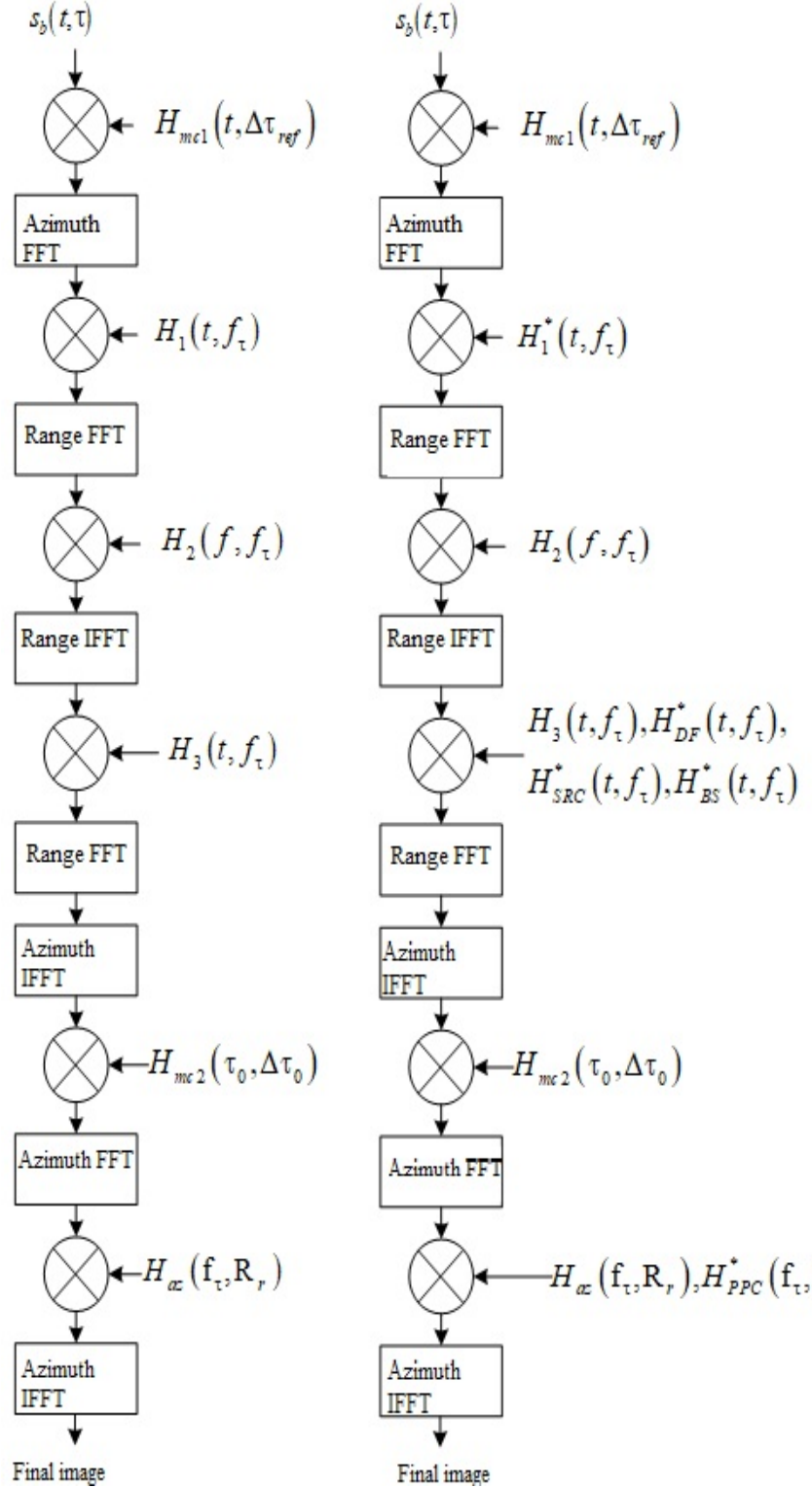


Fig. 2. Flowcharts of FSA (left) and FSA-M (right)



It needs to be pointed out straightaway that the full information about processing stages is given in the sources [12, 13]. Below, the formulae used either for one modification or for trajectory instabilities compensations, will be given. The trajectory instability has also been considered within only one modification.

The main feature of frequency scaling algorithms consists in the range migration for different targets may be compensated without interpolation, only by mere multiplication. This advantage makes this algorithm more attractive for integration into signal processing block, since multiplication operations are simpler than interpolation ones.

The input data of the algorithm are the array of signals from the output of the multiplier, according to the formula (3).

The FSA algorithm includes a series of Fast Fourier Transformation (FFT) and phase multiplications. If we reject the stages of compensation of the platform movement, the key differences between the algorithms will be:

Frequency scaling function for FSA, which removes Doppler oscillations, has the following view:

$$H_1(t, f_\tau) = \exp\left(-j \cdot \left(2\pi \cdot f_\tau \cdot t + \pi \cdot K_r \cdot t^2 (1 - D(f_\tau, \nu))\right)\right),$$

where  $D(f_\tau, \nu) = \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot f_\tau^2 / 4\nu^2}$ ;

$\lambda$  – wavelength;

$f_\tau$  – azimuth grid frequency.

The formula for the modified FSA-M algorithm is of the following view:

$$H_1^*(t, f_\tau) = \exp\left(-j \cdot \pi \cdot K_r \cdot t^2 (1 - D(f_\tau, \nu))\right).$$

In the modified algorithm after Inverse Fast Fourier Transformation (IFFT), the multiplication by three more functions takes place:

1) doppler factor correlation function:

$$H_{DFC}^*(t, f_\tau) = \exp\left(-j \cdot 2\pi \cdot f_\tau \cdot D(f_\tau, \nu) \cdot t\right);$$

2) second range compression function:

$$\begin{aligned} & H_{SRC}^*(t, f_\tau) = \\ & = \exp\left(-j \frac{2\pi \cdot R_{ref} \cdot K_r^2 \cdot \lambda}{c^2} \cdot \frac{(D^2(f_\tau, \nu) - 1)}{D^3(f_\tau, \nu)} \cdot \left(D(f_\tau, \nu) \cdot t - \frac{2 \cdot R_{ref}}{c}\right)^2\right) \bullet \end{aligned}$$

$$\exp\left(-j \frac{2\pi \cdot R_{ref} \cdot K_r^3 \cdot \lambda^3}{c^3} \cdot \frac{(D^2(f_\tau, \nu) - 1)}{D^5(f_\tau, \nu)} \cdot \left(D(f_\tau, \nu) \cdot t - \frac{2 \cdot R_{ref}}{c}\right)^3\right);$$

3) group phase shift function:

$$\begin{aligned} H_{BS}^*(t, f_\tau) &= \\ &= \exp\left(j \cdot \frac{4\pi \cdot K_r}{c} \cdot R_{ref} \cdot \left(\frac{1}{D(f_\tau, \nu)} - 1\right) \left(D(f_\tau, \nu) \cdot t - \frac{2 \cdot R_{ref}}{c}\right)\right), \end{aligned}$$

where  $R_{ref}$  – reference range.

At the final the multiplication by phase conservation phase:

$$H_{PPC}^*(f_\tau, f_r) = \exp\left(j \frac{4\pi \cdot R_{ref}}{c} \frac{f_r}{D(f_\tau, \nu)}\right),$$

where  $f_r$  – range frequency grid.

Let us analyse the peculiarities of the radar movement itself. The algorithms mentioned above took into account only even, direct movement. Actually, the platform will often deviate from its nominal trajectory, which will result in poor radiolocation image quality.

On the basis of [12, 15], the following algorithm of movement compensation is suggested. The receive signal  $s_b(t, \tau)$  is multiplied by the function:

$$H_{mcl}(t, \Delta\tau_{ref}) = \exp\left(-j \left( \begin{aligned} &\omega_0 \cdot \Delta\tau_{ref} + 2\pi \cdot K_r \cdot t \cdot \Delta\tau_{ref} - \\ &-\pi \cdot K_r \cdot (2 \cdot \tau_{ref} \cdot \Delta\tau_{ref} - \Delta\tau_{ref}^2) \end{aligned} \right)\right), \quad (4)$$

where  $\Delta\tau_{ref} = 2 \cdot \Delta R_{ref} / c$ ;  $\Delta R_{ref} = R_{actual} - R_{ideal}$ , where  $R_{actual}$  – slant range from platform to point target considering known deviations during platform movement;

$R_{ideal}$  – ideal trajectory of platform movement for the same location of the point target.

The next stage carries out differential correction after range compensation, where the location information is averaged along the entire pulse. This statement comes out of the fact that when all data are compressed by range, each cell in

range is formed from data that is distributed along the entire pulse. Correction function is calculated for each cell by range:

$$H_{mc2}(\tau_r, \Delta\tau_r) = \exp \left( j \left( \begin{array}{l} -\omega_0 \cdot \Delta\tau_r + 2\pi \cdot K_r \cdot \tau_r \cdot \Delta\tau_r - \pi \cdot K_r \cdot \Delta\tau_0^2 + \\ +\omega_0 \cdot \Delta\tau_r - 2\pi \cdot K_r \cdot \tau_r \cdot \Delta\tau_r + \pi \cdot K_r \cdot \Delta\tau_{ref}^2 \end{array} \right) \right). \quad (5)$$

The introduced method is similar to traditional movement compensation, but has a number of advantages. Firstly, the movement during radiation is taken into account, which is crucial for modulation with continuous chirp. Secondly, the correction here takes place without interpolation.

Now, let us carry out imitation modelling with the parameters given in the table 2.

Table 2

**Modelling parameters**

Parameter	Value
Type of signal modulation	chirp
Platform velocity	100 km/h
Carrier wave frequency	10 GHz
Period of pulse	1 ms
Modification strip of chirp	50 MHz
Targets' coordinates, [range, m; azimuth, m]	[650; 0], [20; 0], [300; 0], [100; 0]

Let us compare the algorithms with different modifications in the following sequence:

1) radiolocation image of the target at the range of 650 metres, obtained by methods FSA and FSA-M with an ideal trajectory correction;

2) radiolocation image of the target at the range of 20 metres, obtained by FSA and FSA-M methods with an ideal trajectory correction;

3) radiolocation image of two targets at the range of 100 metres and 300 metres with a rough trajectory correction, where 100 metres is reference range;

4) radiolocation image of two targets at the range of 100 metres and 300 metres obtained by means of FSA and FSA-M methods, with a proposed trajectory, where 100 metres is reference range.

### 3. Modelling. Processing results

The results of the modelling of the first two points are shown in the fig. 3–6 and the table 3.

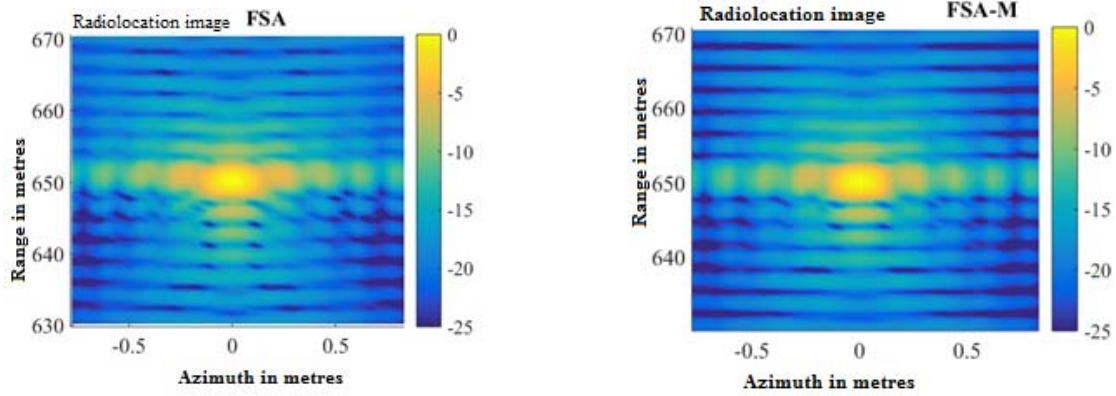


Fig. 3. Radiolocation image of the point target obtained by FSA (left) and FSA-M (right) methods at the range of 650 metres

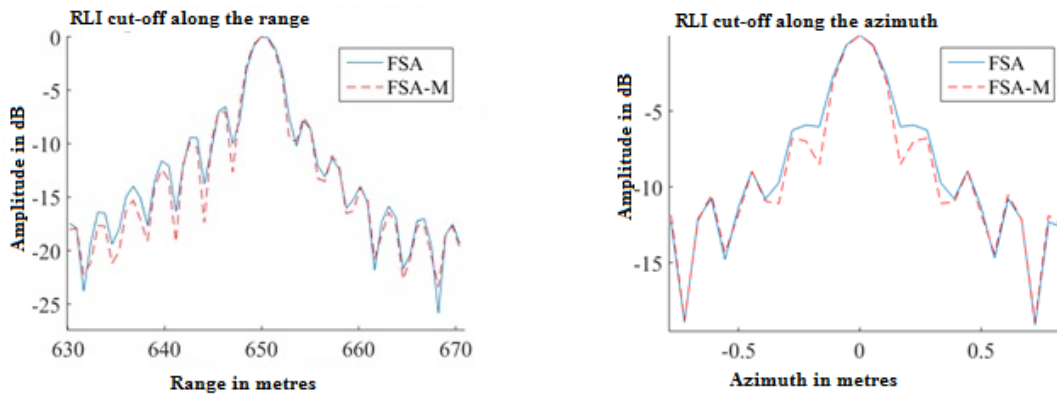


Fig. 4. Point target RLI cut-offs (650 m range) along the range (left) and azimuth (right) for FSA and FSA-M methods

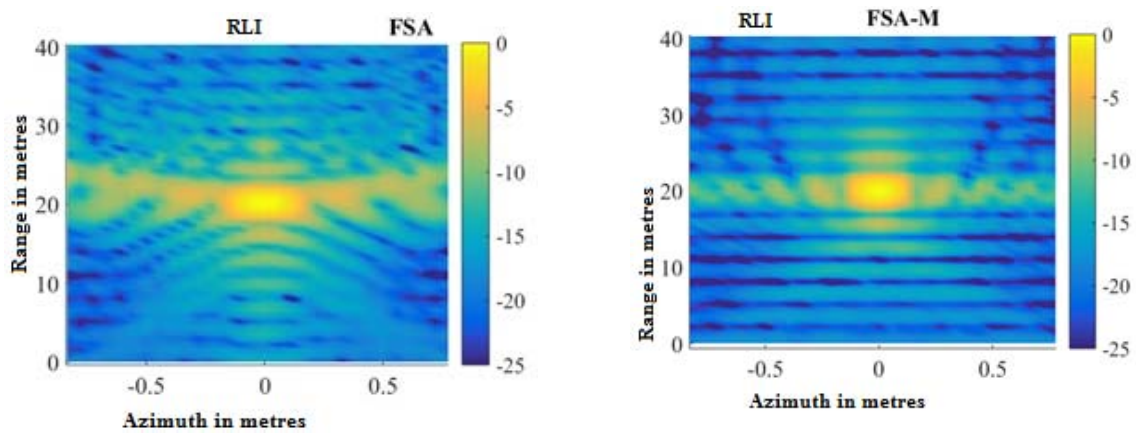


Fig. 5. Radiolocation image of the point target obtained by FSA (left) and FSA-M (right) methods at the range of 20 metres

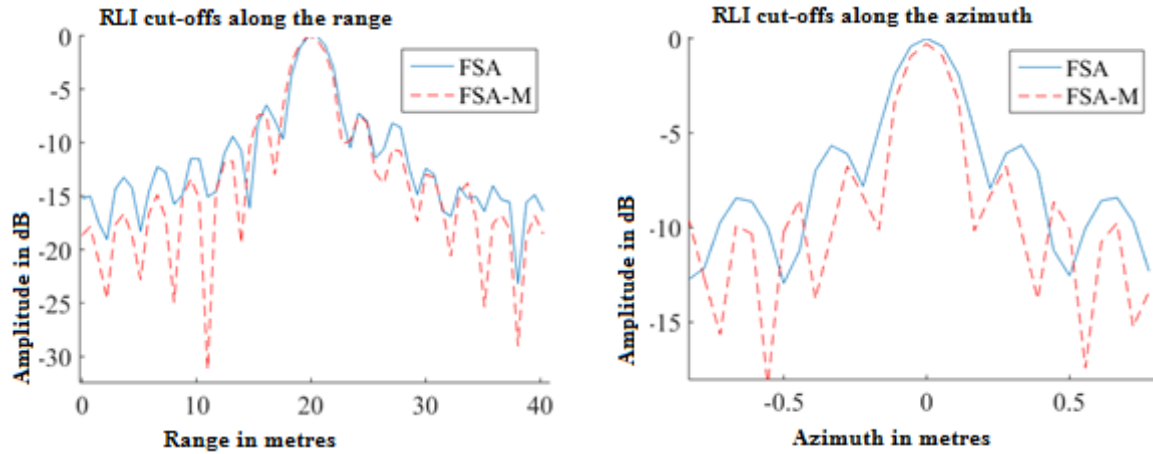


Fig. 6. Point target RLI cut-offs (20 m range) along the range (left) and the azimuth (right) for FSA and FSA-M methods

Table 3

**RLI properties obtained by virtue of FSA and FSA-M methods during imitation modelling of targets at the range of 650 metres and 20 metres**

Parameter	FSA	FSA-M	FSA	FSA-M
Range, m	650		20	
Range resolution	3,6	3,58	3,5	3,6
Azimuth resolution	0,23	0,22	0,27	0,21
Range side lobes' level	-7,2	-7,2	-7	-7,4
Azimuth side lobes' level	-5,9	-6,8	-5,7	-6,9
Integral range side lobes' level	5,1	5,5	4	5,6
Integral azimuth side lobes' level	1,4	1,6	1	1,5

During analysis of the trajectory instability, a sinusoidal distortion was detected during motion of platform along the range. It is shown in the fig. 7. Consequently, in each  $i$ -th pulse the phase shift will take place corresponding to the value  $\exp(-j \cdot 4 \cdot \pi i \cdot R(i)/\lambda)$ . On the assumption that the trajectory is known, let us compare to approaches for elimination of phase distortions. The first case is a classical one for which the formula (4) is used, whereas the formulae (4) and (5) are used for the second one. It needs pointing out that 100 metres value has been taken as a reference range. In the fig. 8–11 and in the tables 4, 5 the results of the modelling are given.

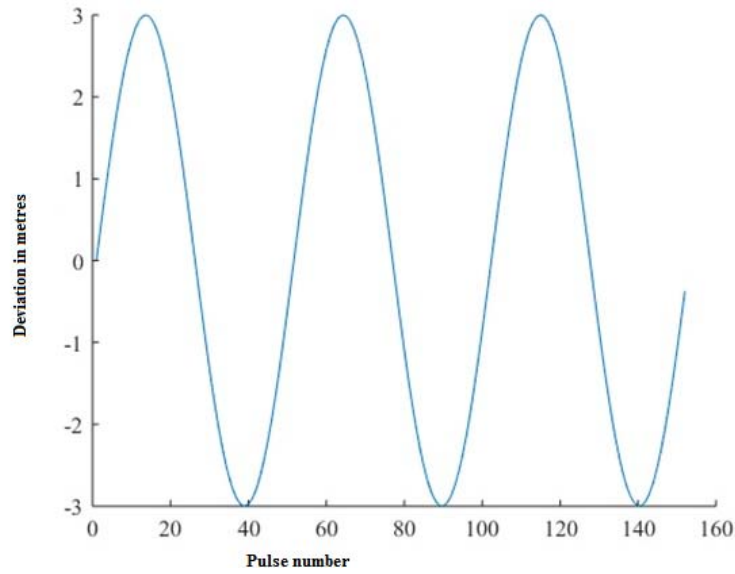


Fig. 7. Trajectory instability of the platform

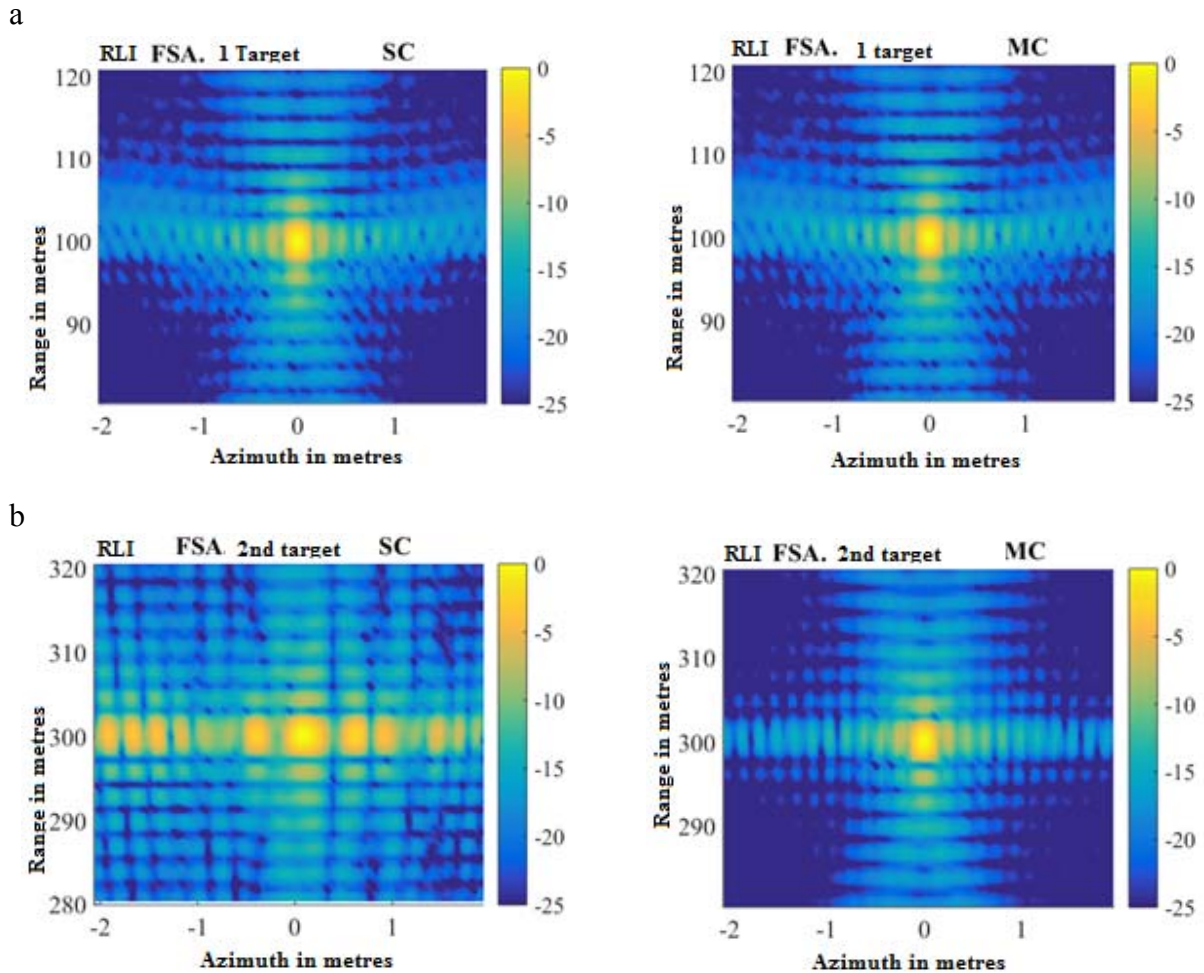


Fig. 8. Radiolocation images of point targets obtained by FSA method, at the range of 100 m (a), 300 m (b), and obtained by classical method (left) and modified method (right) of trajectory deviation compensation

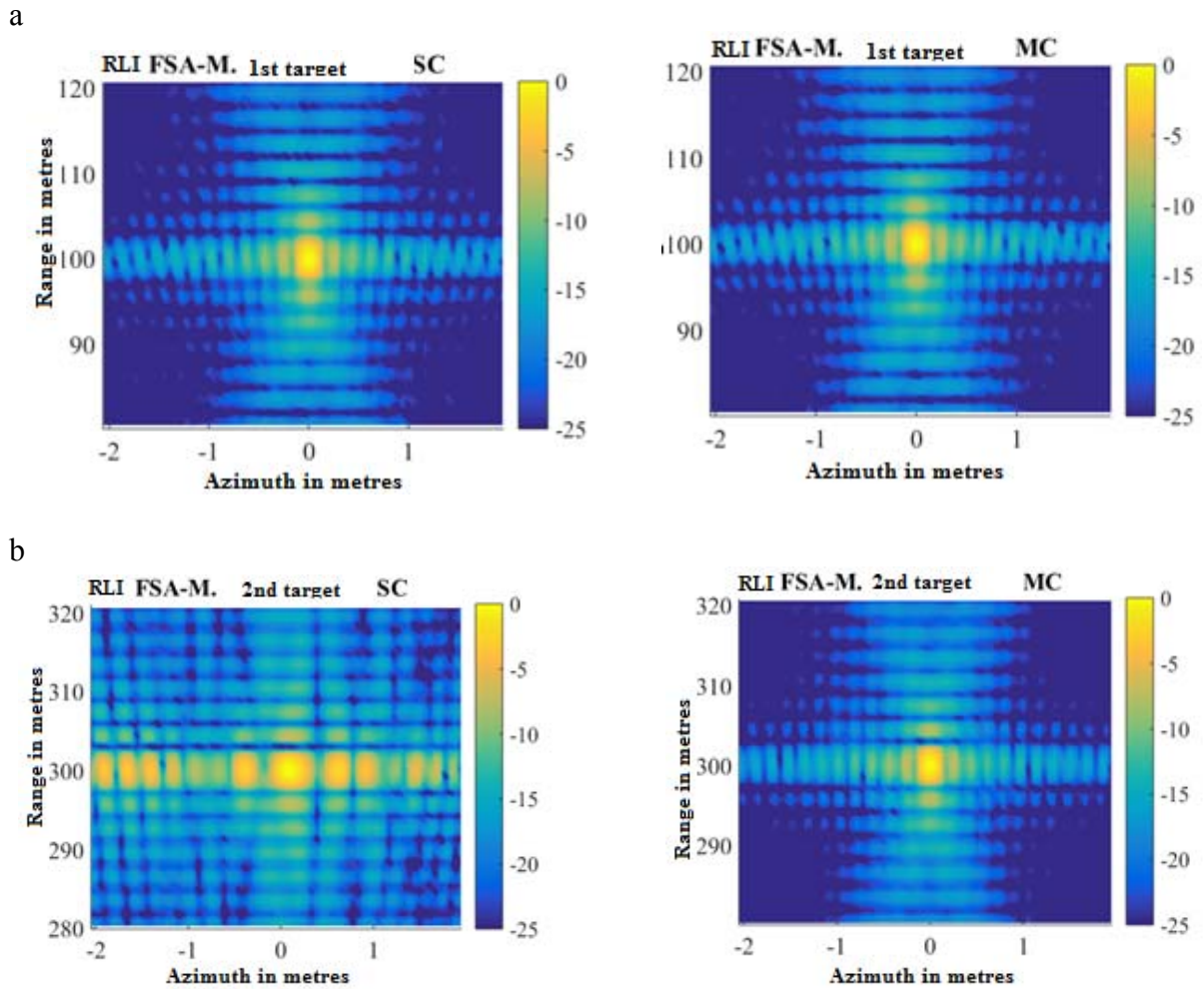


Fig. 9. Radiolocation images of point targets obtained by FSA-M method, at the range of 100 m (a), 300 m (b), and obtained by classical method (left) and modified method (right) of trajectory deviation compensation

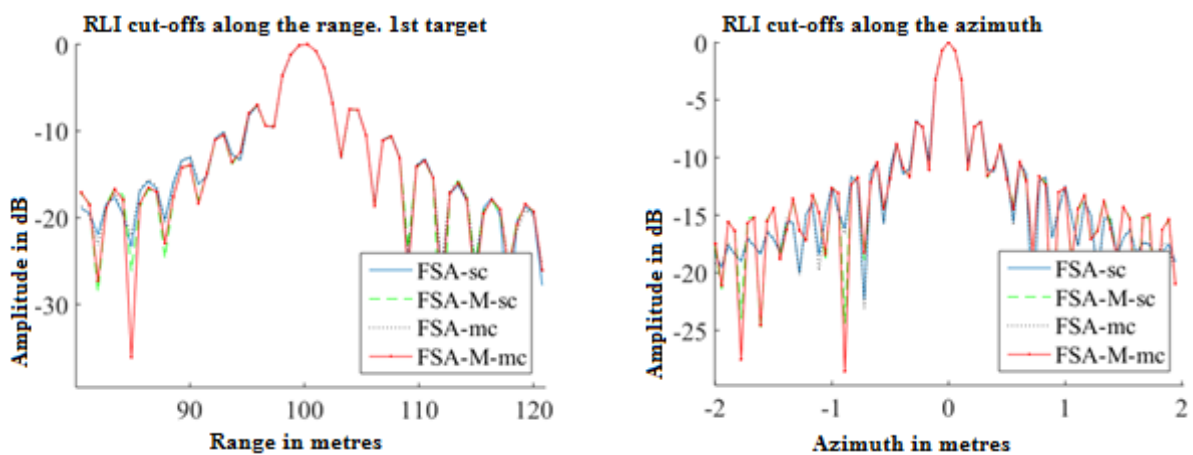


Fig. 10. Point target RLI cut-offs (100 m range) obtained by FSA and FSA-M methods along the range (left) and along the azimuth (right) for classical method (SC) and for modified method (MC) of trajectory distortion compensation

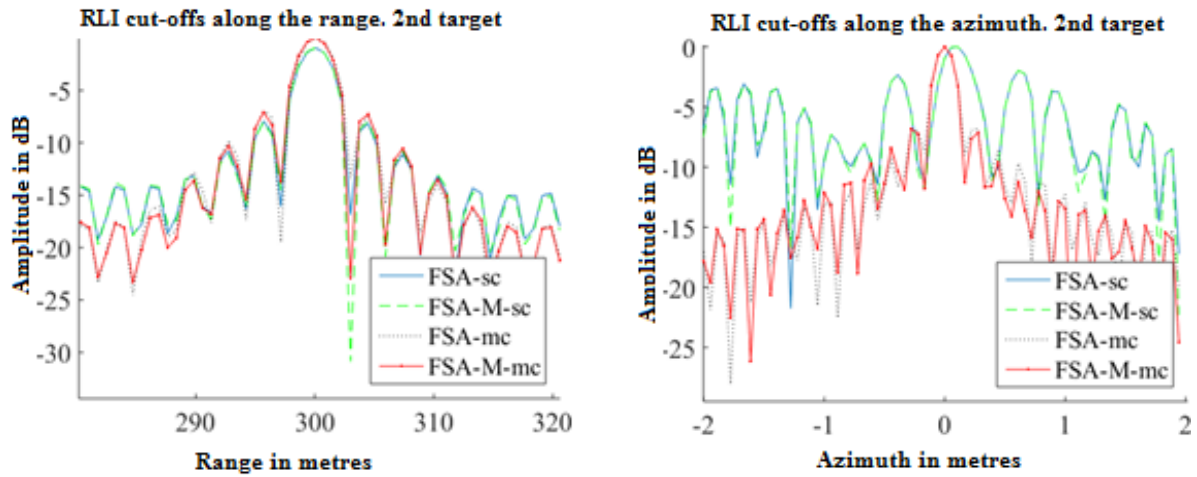


Fig. 11. Point target RLI cut-offs (300 m range) obtained by FSA and FSA-M methods along the range (left) and along the azimuth (right) for classical method (SC) and for modified method (MC) of trajectory distortion compensation

Table 4

**Properties of RLI obtained by FSA methods during modelling for point targets with classical and modified methods of trajectory distortion compensation**

Parameters	Classical compensation		Modified compensation	
	1 <sup>st</sup> target	2 <sup>nd</sup> target	1 <sup>st</sup> target	2 <sup>nd</sup> target
Number of target	1 <sup>st</sup> target	2 <sup>nd</sup> target	1 <sup>st</sup> target	2 <sup>nd</sup> target
Range coordinates of targets, m	100	300	100	300
Range resolution	3,6	3,62	3,6	3,65
Azimuth resolution	0,22	0,3	0,21	0,21
Range side lobes' level	-7,3	-6,9	-7,3	-7,2
Azimuth side lobes' level	-6,8	-2,1	-6,8	-6,8
Integral range side lobes' level	3,5	-9,7	3,5	-16,2
Integral azimuth side lobes' level	1,35	0,03	1,32	1,6

Table 5

**Properties of RLI obtained by FSA-M methods during modelling for point targets with classical and modified methods of trajectory distortion compensation**

Parameters	Classical compensation		Modified compensation	
	1 <sup>st</sup> target	2 <sup>nd</sup> target	1 <sup>st</sup> target	2 <sup>nd</sup> target
Number of target	1 <sup>st</sup> target	2 <sup>nd</sup> target	1 <sup>st</sup> target	2 <sup>nd</sup> target
Range coordinates of targets	100 M	300 M	100 M	300 M
Range resolution	3,58	3,64	3,6	3,6
Azimuth resolution	0,21	0,31	0,21	0,21
Range side lobes' level	-7,3	-6,8	-7,25	-7,2
Azimuth side lobes' level	-6,9	-2,1	-6,9	-7
Integral range side lobes' level	3,6	11,4	3,6	-15
Integral azimuth side lobes' level	1,32	-0,27	1,3	1,7



The results of the studies enable the following conclusions.

The use of FSA algorithm on ranges corresponding to the geometry of the automobile system performance leads to smearing the response of the point target basically along the azimuth surface. If we compare the results, obtained by virtue of FSA-M algorithm, where the image was more sharp, the azimuth resolution improved by 23 %, the azimuth side lobes' level was lower by 1,2 dB. The level of integral side lobes on both axis became bigger at FSA-M, but this is connected with decrease of the resolution. As for the range, there are also some alterations, but they are not that significant. The geometry of aircraft performance also demonstrates improvements when the modified FSA algorithm is in use.

The application of the modified trajectory distortion compensation, in comparison with the traditional one, enables focusing the target correctly, which are in different planes, as it is shown in the fig. 11. Numerically, integral side lobes in case of the modified one application for 2<sup>nd</sup> target becomes better by 6,5 dB at FSA and 26,4 dB at FSA-M. The common level of integral side lobes in the modified case for both FSA and FSA-M differs by 1,2 dB. The improvement of resolution is also observed.

## Conclusion

According to the results of the work conducted, the imitation modelling of two algorithms FSA (traditional and modified) was carried out, for signal processing of SAR. Also their comparative analysis was carried out on the subject of resolution, integral level of side lobes and level of side lobes. The results of the modelling gives us the opportunity to obtain a more detailed and sharp image irrespective of the geometry of the system performance and choice of reference range while eliminating trajectory distortions. Therefor it will be suitable for application on any platforms.

## References

1. González-Partida J.T., Almorox-Gonzalez P., Burgos-Garcia M. Dorta-Naranjo B.P. *Sensors*, 2008, T. 8, no. 5, pp. 3384–3405.
2. Chang W., Tian H., Gu C. FMCW SAR: From design to realization, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, *IEEE Int.*, 2016, pp.1122–1125.
3. Chang W., Tian H., Li X. Miniature high resolution FMCW SAR system, Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), *5th Int. Conf. IEEE*, Thessaloniki, Greece, 2016, pp. 1–4.
4. Luo Y., Hongjun S., Wang R., Shichao Z. *J. Electron. (China)*, 2013, T. 30, no. 6, pp. 561–566.

5. Cho B.L., Kong Y.K., Park H.G., Kim Y.S. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2006, T. 3, no. 3, pp. 401–405.
6. Meta A. Signal processing of FMCW synthetic aperture radar data. PhD thesis, TU Delft, Delft Univ. Technol., 2006.
7. Gromek D., Krysik P., Ndini K., Samczynski P. FMCW SAR based on USRP hardware platform, *Radar Conf. IEEE*, 2014, Cincinnati, OH, USA, 2014, pp. 0552–0555.
8. Ouchi K. *Remote Sensing*, 2013, T. 5, no. 2, pp. 716–807.
9. Lort Cuenca M. Ground-based SAR imaging basics and land clutter effects on the focused image: PhD thesis. Univ. Politècnica de Catalunya, 2014.
10. De Wit J.J.M. Development of an Airborne Ka-band FMCW Synthetic Aperture Radar, PhD thesis, TU Delft, Delft Univ. Technol., 2005.
11. Stringham C. Developments in LFM-CW SAR for UAV Operation, PhD thesis, Brigham Young Univ., 2014.
12. Zaugg E.C., Long D.G., *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, 2008, T. 46, no. 10, pp. 2990–2998.
13. Jiang Z. Huang F., Wan J., Cheng Z. *Chin. J. Aeronaut.*, 2007, T. 20, no. 4, pp. 339–345.
14. Carrara W.G., Goodman R.S., Majewski R.M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms. Boston, MA, Artech House, 1995.
15. Fornaro G. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1999, vol. 35, no. 3, pp. 997–1009.

**Information about the authors:**

Zhargal T. ERDYNEEV, Post-graduate student.

E-mail: erdineevzh@gmail.com

Andrey A. GELTSER, Cand. sci. (Eng.), chair.

E-mail: gaa.pochta@gmail.com

Elena P. VELIKANOVA, Cand. sci. (Eng.), Associate Prof.

E-mail: Raliens@mail.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

Nikolay V. PANOKIN, Cand. sci. (Eng.)

Direktorat Head of science.

E-mail: n.panokin@misis.ru

National University of Science and Technology «MISIS»

© Erdyneev Zh. T., Geltser A. A.,  
Velikanova E. P., Panokin N. V., 2017

Г. Е. Серeda, В. М. Стрепетов

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ ЭКИПАЖНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Дата поступления 11.07.2017

Решение о публикации 17.07.2017

**Цель.** Получить новые аналитические выражения для определения индуктивности экипажных электромагнитов транспортных левитационных систем.

**Методы.** Главная особенность расчетной модели бортовых катушек по определению их индуктивности на примере электромагнитов прямоугольной формы – допущение о малой величине высоты по сравнению с другими геометрическими размерами. Принято также допущение, что толщина скин-слоя проводника существенно превосходит поперечный размер провода, составляющего катушку. Рассматривается одновитковая катушка, индуктивность реального электромагнита принимается пропорциональной квадрату числа витков. При расчете индуктивности используются безразмерные величины. В качестве нормировки выбрана четверть периметра катушки по средней линии. Условием получения приближенной формулы расчета индуктивности плоской прямоугольной катушки является меньшая толщина обмотки по сравнению с геометрическими размерами катушки.

**Результаты.** Получено точное аналитическое выражение для величины индуктивности «тонкого» источника магнитного поля прямоугольной формы в виде алгебраической суммы элементарных функций. Результаты численного анализа показывают зависимость относительной индуктивности плоской катушки прямоугольной формы от отношения толщины к ее минимальному размеру. Исследовано влияние «вытянутости» катушки (отношения длины к ширине). Отмечено, что индуктивность уменьшается с уменьшением «вытянутости», а также с увеличением отношения толщины к минимальному размеру.

**Практическая значимость.** Получено приближенное выражение для вычисления значения индуктивности, погрешность которого не превышает 14 % в области изменений всех геометрических параметров электромагнита. Установлены границы практического применения полученных аналитических выражений при принятых допущениях. Выведенные выражения относительно просты по структуре и легко программируются.

Индуктивность бортовых электромагнитов, плоская катушка, скин-слой, численный анализ.

### Введение

Использование инновационных технологий как в пассажирских, так и в грузовых транспортных перевозках на основе магнитолевитационных транспортных систем способствует повышению их экономичности и экологичности [1–3].

Одним из вариантов магнитного подвешивания является комбинированная система левитации и тяги на однофазном переменном токе. В таком случае питание электромагнитов производится от статических преобразователей частоты. Допустимые значения напряжения ограничиваются параметрами используемых силовых полупроводниковых приборов (СП). У современных СП допустимое напряжение составляет 5000 В [4–6].

Величина требуемого напряжения на электромагнитах пропорциональна их индуктивности. При этом точность установления индуктивности во многом определяет достоверность результатов исследований электро-механических систем.

Расчет индуктивности проводящих систем – как правило, технически сложная процедура, связанная с громоздкими вычислениями даже для самых простых форм электромагнитов.

Множество справочников по вычислению указанных величин (см., например, библиографию в [7–9]) содержит в основном наборы приближенных формул, у которых точность и зоны их применимости указаны далеко не всегда.

Данная статья посвящена установлению величины индуктивности  $L$  для катушек определенной конфигурации, у которых величина «высоты» электромагнита пренебрежимо мала по сравнению с другими геометрическими размерами катушки. Такие электромагниты будем называть бесконечно тонкими (плоскими) источниками магнитного поля.

Следует заметить, что величина индуктивности существенно зависит от частоты протекающего по катушке тока. Будем предполагать, что ток  $I$ , определяющий магнитное поле системы, слабо меняется, т. е. величина скин-слоя проводника значительно превосходит поперечный размер провода, составляющего катушку.

### Методология расчета

Общая формула для определения индуктивности плоского источника магнитного поля  $L_T$  задается соотношением [7]

$$L_T = \frac{\mu_0 W^2}{4\pi I^2} \int_S d\mathbf{p} \int_{S'} d\mathbf{p}' (i, i') / |\mathbf{p} - \mathbf{p}'|, \quad (1)$$

где  $d\mathbf{p} = dx dy$ ,  $d\mathbf{p}' = dx' dy'$ ;

$$|\mathbf{p} - \mathbf{p}'|^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2;$$

$(x, y)$  и  $(x', y')$  – подходящие декартовы координаты;

$i$  и  $i'$  – линейные плотности тока;

$S \equiv S'$  – токонесущая поверхность катушки;

$W$  – число витков катушки;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная вакуума.

Рассмотрим одновитковую катушку ( $W = 1$ ), индуктивность реального электромагнита пропорциональна квадрату числа витков. В качестве источника магнитного поля рассмотрим электромагнит прямоугольной формы (рис. 1).

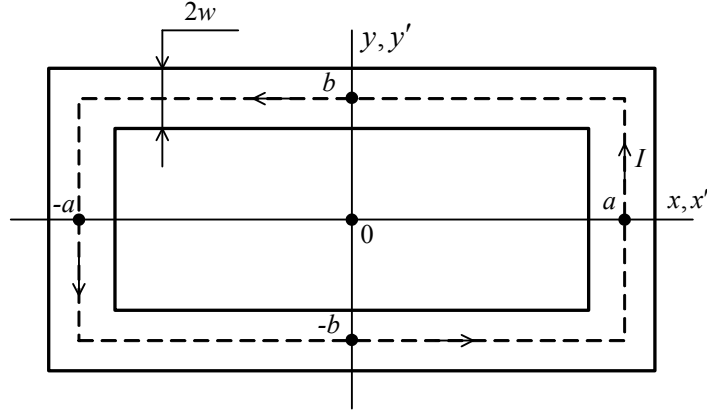


Рис. 1. Расчетная схема экипажного электромагнита

Отметим, что на геометрические параметры данного плоского электромагнита накладывает естественное ограничение:  $0 < w \leq \min(a, b)$ .

Для рассматриваемой конфигурации источника магнитного поля модуль линейной плотности тока определяется равенством  $i = i' = I/2w$ . Переходя в (1) к безразмерным координатам и совершая там же первичное двукратное интегрирование, можно получить следующее выражение для индуктивности плоской катушки прямоугольной формы  $L$ :

$$L = \frac{2\mu_0 P}{\pi} (L(\alpha) + L(\beta) - M(\alpha, \beta) - M(0, 0)), \quad (2)$$

где

$$L(v) = \frac{1}{2} \int_{-\delta}^{\delta} du \int_{-\delta+|u|+v}^{\delta-|u|+v} dv T(u, v), \quad v = \alpha, \beta; \quad (3)$$

$$M(\alpha, \beta) = \int_{-\delta}^{\delta} du (\delta - |u|) T(u + \alpha, u + \beta); \quad (4)$$

$$2\delta^2 T(u, v) = uln \frac{m+u}{m-u} + vln \frac{m+v}{m-v} - 4m. \quad (5)$$

В равенствах (2)–(5) приняты обозначения:

$$\alpha = a/p; \quad \beta = b/p; \quad \delta = w/p; \quad p = a + b; \quad m^2 = u^2 + v^2. \quad (6)$$

В качестве нормирующего множителя при переходе к безразмерным координатам в (2) выбрана величина  $2p$  – полупериметр катушки по средней линии.

Дальнейшее интегрирование квадратуры в (3) приводит к окончательной формуле для  $L(v)$ :

$$\begin{aligned} \frac{L(v)}{v} = & \ln \frac{1+r}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon} \ln(\varepsilon+r) - \frac{(2+r)^2 - 2}{3(1+r)} - \\ & - \frac{1}{3\sqrt{2}\varepsilon^2} \sum_{k=\pm 1} (1+k\varepsilon)^3 \ln \frac{1+\sqrt{2}r-k\varepsilon}{(1+\sqrt{2})(1+k\varepsilon)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $r^2 = 1 + \varepsilon^2$ ;  $\varepsilon = \delta/v$ ; ( $0 < \varepsilon \leq 1$ ).

Слагаемое в сумме из (7) при  $k = -1$  и  $\varepsilon = 1$  доопределяется нулевым значением.

Выражение для  $M(\alpha, \beta)$  из (4) также может быть получено после соответствующих интегральных преобразований:

$$M(\alpha, \beta) = \sum_{k=\pm 1} (Q_k(\alpha, \beta) - Q_0(\alpha, \beta)), \quad (8)$$

где

$$Q_k(\alpha, \beta) \equiv Q(\alpha_k, \beta_k); \quad v_k = v + k\delta; \quad v = \alpha, \beta. \quad (9)$$

Функция  $Q(u, v)$  в (9) представляет собой сумму пяти слагаемых:

$$\begin{aligned} 2\delta^2 Q(u, v) = & \frac{s^2 d}{8} \ln \frac{u(m+u)}{v(m+v)} + \frac{sd^2}{\sqrt{2}} \times \\ & \times \ln \frac{\sqrt{2}m+s}{\sqrt{2}|d|} + \frac{5d^3}{12} \ln \frac{m+d}{\sqrt{2}uv} + \frac{s}{6} (uv - 2d^2) \times \\ & \times \ln \frac{(m+u)(m+v)}{uv} - \frac{2m}{3} (d^2 + uv), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $s = u + v$ ;  $d = u - v = \alpha - \beta$ .

Случай  $u = 0$  ( $v = 0$ ) в (10) отвечает ситуации, когда «окно» катушки представляет собой бесконечно тонкую щель, т. е.  $\delta = \min(\alpha, \beta)$ , формула (10) при этом доопределяется по непрерывности:

$$Q(u, 0) = Q(0, u) = u^3 \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \ln \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) - \frac{2}{3} \right). \quad (11)$$

Второе слагаемое в (10) при  $\alpha = \beta (d = 0)$  равно нулю.

Предельный вариант, задающий плоский электромагнит в форме «проколотого» по центру квадрата ( $\alpha = \beta = \delta$ ), приводит к соотношению  $Q(0, 0) = 0$ .

Поскольку при выводе выражения  $M(\alpha, \beta)$  из (8) использовалось условие  $\alpha + \beta = 1$ , формула для  $M(0, 0)$  не может быть определена посредством равенств (8)–(10), а должна вычисляться непосредственно интегрированием квадратуры (4) с учетом равенств  $\alpha = \beta = 0$ , при этом

$$M(0, 0) = \frac{2\delta}{3} \left( \ln(1 + \sqrt{2}) - \sqrt{2} \right). \quad (12)$$

Равенства (2)–(12) полностью исчерпывают задачу определения *точной* формулы по расчету коэффициента самоиндукции плоской катушки прямоугольной формы.

Выражение для  $L$  при выполнении условия  $\delta \ll \min(\alpha, \beta)$  существенно упрощается, и в результате совершения в (2)–(11) предельного перехода можно получить

$$L \Big|_{\delta \ll \min(\alpha, \beta)} = \frac{2\mu_0 p}{\pi} \left\{ \ln \frac{2\alpha\beta}{\delta} - \alpha \ln(\alpha + \gamma) - \beta \ln(\beta + \gamma) - \frac{1}{2} + 2\gamma + \frac{2\delta}{3} \left( \sqrt{2} - \ln(1 + \sqrt{2}) \right) \right\},$$

где  $\gamma^2 = \alpha^2 + \beta^2$ .

Несмотря на некоторую громоздкость соотношений (2)–(11), входящие в них формулы элементарны, легко программируются и – что очень важно – представляют собой процедуру вычисления *точного* значения искомого коэффициента самоиндукции  $L$ .

Величину  $L$  целесообразно рассчитывать в безразмерном виде. В качестве базовой выберем величину индуктивности плоской катушки  $L_0$ , представляющей собой квадрат с «проколотым» центром. После соответствующих вычислений по формулам (2)–(12) при  $\alpha = \beta = \delta$  можно записать

$$L_D = \frac{\mu_0 P}{\pi} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1 + \ln(1 + \sqrt{2})}{1 + \sqrt{2}} \approx 2,078 \cdot 10^{-7} P, \quad (13)$$

где  $P = 4p$  – периметр квадратной катушки по средней линии.

Результаты численного анализа, показывающего зависимость относительной индуктивности  $L_T/L_D$  от параметра  $e$  при различных значениях «вытянутости» катушки  $\zeta$ , представлены на рис. 2 (числа у кривых соответствуют значениям «вытянутости» катушки). Параметры  $e$  и  $\zeta$ :  $e = w/\min(a, b)$ ,  $\zeta = \max(a, b)/\min(a, b)$ . Пунктирная линия отвечает приближенной формуле  $L|_{\delta \ll \min(\alpha\beta)}/L_D$  при  $\zeta = 1$ . В расчетах периметр катушки по средней линии  $P = 4p$  принимается постоянным,  $L_D$  определено в (13).

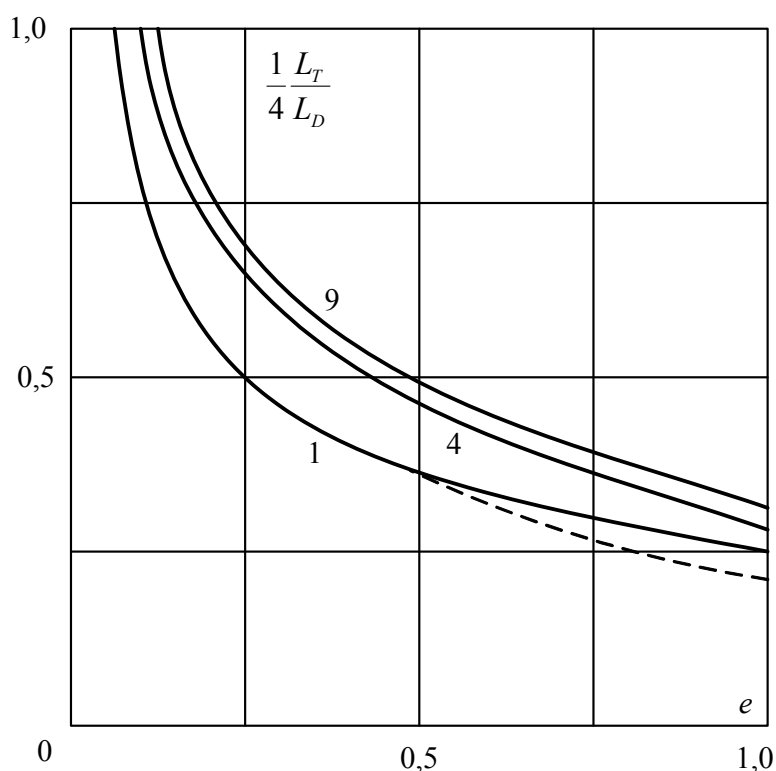


Рис. 2. Зависимость относительной индуктивности плоской катушки прямоугольной формы  $L_T/L_D$  от параметра  $e$

### Заключение

Получено точное аналитическое выражение для величины индукции «тонкого» источника магнитного поля прямоугольной формы в виде алгебраической суммы элементарных функций.

Выведена приближенная формула для вычисления коэффициента самоиндукции, погрешность которой не превышает 14 % в области изменений всех геометрических параметров электромагнита.

Полученные формулы относительно просты по структуре и легко программируются.



## Библиографический список

1. Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю.Ф.Антонов, А.А. Зайцев; под ред. В.П. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. – ISBN 978-5-9221-1540-7.
2. Зайцев А.А. Транспорт на магнитном подвесе / А.А. Зайцев, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова; под ред. А.А. Зайцева. – СПб.: ПГУПС, 2010. – 160 с. – ISBN 978-5-7641-0262-7.
3. Зайцев А.А. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе левитации / А.А. Зайцев, Ю. Ф. Антонов // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии. МТСТ-14: Труды 2-й международной науч. конф., Санкт-Петербург, 17–20 июня 2014 г.; под ред. проф. Ю.Ф. Антонова. – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 11–23. – ISBN 978-5-00090-036-9.
4. Литовченко В.В. 4q-s – четырехквadrантный преобразователь электропоездов переменного тока (принцип работы, анализ и экспериментальные исследования) / В.В. Литовченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – № 3. – С. 63–73.
5. Семенов Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов / Б.Ю. Семенов. – М.: Солон-Р, 2001. – 327 с.
6. Силовые преобразовательные устройства НИИЭФА-ЭНЕРГО. – СПб.: ДиО, 2001. – 15 с.
7. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоиздат, 1986. – 488 с.
8. Матвеев А.Н. Электродинамика / А.Н. Матвеев. – М.: Высш. шк., 1980. – 383 с.
9. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности / М.В. Немцов, Ю.М. Шамаев. – М.: Энергоиздат, 1981. – 136 с.

### Сведения об авторах:

СЕРЕДА Геннадий Евгеньевич, к. т. н., доцент.

E-mail: gennady.sereda@mail.ru

СТРЕПЕТОВ Владимир Михайлович, к. т. н., доцент.

E-mail: strepetov.vm@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

© Середа Г. Е., Стрепетов В. М., 2017

G. E. Sereda, V. M. Strepetov

## DETERMINATION OF INDUCTANCE OF VEHICLE ELECTROMAGNET IN MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT SYSTEM

Data of receipt 11.07.2017

Decision on publication 17.07.2017

**Objective.** Of the work consists in receiving new analytic expressions for determination of inductance of vehicular electromagnets of transport levitation systems.

**Methods.** The key feature of calculation model of onboard coils in accordance with their inductance on the example of squared electromagnets lies an assumption about a smallness of the size «heights» in comparison with its other geometrical sizes. There is also an assumption that thickness of a skin layer of the conductor significantly surpasses cross sectional size of the wire making the coil. The single-turn coil is considered, inductance of an actual electromagnet is accepted proportional to a square of the number of turns. When calculating inductance the dimensionless quantities are used. As an absolute, a quarter of perimeter of the coil on the centerline is chosen. The condition of obtaining the approximate formula for calculation of inductance of the flat rectangular coil is the small thickness of a winding in comparison with the geometrical sizes of the coil.

**Results.** Accurate analytical expression for inductance of a «thin» source of square-shaped magnetic field as the algebraic sum of elementary functions has been received. Results of a numerical analysis show dependence of the relative inductance of the square-shaped flat coil on thickness relation to its minimum size. Influence of «elongation» of the coil (relation of length to width) is investigated. It is noted that inductance decreases with decrease of «elongation», and also with increase in the relation of thickness to the minimum size.

**Practical importance.** The approximate formula for calculation of value of inductance has been obtained. Its uncertainty does not exceed 14 % in the areas of changes of all geometrical parameters of an electromagnet is output. Borders of practical application of the received analytic expressions at the accepted assumptions have been set.

The received expressions are fairly simple structurally and are easily programmed

Inductance of onboard electromagnets, flat coil, skin layer, numerical analysis.

### Introduction

Application of innovative technologies in transportation of both passengers and cargo on the basis of maglev transport systems facilitates increase of efficiency and sustainability of the above systems [1–3].

One of the options of magnetic suspension is a combined system of levitation and traction with a single-phase alternating current. In this case, electromagnets are powered by stationary frequency converters. Permissible values of

voltage are limited by parameters of power semiconductor devices (PS) being used. The today's PSES have a permissible voltage of 5000 V [4–6].

The value of the required voltage in electromagnets is proportionate to their inductance. In this case, the accuracy of determination of inductance largely dictates the reliability of the results, obtained during researches of electromechanical systems.

Calculation of inductance of different conductor systems represents, as a rule, quite a sophisticated technical procedure, associated with awkward calculations even for simple forms of electromagnets.

A large number of referential books on calculation of the above values (see in, for example, Reference [7–9]) contain, mainly, sets of approximate formulae, whose accuracy and zones of application are far from being always specified.

The very article is devoted to determination of value of inductance  $L$  for coils of a specific configuration, in which value of “height” of electromagnet is negligibly low, compared to other geometrical sizes of the coil. Such electromagnets are hereafter referred to as infinitely thin (flat) sources of magnetic field.

It needs to be pointed out, that value of inductance is significantly dependent on frequency of the current running in a coil. Let us surmise, that current  $I$ , determining magnetic field of the system, changes slightly, namely, value of skin layer of a conductor significantly surpasses cross-sectional size of the wire, constituting the coil.

### Methodology of Calculation

The common formula for determination of inductance of a flat source of magnetic field  $L_T$  is given by the following relation [7]:

$$L_T = \frac{\mu_0 W^2}{4\pi I^2} \int_S d\mathbf{p} \int_{S'} d\mathbf{p}' (i, i') / |\mathbf{p} - \mathbf{p}'|, \quad (1)$$

where  $d\mathbf{p} = dx dy$ ,  $d\mathbf{p}' = dx' dy'$ ;

$$|\mathbf{p} - \mathbf{p}'|^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2;$$

$(x, y)$  и  $(x', y')$  – suitable Cartesian system coordinates;

$i$  и  $i'$  – linear current densities;

$S \equiv S'$  – current-carrying surface of a coil,

$W$  – number of turns of a coil;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$  – vacuum permeability.

In this case, single-turn ( $W = 1$ ) coil is considered, inductance of a real electromagnet is proportionate to the square of the number of turns. As a source

of electromagnetic field, let us consider a square-shaped electromagnet. Its calculation scheme is seen from the fig. 1.

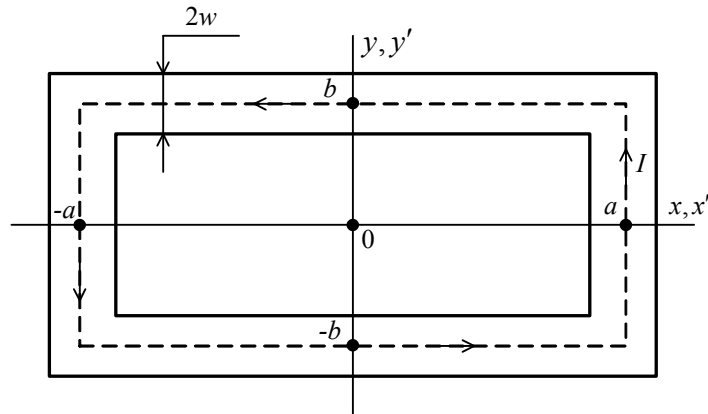


Fig. 1. Calculation scheme of vehicle electromagnet

It is to be pointed out, that natural limits are put on geometrical parameters of this flat electromagnet:  $0 < w \leq \min(a, b)$ .

For the configuration of the source of magnetic field being considered, module of linear current density is defined by equation  $i = i' = I/2w$ . Proceeding to the point (1) of dimensionless coordinates and committing there a primary double integration, one may obtain the following expression for inductance of a flat square-shaped coil  $L$ :

$$L = \frac{2\mu_0 P}{\pi} (L(\alpha) + L(\beta) - M(\alpha, \beta) - M(0, 0)), \quad (2)$$

where

$$L(v) = \frac{1}{2} \int_{-\delta}^{\delta} du \int_{-\delta+|u|+v}^{\delta-|u|+v} dv T(u, v), \quad v = \alpha, \beta; \quad (3)$$

$$M(\alpha, \beta) = \int_{-\delta}^{\delta} du (\delta - |u|) T(u + \alpha, u + \beta); \quad (4)$$

$$2\delta^2 T(u, v) = u \ln \frac{m+u}{m-u} + v \ln \frac{m+v}{m-v} - 4m. \quad (5)$$

In equations (2)–(5) the following notation is accepted:

$$\alpha = a/p; \quad \beta = b/p; \quad \delta = w/p; \quad p = a + b; \quad m^2 = u^2 + v^2. \quad (6)$$

As a normalising factor for transition to dimensionless coordinates in (2) the value  $2p$  has been chosen – semiperimeter of a coil at the medium line.

Further integration of quadrature in (3) leads to the final formula for  $L(v)$ :

$$\begin{aligned} \frac{L(v)}{v} = & \ln \frac{1+r}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon} \ln(\varepsilon+r) - \frac{(2+r)^2 - 2}{3(1+r)} - \\ & - \frac{1}{3\sqrt{2}\varepsilon^2} \sum_{k=\pm 1} (1+k\varepsilon)^3 \ln \frac{1+\sqrt{2}r-k\varepsilon}{(1+\sqrt{2})(1+k\varepsilon)}, \end{aligned} \quad (7)$$

where  $r^2 = 1 + \varepsilon^2$ ;  $\varepsilon = \delta/v$ ; ( $0 < \varepsilon \leq 1$ ).

The summand in the sum of (7) with  $k = -1$  and  $\varepsilon = 1$  is further defined by zero value.

Expression for  $M(\alpha, \beta)$  from (4) may also be obtained after corresponding integral transformations are conducted:

$$M(\alpha, \beta) = \sum_{k=\pm 1} (Q_k(\alpha, \beta) - Q_0(\alpha, \beta)), \quad (8)$$

where

$$Q_k(\alpha, \beta) \equiv Q(\alpha_k, \beta_k); \quad v_k = v + k\delta; \quad v = \alpha, \beta. \quad (9)$$

Function  $Q(u, v)$  in (9) represents an addition of five summands:

$$\begin{aligned} 2\delta^2 Q(u, v) = & \frac{s^2 d}{8} \ln \frac{u(m+u)}{v(m+v)} + \frac{sd^2}{\sqrt{2}} \times \\ & \times \ln \frac{\sqrt{2}m+s}{\sqrt{2}|d|} + \frac{5d^3}{12} \ln \frac{m+d}{\sqrt{2}uv} + \frac{s}{6} (uv - 2d^2) \times \\ & \times \ln \frac{(m+u)(m+v)}{uv} - \frac{2m}{3} (d^2 + uv), \end{aligned} \quad (10)$$

where  $s = u + v$ ;  $d = u - v = \alpha - \beta$ .

The case  $u = 0$  ( $v = 0$ ) in (10) meets the situation when “the window” of a coil is an infinitively thin slot, that is  $\delta = \min(\alpha, \beta)$ , formula (10), in its turn, is further defined by continuity:

$$Q(u, 0) = Q(0, u) = u^3 \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \ln \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) - \frac{2}{3} \right). \quad (11)$$

The second summand in (10) with  $\alpha = \beta(d = 0)$  equals zero.

The limiting variant, defining a flat electromagnet as a “pierced” in the centre square ( $\alpha = \beta = \delta$ ) leads to relation  $Q(0, 0) = 0$ .

Since during deriving the expression  $M(\alpha, \beta)$  form (8) the condition  $\alpha + \beta = 1$  was used, the formula for  $M(0, 0)$  cannot be defined by means of equations (8)–(10), but should be calculated directly by integrating quadrature (4) taking into account equations  $\alpha = \beta = 0$ , thus

$$M(0, 0) = \frac{2\delta}{3} \left( \ln(1 + \sqrt{2}) - \sqrt{2} \right). \quad (12)$$

Equations (2)–(12) completely exhaust the problem of determination of an *accurate* formula for calculation of coefficient of self-inductance of a flat square-shaped coil.

Expression for  $L$  by completing the condition  $\delta \ll \min(\alpha, \beta)$  is significantly simplified, and in the result of completion in (2)–(11) of a corresponding maximum transition, one can obtain

$$L|_{\delta \ll \min(\alpha, \beta)} = \frac{2\mu_0 p}{\pi} \left\{ \ln \frac{2\alpha\beta}{\delta} - \alpha \ln(\alpha + \gamma) - \right. \\ \left. - \beta \ln(\beta + \gamma) - \frac{1}{2} + 2\gamma + \frac{2\delta}{3} \left( \sqrt{2} - \ln(1 + \sqrt{2}) \right) \right\},$$

where  $\gamma^2 = \alpha^2 + \beta^2$ .

Despite some awkwardness of the relations (2)–(11), the formulae constituting them are elementary, are easy programmed and, which is very important, they represent themselves a procedure of calculation of an *accurate* value of the required self-inductance coefficient  $L$ .

It is advisable to conduct calculation of the value  $L$  in a dimensionless form. As a basic value, let us choose a value of inductance of a flat coil  $L_0$ , having a form of square, “pierced” in the centre. After calculations according to formulae (2)–(12) with  $\alpha = \beta = \delta$  we can write down

$$L_D = \frac{\mu_0 P}{\pi} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1 + \ln(1 + \sqrt{2})}{1 + \sqrt{2}} \approx 2,078 \cdot 10^{-7} P, \quad (13)$$

where  $P = 4p$  – perimeter of a square coil on the medium line.

The results of a numerical analysis, showing the dependence of relative inductance  $L_T/L_D$  from the parameter  $e$  at different values of "elongation" of coil  $\zeta$ , are represented in the fig. 2 (figures on the curves correspond to the values of "elongation" of coil). Parameters  $e$  and  $\zeta$ , respectively, are equal:  $e = w/\min(a, b)$ ,  $\zeta = \max(a, b)/\min(a, b)$ . The dashed line corresponds to the approximate formula  $L|_{\delta \ll \min(\alpha, \beta)}/L_D$  with  $\zeta = 1$ . In calculations, perimeter of a coil along the medium line  $P = 4p$  is view as constant,  $L_D$  is defined in (13).

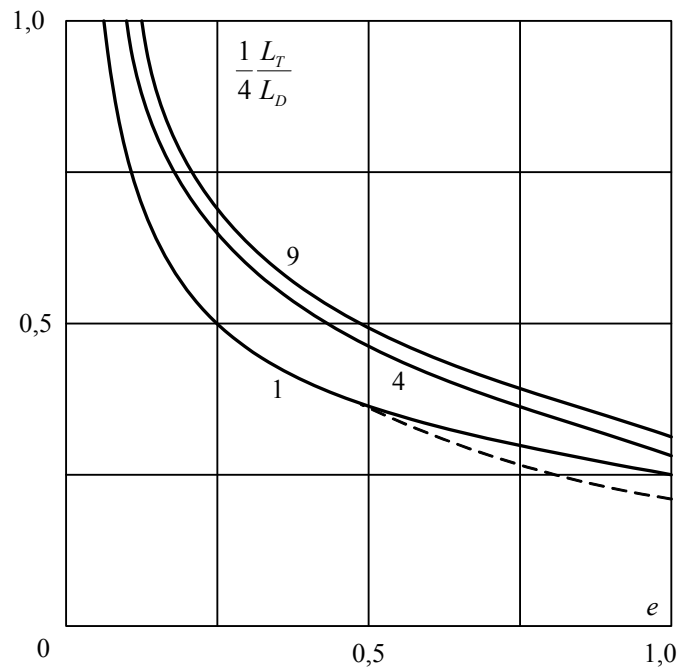


Fig. 2. Dependence of relative inductance of a flat square-shaped coil  $L_T/L_D$  from the parameter  $e$

## Conclusion

The accurate analytical expression for value of inductance of a "thin" source of a square-shaped magnetic field in the form of algebraic sum of elementary functions was obtained.

The approximate formula for calculation of value of inductance has been obtained. Its uncertainty does not exceed 14 % in the areas of changes of all geometrical parameters of an electromagnet is output.

The obtained expressions are fairly simple structurally and are easily programmed.

## References

1. Antonov Y.F., Zaitsev A.A. Magnetic Levitation Transport Technology. [Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya]. Moscow, 2014. 476 p.
2. Zaitsev A.A., Talashkin G.N., Sokolova Ya.V. Magnetic Suspension Transport [Transport na magnitnom podvese]. St. Petersburg, 2010. 160 p.
3. Zaitsev A.A., Antonov Yu.F. Container Bridge St. Petersburg – Moscow on the Basis of Levitation [Konteynernyi most Sankt-Peterburg – Moskva na osnove levitatsii]. *Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Magnetic Levitation Transport Systems and Technologies [Magnitolevitatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii]*. Kirov, 2014, pp. 11–23.
4. Litovchenko V.V. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2000, no. 3, pp. 63–73.
5. Semenov B.Yu. Power Plants for Amateurs and Professionals [Silovaya elektronika dlya lyubitelei i professionalov]. Moscow, Solon-R, 2001. 327 p.
6. Power transformers NIEFA-ENERGY [Silovye preobrazovatel'nye ustroystva NIEFA-ENERGO]. St. Petersburg, 2001. 15 p.
7. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. Calculation of Inductances [Raschet induktivnostei]. Leningrad, 1986. 488 p.
8. Matveev A.N. Electrical Dynamics [Elektrodinamika]. Moscow, Vysshaya shkola, 1980. 383 p.
9. Nemtsov M.V., Shamaev Yu.M. Reference Book on Calculation of Coil Inductance Parameters [Spravochnik po raschetu parametrov katushek induktivnosti]. Moscow, Energoizdat, 1981. 136 p.

### Information about the authors:

Gennady E. SEREDA, Cand. sci. (Eng.), Associate Prof.

E-mail: gennady.sereda@mail.ru

Vladimir M. STREPETOV, Cand. sci. (Eng.), Associate Prof.

E-mail: strepetov.vm@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

© Sereda G. E., Strepetov V. M., 2017



С. Е. Александров, Е. А. Лямина

## НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ПЛОСКОДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Дата поступления 01.10.2017

Решение о публикации 26.10.2017

**Введение.** Система уравнений, состоящая из условия текучести Кулона – Мора и уравнений равновесия, может быть исследована независимо от закона течения. Эта система уравнений является гиперболической, поэтому для решения рассматриваемой системы уравнений целесообразно использовать метод характеристик. В частном случае теории пластичности для материалов, условие текучести которых не зависит от среднего напряжения, применяют два метода для построения ортогональной сетки характеристик и определения поля напряжений:  $R$ – $S$  метод и метод координат Михлина. При условии текучести Кулона – Мора угол между характеристическими направлениями зависит от угла внутреннего трения. В связи с этим названные выше методы должны быть обобщены с учетом этого свойства характеристик.

**Цель.** В теории пластичности материалов, условие текучести которых не зависит от среднего давления, для расчета поля напряжений широко применяется метод координат Михлина. Цель нашей работы – обобщить этот метод в систему уравнений, состоящую из условия текучести Кулона – Мора и уравнений равновесия.

**Метод.** Используются геометрические свойства характеристик системы уравнений, состоящей из условия текучести Кулона – Мора и уравнений равновесия, для введения обобщенных координат Михлина.

**Результаты.** Показано, что решение системы уравнений, состоящей из условия текучести Кулона – Мора и уравнений равновесия, сводится к решению телеграфного уравнения и к последующему интегрированию.

**Практическая значимость.** Развитый метод решения системы уравнений, состоящей из условия текучести Кулона – Мора и уравнений равновесия, позволяет получать решения с высокой точностью при незначительных затратах машинного времени.

Условие текучести Кулона – Мора, метод характеристик, координаты Михлина, телеграфное уравнение.

### Введение

Для плоскодеформированного состояния идеально жесткопластического и идеально упругопластического тела уравнения для напряжений в пластической зоне состоят из условия текучести и двух уравнений равновесия. Эта система уравнений может быть исследована без привлечения

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта №17-20-03215.

закона течения. Во многих случаях отмеченная система уравнений является гиперболической [1]. Определение поля напряжений сводится к определению поля характеристик. При условии текучести, которое не зависит от среднего напряжения, широко применяются два метода построения поля характеристик:  $R$ – $S$ -метод, предложенный в [2], и метод координат Михлина [1, 3, 4]. Целесообразность применения того или иного метода зависит от заданных краевых условий. Для сыпучих сред условие текучести зависит от среднего напряжения [5, 6]. Как следует из современных обзорных работ [7, 8], до настоящего времени наиболее широко применяемым условием текучести такого типа является условие Кулона – Мора. В частности, это условие в основном используется в получившей широкое распространение модели [9] и в современной модели для гранулированных и сыпучих материалов, развитой в [10]. Для построения поля характеристик системы уравнений, состоящей из условия текучести Кулона – Мора и уравнений равновесия,  $R$ – $S$ -метод обобщен в [11]. В публикуемой работе для построения поля характеристик этой системы уравнений обобщается метод координат Михлина. Показано, что когда оба семейства характеристик криволинейны, решение краевой задачи сводится к решению телеграфного уравнения. Методы решения этого уравнения при краевых условиях, типичных для моделей идеально жесткопластического и идеально упругопластического тела, хорошо изучены [1, 3, 4]. Отметим, что предлагаемый метод определения напряженного состояния может использоваться и для ряда металлических материалов, как следует из [12–15].

### Обобщенные координаты Михлина

Рассмотрим произвольную плоскую ортогональную систему координат  $(\xi, \eta)$  и декартову систему координат  $(x, y)$ . Обе системы координат показаны на рис. 1. Рассмотрим произвольную точку  $P$ , определяемую радиусом-вектором  $\mathbf{R}$ , начало которого совпадает с началом декартовой системы координат. Введем прямолинейную координату  $\bar{y}$ , отсчитываемую от начала декартовой системы координат по направлению координаты  $\eta$  в точке  $P$ , и прямолинейную координату  $\bar{x}$ , отсчитываемую от начала декартовой системы координат по направлению координаты  $\xi$  в точке  $P$ . Пусть  $\mathbf{e}_1$  и  $\mathbf{e}_2$  – единичные векторы по направлениям осей  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ , соответственно.

Так как криволинейные координаты ортогональны, то очевидно, что ортогональны и координаты Михлина (рис. 1). Характеристики системы уравнений, состоящей из условия текучести, не зависящего от среднего напряжения, и уравнений равновесия, ортогональны. Поэтому можно принять, что  $(\xi, \eta)$  являются характеристическими координатами. В этом случае величины  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  по отдельности удовлетворяют телеграфному уравне-

нию [1, 3, 4]. Характеристики системы уравнений, состоящей из условия текучести Кулона – Мора и уравнений равновесия, не являются ортогональными [5]. Обозначим соответствующие характеристические координаты  $(\alpha, \beta)$ . Без ограничения общности можно принять, что направление максимального (в алгебраическом смысле) главного напряжения  $\sigma_1$  проходит через первый и третий квадранты (рис. 2).

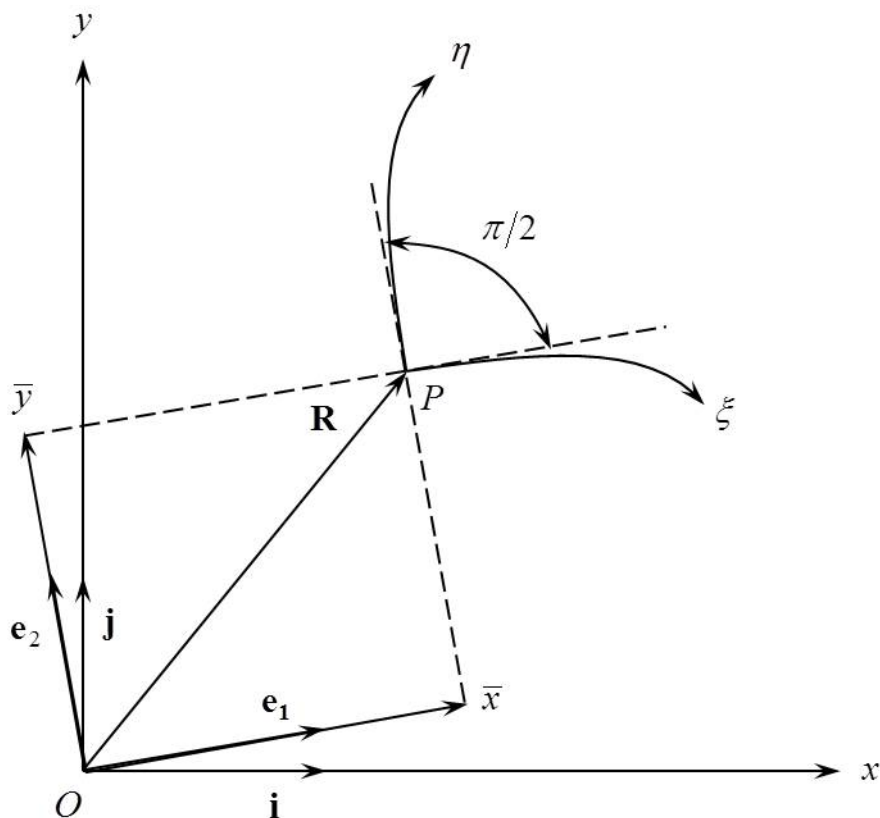


Рис. 1. Ортогональные координаты Михлина

Тогда координаты Михлина  $(\bar{x}, \bar{y})$  точки  $P$  определяются из уравнения

$$\mathbf{R} = \bar{x}\mathbf{e}_1 + \bar{y}\mathbf{e}_2. \quad (1)$$

Угол между направлением этого главного напряжения и каждым из характеристических направлений равен  $\pi/4 + \phi/2$  [5], где  $\phi$  – угол внутреннего трения. Если угол внутреннего трения является постоянной величиной, то угол между координатными кривыми характеристической системы координат тоже всюду является постоянной величиной. Обобщим для таких систем координат определение координат Михлина. Аналогично случаю ортогональных систем координат введем прямолинейную координату  $\bar{y}$ , отсчитываемую от начала декартовой системы координат по направлению



$$x = \bar{x} \cos \varphi - \bar{y} \sin(\varphi + \phi); \quad y = \bar{x} \sin \varphi + \bar{y} \cos(\varphi + \phi). \quad (4)$$

Решая эти уравнения относительно  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ , получим

$$\bar{x} = \frac{x \cos(\varphi + \phi) + y \sin(\varphi + \phi)}{\cos \phi}; \quad \bar{y} = \frac{y \cos \varphi - x \sin \varphi}{\cos \phi}.$$

Дифференцируя первое уравнение по  $\beta$ , а второе по  $\alpha$ , найдем

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{x}}{\partial \beta} \cos \phi &= \frac{\partial x}{\partial \beta} \cos(\varphi + \phi) + \frac{\partial y}{\partial \beta} \sin(\varphi + \phi) + \\ &+ [y \cos(\varphi + \phi) - x \sin(\varphi + \phi)] \frac{\partial \varphi}{\partial \beta}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{y}}{\partial \alpha} \cos \phi = \frac{\partial y}{\partial \alpha} \cos \varphi - \frac{\partial x}{\partial \alpha} \sin \varphi - (y \sin \varphi + x \cos \varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha}.$$

Уравнения характеристик имеют вид [5]

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi, \quad \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \left( \varphi + \phi + \frac{\pi}{2} \right) = -\operatorname{ctg}(\varphi + \phi). \quad (6)$$

Здесь первое уравнение определяет линии семейства  $\alpha$ , а второе – линии семейства  $\beta$ . Уравнения (6) могут быть переписаны в виде

$$\frac{\partial y}{\partial \alpha} = \operatorname{tg} \varphi \frac{\partial x}{\partial \alpha}; \quad \frac{\partial y}{\partial \beta} = -\operatorname{ctg}(\varphi + \phi) \frac{\partial x}{\partial \beta}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{x}}{\partial \beta} \cos \phi &= [y \cos(\varphi + \phi) - x \sin(\varphi + \phi)] \frac{\partial \varphi}{\partial \beta}; \\ \frac{\partial \bar{y}}{\partial \alpha} \cos \phi &= -(y \sin \varphi + x \cos \varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha}. \end{aligned}$$

Исключая в этих уравнениях  $x$  и  $y$  с помощью (4), найдем

$$\frac{\partial \bar{x}}{\partial \beta} \cos \phi = (\bar{y} - \bar{x} \sin \phi) \frac{\partial \varphi}{\partial \beta}; \quad \frac{\partial \bar{y}}{\partial \alpha} \cos \phi = (\bar{y} \sin \phi - \bar{x}) \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha}. \quad (8)$$

Единственное свойство системы координат  $(\alpha, \beta)$ , которое использовалось при выводе (8), состоит в том, что скалярное произведение  $\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2$  – постоянная величина.

### Напряженное состояние в сыпучей среде

Уравнения (8) упрощаются при учете свойств характеристических кривых системы уравнений, состоящей из условия текучести Кулона – Мора и уравнений равновесия. В частности, в [11] показано, что

$$\varphi - \varphi_0 = (\alpha + \beta) \cos \phi, \quad (9)$$

где  $\varphi_0$  – постоянная, введенная для удобства. Подставляя (9) в (8), найдем

$$\frac{\partial \bar{x}}{\partial \beta} = \bar{y} - \bar{x} \sin \phi; \quad \frac{\partial \bar{y}}{\partial \alpha} = \bar{y} \sin \phi - \bar{x}. \quad (10)$$

Отметим, что при  $\phi = 0$  эти уравнения совпадают с уравнениями, получаемыми в теории пластичности материалов, условие текучести которых не зависит от среднего напряжения [1, 3, 4]. Введем новые зависимые переменные  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  по формулам

$$\bar{x} = \bar{X} \exp(n\alpha + m\beta); \quad \bar{y} = \bar{Y} \exp(n\alpha + m\beta). \quad (11)$$

Здесь  $n$  и  $m$  – некоторые постоянные. Подставляя (11) в (10), получим

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial \beta} + m\bar{X} = \bar{Y} - \bar{X} \sin \phi; \quad \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \alpha} + n\bar{Y} = \bar{Y} \sin \phi - \bar{X}. \quad (12)$$

Принимая  $m = -\sin \phi$  и  $n = \sin \phi$ , приведем уравнения (12) к виду

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial \beta} = \bar{Y}; \quad \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \alpha} = -\bar{X}. \quad (13)$$

Кроме того, уравнения (11) примут форму

$$\bar{x} = \bar{X} \exp[(\alpha - \beta) \sin \phi]; \quad \bar{y} = \bar{Y} \exp[(\alpha - \beta) \sin \phi]. \quad (14)$$

Уравнения (13) приводятся к телеграфным уравнениям вида

$$\frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial \alpha \partial \beta} + \bar{X} = 0; \quad \frac{\partial^2 \bar{Y}}{\partial \alpha \partial \beta} + \bar{Y} = 0. \quad (15)$$

Эти уравнения решаются методом Римана. В частности, вдоль любого замкнутого контура имеет место уравнение

$$\oint \left[ \left( G \frac{\partial f}{\partial \alpha} - f \frac{\partial G}{\partial \alpha} \right) d\alpha + \left( f \frac{\partial G}{\partial \beta} - G \frac{\partial f}{\partial \beta} \right) d\beta \right] = 0.$$

Здесь  $f \equiv \bar{X}$  или  $f \equiv \bar{Y}$ ,  $G(a, b, \alpha, \beta)$  – функция Грина. Причем

$$G(a, b, \alpha, \beta) \equiv J_0 \left[ 2\sqrt{(a-\alpha)(b-\beta)} \right],$$

где  $J_0 \left[ 2\sqrt{(a-\alpha)(b-\beta)} \right]$  – функция Бесселя нулевого порядка.

Имея решение уравнений (15), можно найти зависимость  $x$  и  $y$  от  $\alpha$  и  $\beta$ . Действительно, уравнения (14) дают зависимость  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  от  $\alpha$  и  $\beta$ , тогда уравнения (4) и (9) – зависимость  $x$  и  $y$  от  $\alpha$  и  $\beta$ . Зависимость квадратичного инварианта тензора напряжения от  $\alpha$  и  $\beta$  имеет вид [11]

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = q_0 \exp[2(\beta - \alpha) \sin \phi]. \quad (16)$$

где  $\sigma_2$  – наименьшее (в алгебраическом смысле) главное напряжение;  
 $q_0$  – произвольная постоянная.

Условие текучести Кулона – Мора имеет вид

$$q - p \sin \phi = k \cos \phi, \quad (17)$$

где  $p = -(\sigma_1 + \sigma_2)/2$  и  $k$  – коэффициент сцепления, являющийся постоянной величиной. Уравнения (16) и (17) определяют  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  как функции  $\alpha$  и  $\beta$ . Учитывая (11), зависимости компонент тензора напряжения в декартовых координатах от  $\alpha$  и  $\beta$  находят с помощью стандартных уравнений преобразования компонент тензора в плоскости. Таким образом, с учетом имеющейся зависимости  $x$  и  $y$  от  $\alpha$  и  $\beta$  зависимости компонент тензора напряжения в декартовых координатах от  $x$  и  $y$  получены в параметрическом виде.

## Заключение

Показано, что методы, развитые ранее для построения поля напряжений при плоской деформации материала, подчиняющегося условию текучести, не зависящему от среднего напряжения, с помощью координат Михлина, полностью применимы для материалов, подчиняющихся условию текучести Кулона – Мора. Для этого достаточно ввести обобщенные координаты Михлина  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  (рис. 2), а также вспомогательные функции  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$  по формулам (14). Эти вспомогательные функции удовлетворяют телеграфному уравнению (15). Такому же уравнению удовлетворяют координаты Михлина в теории пластичности, основанной на условии текучести, не зависящим от среднего напряжения. Методы решения соответствующих краевых задач хорошо развиты [1, 3, 4]. Все эти методы практически без изменений могут быть использованы для определения напряжений в сыпучей среде.

## Библиографический список

1. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: Гостехиздат, 1956. – 407 с.
2. Hill R. A Method of Numerical Analysis of Plastic Flow in Plane Strain and Its Application to the Compression of a Ductile Material Between Rough Plates / R. Hill, E.H. Lee, S.J Tupper // ASME J. Appl. Mech. – 1951. Vol. 18, № 1. – P. 46–52.
3. Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов. – М.: Гостехиздат, 1956. – 324 с.
4. Друянов Б.А. Теория технологической пластичности / Б.А. Друянов, Р.И. Непершин. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
5. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Физматлит, 1960. – 243 с.
6. Николаевский В.Н. Механические свойства грунтов и теория пластичности / В.Н. Николаевский // Итоги науки и техники. Сер. Механика твердых деформируемых тел. – 1972. – № 6. – 85 с.
7. Cox G.M. Coulomb-Mohr Granular Materials: Quasi-Static Flows and the Highly Frictional Limit / G.M. Cox, N. Thamwattana, S.W. McCue, J.M. Hill // Appl. Mech. Rev. – 2008. – Vol. 61. – Paper 060802.
8. Goddard J.D. Continuum modeling of granular media / J.D. Goddard // Appl. Mech. Rev. – 2014. – Vol. 66. – Paper 050801.
9. Spencer A.J.M. A Theory of the Kinematics of Ideal Soils Under Plane Strain Conditions / A.J.M. Spencer // J. Mech. Phys. Solids. – 1964. – Vol. 12. – P. 337–351.



10. Harris D. A hyperbolic Augmented Elasto-Plastic Model for Pressure-Dependent Yield / D. Harris // *Acta Mech.* – 2014. – Vol. 225. – P. 2277–2299.
11. Alexandrov S. Geometry of plane strain characteristic fields in pressure-dependent plasticity / S. Alexandrov // *ZAMM.* – 2015. – Vol. 95. – P. 1296–1301.
12. Spitzig W.A. The Effect of Hydrostatic Pressure on the Deformation Behavior of Maraging and HY-80 Steels and Its Implications for Plasticity Theory / W.A. Spitzig, R.J. Sober, O. Richmond // *Metallurg. Trans.* – 1976. – 7A. – P. 1703–1710.
13. Kao A.S. Influence of Superimposed Hydrostatic Pressure on Bending Fracture and Formability of a Low Carbon Steel Containing Globular Sulfides / A.S. Kao, H.A. Kuhn, W.A. Spitzig, O. Richmond // *ASME J. Engng Mater. Technol.* – 1990. – Vol. 112. – P. 26–30.
14. Wilson C.D. A Critical Reexamination of Classical Metal Plasticity / C.D. Wilson // *ASME J. Appl. Mech.* – 2002. – Vol. 69. – № 1. – P. 63–68.
15. Liu P.S. Mechanical Behaviors of Porous Metals Under Biaxial Tensile Loads / P.S. Liu // *Mater. Sci. Engng.* – 2006. – Vol. A422. – P. 176–183.

**Сведения об авторах:**

АЛЕКСАНДРОВ Сергей Евгеньевич, д. ф.-м. н., доцент, в. н. с.

E-mail: sergei\_alexandrov@spartak.ru

ЛЯМИНА Елена Алексеевна, к. ф.-м. н., доцент.

E-mail: lyamina@inbox.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики РАН (Москва)

© Александров С. Е., Лямина Е. А., 2017

**S. E. Alexandrov, E. A. Lyamina**

## **A NEW METHOD OF CALCULATING THE STATE OF STRESS IN GRANULAR MATERIALS UNDER PLANE STRAIN CONDITIONS**

Data of receipt 01.10.2017

Decision on publication 26.10.2017

The system of equations comprising the Mohr-Coulomb yield condition and the stress equilibrium equations may be studied independently of the flow law. This system of equations is hyperbolic. Accordingly, to solve the aforementioned system of equations, it is reasonable to apply the method of characteristics. In the special case of plasticity theory for materials whose yield criterion does not depend on the average stress, two methods are used to construct an orthogonal net of characteristics and to determine the stress field: the R-S method and Mikhlin's coordinate method. In the case of the Mohr-Coulomb yield condition, the angle between the characteristic directions depends on the internal friction angle. Therefore, the above-mentioned methods should be generalised in accordance with this property of characteristics.

**Purpose.** In the case of Plasticity theory for materials whose yield strength does not depend on the average stress, to calculate the stress field, Mikhlin's coordinate method is widely used. The purpose of this study is to generalise this method for the equation system consisting of the Mohr-Coulomb yield criterion and the pressure equilibrium equations.

**Methods.** The geometrical properties of the characteristics of the equations' system consisting of the Mohr-Coulomb yield condition and the equilibrium equations are used to introduce the generalised Mikhlin coordinates.

**Results.** It's been pointed out that solving equation system consisting of the Mohr-Coulomb yield condition and equilibrium equation comes to solving equation of telegraphy and to subsequent integration.

**Practical Significance.** The developed method of system of equations' solution, consisting of the Mohr-Coulomb yield condition and equilibrium equation enables obtaining high precision solutions at insignificant computer time expenditures.

Mohr-Coulomb yield condition, method of characteristics, Mikhlin's variables, equation of telegraphy.

### **Introduction**

The plane strain deformation state of perfect rigid plastic solid and elastic-perfectly plastic solid the stress equations in the plastic zone consist of the yield condition and two equilibrium equations. This system of equations may be studied without invoking the flow law. In many cases, the above-mentioned system of equations is hyperbolic [1]. Determination of the stress field is brought to determination of the characteristics field. In the case of the yield condition equation which is not dependent upon the average stress, the two methods of con-

struction of characteristics field are used: the R–S method, suggested in [2], and Mikhlin’s coordinates method [1, 3, 4]. The relevance of application this or that method of characteristics depends on the set boundary conditions. In the case of granular medium, the yield condition depends on the average stress [5, 6]. As it goes out of today’s surveys [7, 8], by now the most widely used yield condition of such a type has been the Mohr-Coulomb yield condition. In particular, this condition is used in a widespread model [9] and in a modern model for granular materials, developed in [10]. To construct the field of characteristics of the system of equations consisting of the Mohr-Coulomb yield condition and the equilibrium equations, the R–S method is generalised in [11]. In this study, the method of Mikhlin’s coordinates is generalised to construct the field of characteristics of this system of equations. It is shown that in the case when both characteristics are curvilinear, the solution of the boundary value task is brought to solution of the telegraph equation. The methods for solving this equation under boundary conditions, typical for models of perfect rigid plastic solid and elastic-perfectly plastic solid, have been well studied [1, 3, 4].

Let us point out that, the suggested method for determination of stress condition may be used for a range of metal materials as well, as it follows from [12–15].

### **Generalised Mikhlin’s coordinates**

Let us consider arbitrary plane orthogonal coordinate system  $(\xi, \eta)$  and the Cartesian coordinate system  $(x, y)$ . Both the systems are shown in the fig. 1. Let us consider arbitrary point  $P$ , determined by the radius vector  $\mathbf{R}$ , the beginning of which coincides with the beginning of the Cartesian coordinate system. We introduce a rectilinear coordinate  $\bar{y}$ , counted from the beginning of the Cartesian coordinate system in the direction of the coordinate  $\eta$  in the point  $P$ , and a rectilinear coordinate  $\bar{x}$ , counted from the beginning of the Cartesian coordinate system in the direction of the coordinate  $\xi$  in the point  $P$ . Let  $\mathbf{e}_1$  and  $\mathbf{e}_2$  be unit vectors in the direction of axes  $\bar{x}$  and  $\bar{y}$  respectively.

Since the curvilinear coordinates are orthogonal, it is obvious that the Mikhlin’s coordinates are also orthogonal (fig. 1). The characteristics of the system of equations consisting of the yield condition which is independent of the average stress, and the equilibrium equations, are orthogonal. Therefore, we can accept that are characteristic coordinates. In this case, the values and separately satisfy the telegraph equation [1, 3, 4]. The characteristics of the system of equations consisting of the Mohr-Coulomb yield condition and the equilibrium equations are not orthogonal [5]. Let us denote the corresponding characteristic coordinates. Without loss of generality, we can assume that the direction of the maximum (in the algebraic sense) of the main stress passes through the first and the third quadrants (fig. 2).

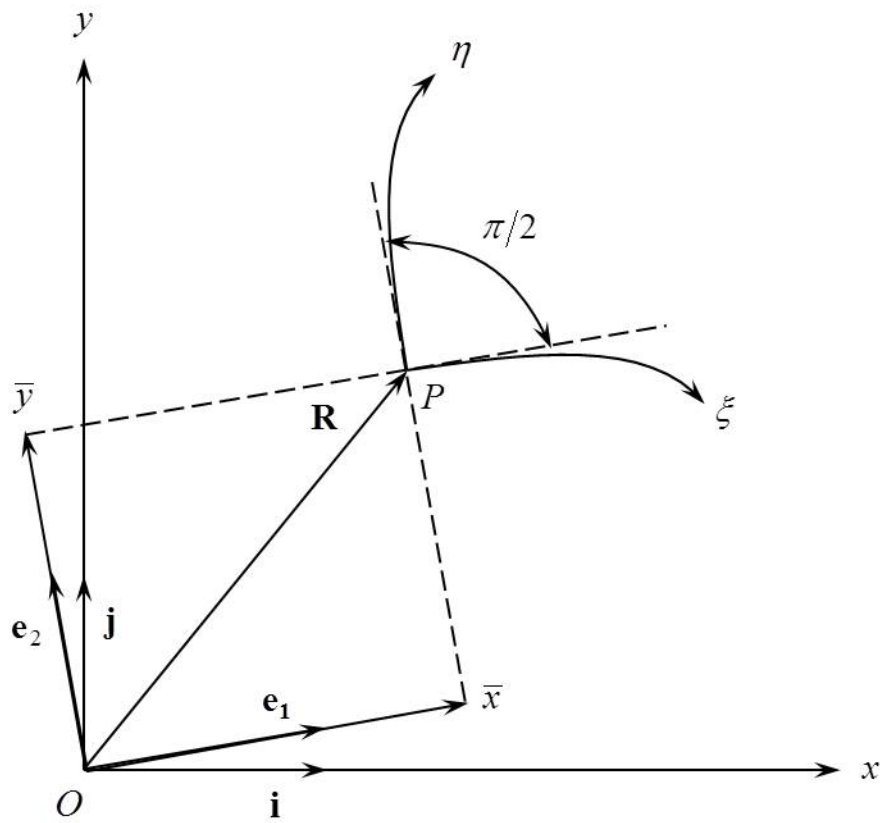


Fig. 1. Mikhlín's orthogonal coordinates

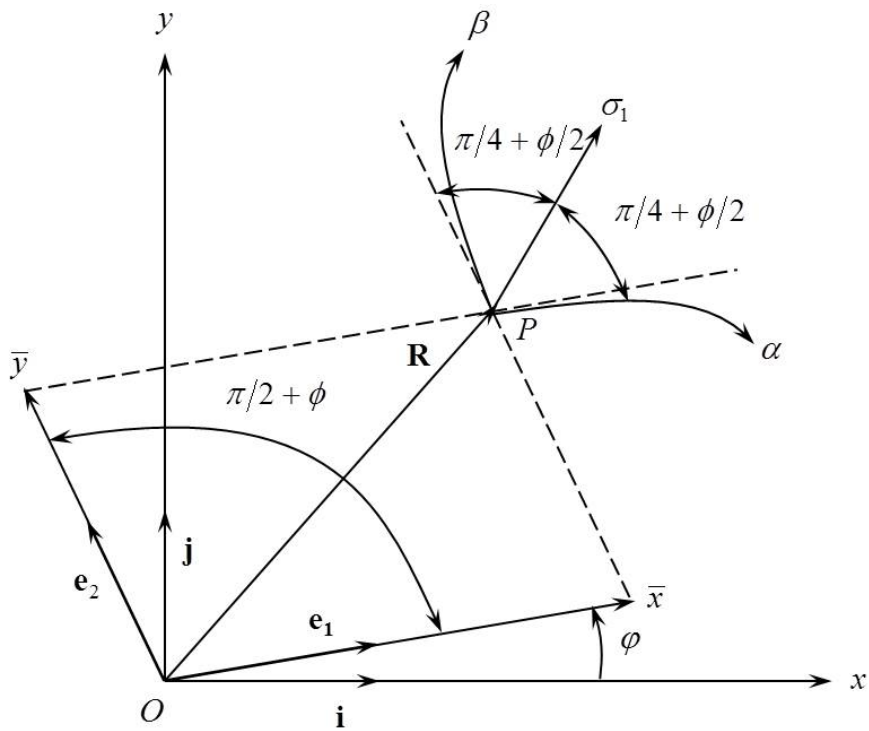


Fig. 2. Mikhlín's orthogonal coordinates

Then Mikhlin's coordinates  $(\bar{x}, \bar{y})$  of the point  $P$  are determined from the equation

$$\mathbf{R} = \bar{x}\mathbf{e}_1 + \bar{y}\mathbf{e}_2. \quad (1)$$

Then, the angle between the direction of this main stress and each of the characteristic directions equals  $\pi/4 + \phi/2$  [5], where  $\phi$  – angle of internal friction. If the angle of internal friction is a constant value, then the angle between coordinate curves of the characteristic system of the coordinates is a constant value everywhere. Let us generalise definition of Mikhlin's coordinates for these systems. Just like in the case of orthogonal coordinate systems, we introduce a rectilinear coordinate  $\bar{y}$ , counted from the beginning of the Cartesian coordinate system in the direction of the coordinate  $\beta$  in the point  $P$ , and a rectilinear coordinate  $\bar{x}$ , counted from the Cartesian coordinate system in the direction of the coordinate  $\alpha$  in the point  $P$ . It is obvious that now the system of coordinates  $(\bar{x}, \bar{y})$  does not appear orthogonal. However, the equation (1) is valid, if the vectors  $\mathbf{e}_1$  and  $\mathbf{e}_2$  are directed along the new axes  $\bar{x}$  and  $\bar{y}$ , respectively. This equation can be written as follows:

$$x\mathbf{i} + y\mathbf{j} = \bar{x}\mathbf{e}_1 + \bar{y}\mathbf{e}_2, \quad (2)$$

here  $\mathbf{i}$  and  $\mathbf{j}$  are unit vectors of the Cartesian coordinate system. Let  $\varphi$  be the angle between the axis  $x$  and the tangent to the line  $\alpha$  in the point  $P$ . Then, following the definition,  $\varphi$  is the angle between the axes  $x$  and  $\bar{x}$  in the point  $O$ . Geometrically, we obtain (fig. 2)

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{e}_1 = \cos \varphi, \quad \mathbf{i} \cdot \mathbf{e}_2 = -\sin(\varphi + \phi), \quad \mathbf{j} \cdot \mathbf{e}_1 = \sin \varphi, \quad \mathbf{j} \cdot \mathbf{e}_2 = \cos(\varphi + \phi). \quad (3)$$

Multiplication of equation (2) scalarly by the vector  $\mathbf{i}$  gives us  $x = \bar{x}\mathbf{i} \cdot \mathbf{e}_1 + \bar{y}\mathbf{i} \cdot \mathbf{e}_2$ , and by vector  $\mathbf{j}$  –  $y = \bar{x}\mathbf{j} \cdot \mathbf{e}_1 + \bar{y}\mathbf{j} \cdot \mathbf{e}_2$ . Excluding in these equations scalar multiplications of unit vectors by means of (3), we find

$$x = \bar{x} \cos \varphi - \bar{y} \sin(\varphi + \phi); \quad y = \bar{x} \sin \varphi + \bar{y} \cos(\varphi + \phi). \quad (4)$$

Solving these equations for  $\bar{x}$  and  $\bar{y}$ , we obtain

$$\bar{x} = \frac{x \cos(\varphi + \phi) + y \sin(\varphi + \phi)}{\cos \phi}; \quad \bar{y} = \frac{y \cos \varphi - x \sin \varphi}{\cos \phi}.$$

Differentiating the first equation by  $\beta$ , and the second by  $\alpha$ , we find

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{x}}{\partial \beta} \cos \phi &= \frac{\partial x}{\partial \beta} \cos(\varphi + \phi) + \frac{\partial y}{\partial \beta} \sin(\varphi + \phi) + \\ &+ [y \cos(\varphi + \phi) - x \sin(\varphi + \phi)] \frac{\partial \varphi}{\partial \beta}; \quad (5) \\ \frac{\partial \bar{y}}{\partial \alpha} \cos \phi &= \frac{\partial y}{\partial \alpha} \cos \varphi - \frac{\partial x}{\partial \alpha} \sin \varphi - (y \sin \varphi + x \cos \varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha}. \end{aligned}$$

Equations of characteristics have the form [5]

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi; \quad \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \left( \varphi + \phi + \frac{\pi}{2} \right) = -\operatorname{ctg}(\varphi + \phi). \quad (6)$$

Here the first equation defines the lines of the family  $\alpha$ , and the second – the lines of the family  $\beta$ . Equations (6) may be rewritten in the form

$$\frac{\partial y}{\partial \alpha} = \operatorname{tg} \varphi \frac{\partial x}{\partial \alpha}; \quad \frac{\partial y}{\partial \beta} = -\operatorname{ctg}(\varphi + \phi) \frac{\partial x}{\partial \beta}. \quad (7)$$

Putting (7) into (5), we obtain

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{x}}{\partial \beta} \cos \phi &= [y \cos(\varphi + \phi) - x \sin(\varphi + \phi)] \frac{\partial \varphi}{\partial \beta}; \\ \frac{\partial \bar{y}}{\partial \alpha} \cos \phi &= -(y \sin \varphi + x \cos \varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha}. \end{aligned}$$

Excluding in these equations  $x$  and  $y$  with the help of (4), we find

$$\frac{\partial \bar{x}}{\partial \beta} \cos \phi = (\bar{y} - \bar{x} \sin \phi) \frac{\partial \varphi}{\partial \beta}; \quad \frac{\partial \bar{y}}{\partial \alpha} \cos \phi = (\bar{y} \sin \phi - \bar{x}) \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha}. \quad (8)$$

The only property of the coordinate system  $(\alpha, \beta)$  which was used in the conclusion (8) consists in the scalar multiplication  $\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2$  being a constant value.

## Stress condition in granular medium

The equations (8) are simplified when considering the properties of characteristic curves of the equations' system consisting of the Mohr-Coulomb yield condition and the equilibrium equations. In particular, in [11] it is shown that

$$\varphi - \varphi_0 = (\alpha + \beta) \cos \phi, \quad (9)$$

here  $\varphi_0$  is constant, introduced for convenience. Putting (9) into (8), we find

$$\frac{\partial \bar{x}}{\partial \beta} = \bar{y} - \bar{x} \sin \phi; \quad \frac{\partial \bar{y}}{\partial \alpha} = \bar{y} \sin \phi - \bar{x}. \quad (10)$$

Let us point out that with  $\phi = 0$  these equations coincide with the equations, obtained in the theory of plasticity of materials, the yield condition of which does not depend on the average stress [1, 3, 4]. Let us introduce new dependent variables  $\bar{X}$  and  $\bar{Y}$  by formulas

$$\bar{x} = \bar{X} \exp(n\alpha + m\beta); \quad \bar{y} = \bar{Y} \exp(n\alpha + m\beta). \quad (11)$$

Here  $n$  and  $m$  – constants. Putting (11) into (10), we obtain

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial \beta} + m\bar{X} = \bar{Y} - \bar{X} \sin \phi; \quad \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \alpha} + n\bar{Y} = \bar{Y} \sin \phi - \bar{X}. \quad (12)$$

Accepting  $m = -\sin \phi$  and  $n = \sin \phi$ , we transform equations (12) into

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial \beta} = \bar{Y}, \quad \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \alpha} = -\bar{X}. \quad (13)$$

Besides, equations (11) accept the form

$$\bar{x} = \bar{X} \exp[(\alpha - \beta) \sin \phi]; \quad \bar{y} = \bar{Y} \exp[(\alpha - \beta) \sin \phi]. \quad (14)$$

Equations (13) are brought to the telegraph equations of the form

$$\frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial \alpha \partial \beta} + \bar{X} = 0; \quad \frac{\partial^2 \bar{Y}}{\partial \alpha \partial \beta} + \bar{Y} = 0. \quad (15)$$

These equations are solved by virtue of Riemann method. In particular, along any closed contour there is the equation

$$\oint \left[ \left( G \frac{\partial f}{\partial \alpha} - f \frac{\partial G}{\partial \alpha} \right) d\alpha + \left( f \frac{\partial G}{\partial \beta} - G \frac{\partial f}{\partial \beta} \right) d\beta \right] = 0.$$

Here  $f \equiv \bar{X}$  or  $f \equiv \bar{Y}$ , and  $G(a, b, \alpha, \beta)$  – Green's function. Besides,

$$G(a, b, \alpha, \beta) \equiv J_0 \left[ 2\sqrt{(a - \alpha)(b - \beta)} \right],$$

where  $J_0 \left[ 2\sqrt{(a - \alpha)(b - \beta)} \right]$  – Bessel function of the zero order.

Having the solution of the equations (15), we can find the dependence of  $x$  and  $y$  from  $\alpha$  and  $\beta$ . The equations (14) virtually give dependence of  $\bar{x}$  and  $\bar{y}$  from  $\alpha$  and  $\beta$ , and then the equations (4) and (9) are the dependence of  $x$  and  $y$  from  $\alpha$  and  $\beta$ . The dependence of the quadratic invariant of the stress tensor from  $\alpha$  and  $\beta$  has the form [11]

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = q_0 \exp[2(\beta - \alpha) \sin \phi], \quad (16)$$

here  $\sigma_2$  – the lowest (in algebraic sense) main stress;

$q_0$  – arbitrary constant.

The Mohr-Coulomb yield condition has the form

$$q - p \sin \phi = k \cos \phi, \quad (17)$$

here  $p = -(\sigma_1 + \sigma_2)/2$  and  $k$  – cohesion coefficient which is a constant value. The equations (16) and (17) determine  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  as functions  $\alpha$  and  $\beta$ . Considering (11), the dependences of stress tensor components in the Cartesian coordinates from  $\alpha$  and  $\beta$  are found with the help of standard equations of transformation of tensor components in the plane. Thus, considering the present the dependence of  $x$  and  $y$  from  $\alpha$  and  $\beta$ , the dependences of stress tensor components in the Cartesian coordinates from  $x$  and  $y$  have been obtained in the parameter form.



## Conclusion

It has been shown that the earlier developed methods used for construction of stress field at plane deformation of material, subjected to a yield condition independent of the average stress, using Mikhlin's coordinates, are fully applicable for materials subject to the Mohr-Coulomb yield condition. To do this, it is sufficient to introduce the generalised Mikhlin's coordinates  $\bar{x}$  and  $\bar{y}$  by formulas (fig. 2), as well as the auxiliary functions  $\bar{X}$  and  $\bar{Y}$  by formulas (14). These auxiliary functions satisfy the telegraph equation (15). The same equation is satisfied by Mikhlin's coordinates in the theory of plasticity, based on the yield condition, independent of the average stress. The methods for solving the corresponding boundary value tasks are well developed [1, 3, 4]. All these methods can be used almost without changes to determine the stresses in the granular medium.

## References

1. Hill R. The mathematical theory of plasticity. Moskow, 1956. 407 p.
2. Hill R., Lee E.H., Tupper S.J. A Method of Numerical Analysis of Plastic Flow in Plane Strain and Its Application to the Compression of a Ductile Material Between Rough Plates, *ASME J. Appl. Mech.*, 1951, vol. 18, no. 1, pp. 46–52.
3. Kachanov L.M. Fundamentals of the Theory of Plasticity. Moskow, 1956. 324 p.
4. Druanov B.A., Nepershin R.I. Technological Plasticity [Teoriya tekhnologicheskoy plastichnosti]. Moscow, 1990. 272 p.
5. Sokolovskiy V.V. Statics of Soil [Statika sypuchei sredy]. Moscow, 1960. 243 p.
6. Nikolaevskiy V.N. Mechanical properties of soil and theory of plasticity [Itogi nauki i tekhniki Seriya Mekhanika tverdyh deformiruemykh tel]. *Rev. sci. and technol.* The series Solid mechanics, 1972, no. 6, 85 p.
7. Cox G.M., Thamwattana N., McCue S.W., Hill J.M. Coulomb-Mohr Granular Materials: Quasi-Static Flows and the Highly Frictional Limit, *Appl. Mech. Rev.*, 2008, vol. 61, Paper 060802.
8. Goddard J.D. Continuum modeling of granular media, *Appl. Mech. Rev.*, 2014, vol. 66, paper 050801.
9. Spencer A.J.M. A Theory of the Kinematics of Ideal Soils Under Plane Strain Conditions, *J. Mech. Phys. Solids*, 1964, vol. 12, pp. 337–351.
10. Harris D. A hyperbolic Augmented Elasto-Plastic Model for Pressure-Dependent Yield, *Acta Mech.*, 2014, vol. 225, pp. 2277–2299.
11. Alexandrov S. Geometry of plane strain characteristic fields in pressure-dependent plasticity, *ZAMM*, 2015, vol. 95, pp. 1296–1301.

12. Spitzig W.A., Sober R.J., Richmond O. The Effect of Hydrostatic Pressure on the Deformation Behavior of Maraging and HY-80 Steels and Its Implications for Plasticity Theory, *Metallurg. Trans.*, 1976, 7A, pp. 1703–1710.

13. Kao A.S., Kuhn H.A., Spitzig W.A., Richmond O. Influence of Superimposed Hydrostatic Pressure on Bending Fracture and Formability of a Low Carbon Steel Containing Globular Sulfides, *ASME J. Engng. Mater. Technol.*, 1990, vol. 112, pp. 26–30.

14. Wilson C.D. A Critical Reexamination of Classical Metal Plasticity, *ASME J. Appl. Mech.*, 2002, vol. 69, no. 1, pp. 63–68.

15. Liu P.S. Mechanical Behaviors of Porous Metals Under Biaxial Tensile Loads, *Mater. Sci. Engng.* 2006, vol. A422, pp. 176–183.

**Information about the authors:**

Sergei E. ALEXANDROV, Dr. Sci. (Phys. and math.), Associate Prof.

E-mail: sergei\_alexandrov@spartak.ru

Elena A. LYAMINA, Cand. sci. (Phys. and math) Associate Prof.

E-mail: lyamina@inbox.ru

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Science (RAS) (Moscow)

© Alexandrov S. E., Lyamina E. A., 2017

**А. В. Соломин**

## **КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЯГИ И БОКОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ДЛЯ МАГНИТНОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА**

Дата поступления 09.09.2017

Решение о публикации 26.10.2017

Вопросы совершенствования имеющихся и создания новых видов транспорта важны и актуальны для развития человеческого общества. Одним из наиболее перспективных и экологически чистых новых видов транспортных средств является высокоскоростной магнитнолевитационный транспорт, перемещающийся со скоростями до 500 км/ч.

**Цель.** Обосновать целесообразности использования линейного асинхронного двигателя; разработать и исследовать варианты конструкции двигателей данного типа.

**Методы.** Описана конструкция линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком для комбинированной системы тяги и боковой стабилизации магнитнолевитационного транспорта, развивающая повышенные усилия боковой стабилизации. Выполнено математическое моделирование магнитодвижущих сил (МДС) в зазоре тягового линейного двигателя данного типа. Для анализа были приняты допущения о равномерности распределения магнитной индукции в воздушном зазоре в поперечном направлении и о ее синусоидальности в продольном направлении, позволившие разработать новую математическую модель распределения МДС в воздушном зазоре линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком.

**Результаты.** Разработанная математическая модель для расчета МДС тяговой линейной машины позволит повысить точность расчета тяговых и стабилизирующих боковых усилий комбинированной системы для магнитнолевитационного транспорта, в том числе при разных вариантах взаимного расположения индуктора относительно вторичного элемента. Это подтверждает успешный десятилетний опыт коммерческой эксплуатации высокоскоростного поезда на магнитном подвесе, перевозящего пассажиров из аэропорта в город Шанхай в Китайской народной республике.

На величину тягового и бокового усилий линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком для высокоскоростного транспорта влияет характер распределения тока во вторичном элементе, который существенным образом зависит от распределения магнитодвижущих сил в воздушном зазоре машины.

Комбинированная система тяги, боковая стабилизация, линейный асинхронный двигатель, продольно-поперечный магнитный поток, магнитодвижущая сила.

## Введение

Развитие транспорта в Российской Федерации, обладающей огромной территорией и выгодным географическим положением, является важной стратегической задачей. Реализация новых транспортных направлений, соединяющих запад с востоком и север с югом нашей страны, а также создание транспортных коридоров на территории России, соединяющих страны Европы с азиатскими государствами, для перемещения грузов и пассажиров позволит решить многие геополитические и экономические задачи. Для достижения этих целей необходимо не только совершенствовать имеющиеся, но и создавать принципиально новые виды высокоскоростного транспорта. Современные высокоскоростные виды транспорта уже не в состоянии решить поставленные задачи на новом уровне.

Свою нишу в создании современной и перспективной транспортной инфраструктуры России и других стран сможет занять высокоскоростной магнитнолевитационный транспорт. Проблемами создания и исследования магнитнолевитационного транспорта в последние 10 лет активно занимаются российские научные работники и инженеры в транспортных вузах, в академических и отраслевых научно-исследовательских организациях. Вопросы развития высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта уделяют значительное внимание в ОАО «РЖД», поддерживают исследования в данной области в том числе экономически – путем выделения грантов на поисковые и опытные работы. Результатам выполненных исследований и перспективам проведения дальнейших работ в данной области посвящено множество серьезных публикаций [1–8]. Наибольших результатов в разработке и исследованиях магнитнолевитационного транспорта в России достигла научная школа Петербургского государственного университета путей сообщения [1–7].

Для практической реализации высокоскоростных магнитнолевитационных транспортных систем необходимо решить ряд научных и технических проблем, одна из которых – безопасность движения. Безопасность движения высокоскоростных поездов на магнитном подвесе – важная проблема, включающая в себя много аспектов. Один из них – улучшение динамических качеств магнитнолевитационного транспорта путем обеспечения его поперечной стабилизации относительно путевой структуры. В Ростовском государственном университете путей сообщения (РГУПС) разработан новый тип тяговой машины для магнитнолевитационного транспорта – линейный асинхронный двигатель (ЛАД) с продольно-поперечным магнитным потоком. Такой ЛАД способен развивать помимо тяговых усилия поперечной стабилизации [9]. Усилия поперечной стабилизации автоматически возникают сами при боковом смещении транспортного экипажа, подвешенного в магнитном поле, без дополнительных устройств и датчиков положения. ЛАД с продоль-

но-поперечным магнитным потоком работает на принципе встречно бегущих магнитных полей. Ряд научных результатов по исследованию линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком в РГУПС опубликован в [10–11]. Вопросы движения и поперечной динамики магнитнолевитационного транспорта весьма актуальны, о чем свидетельствуют научные исследования в Московском государственном университете путей сообщения [12].

### **Конструктивные схемы и особенности работы комбинированных систем тяги и боковой стабилизации**

Одна из конструкций, обеспечивающих создание тягового и бокового стабилизирующего усилий и предназначенных для магнитнолевитационного транспорта, описана в [13]. Увеличение тягового усилия комбинированной системы тяги и боковой стабилизации обеспечивает ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком [14].

ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком [14] имеет в направлении движения беззубцовые (гладкие) активные зоны, что повышает синусоидальность распределения магнитного потока в воздушном зазоре и значение тягового усилия данного двигателя.

Для улучшения распределения магнитного поля в поперечном направлении разработан линейный асинхронный двигатель [15], содержащий индуктор (рис. 1), магнитная система которого образована поперечно расположенными сердечниками 1, несущими катушки обмотки 2. Поперечно шихтованные сердечники соединены продольно шихтованными сердечниками 3. Сердечники, шихтованные в продольном направлении, образованы двумя наклонными стержнями, концы которых входят в пазы поперечных сердечников. На продольных сердечниках расположены катушки обмотки 4. Многофазная обмотка разделена на две части, одна из которых расположена на поперечных, а другая – на продольных сердечниках. Вторичный элемент выполняется композиционным. Электропроводящая часть 5 вторичного элемента уложена поверх обратного магнитопровода 6. Беззубцовое строение индуктора данного ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком обеспечивает синусоидальность распределения магнитного потока в воздушном зазоре в поперечном направлении, что позволяет увеличить боковые стабилизирующие усилия при использовании машины на магнитнолевитационном транспорте.

Принцип действия линейных асинхронных двигателей, принципиальные конструктивные схемы которых представлены на рис. 1, 2, одинаковы, и в них использовано явление встречно бегущих магнитных полей.

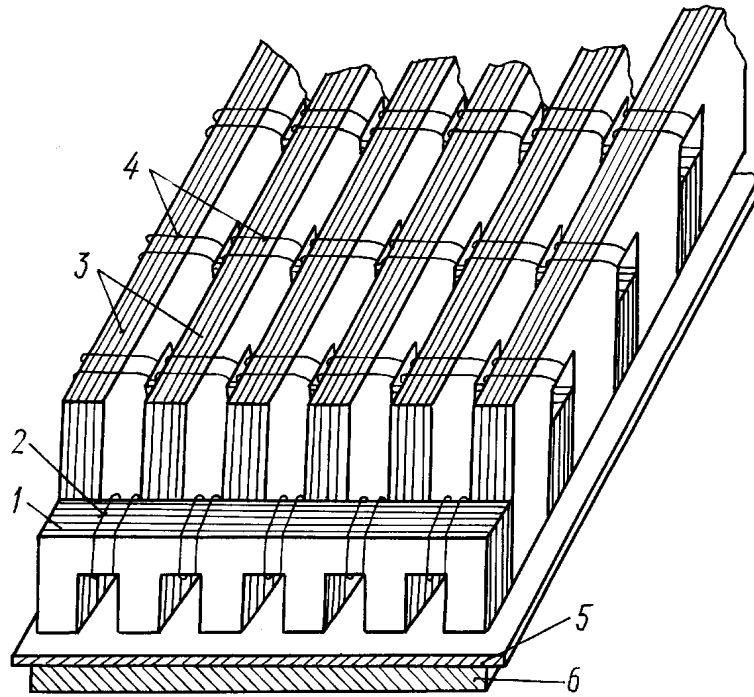


Рис. 1. Линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком: 1 – поперечно шихтованный сердечник; 2, 4 – обмотка; 3 – продольно шихтованный сердечник; 5 – электропроводящая шина; 6 – ферромагнитное основание

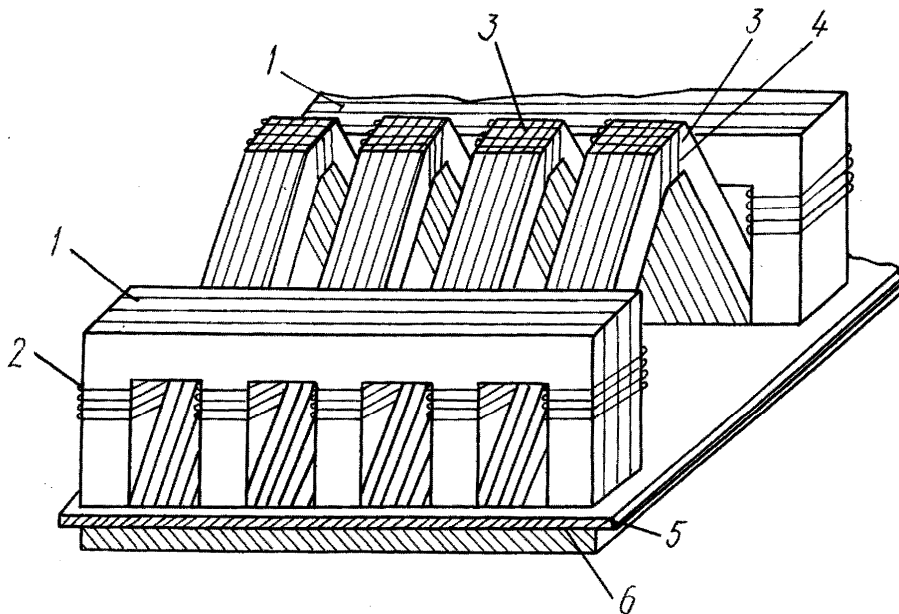


Рис. 2. Линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком: 1 – поперечно шихтованный сердечник; 2, 4 – обмотка; 3 – продольно шихтованный сердечник; 5 – электропроводящая полоса; 6 – ферромагнитное основание

Новая конструкция ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком [16] для комбинированных систем тяги и боковой стабилизации позволяет увеличить усилия боковой стабилизации за счет того, что при поперечном смещении магнитнолевитационного транспортного экипажа часть индуктора располагается над короткозамкнутой обмоткой, размещенной по обе части основной путевой структуры. В этом случае поперечно бегущие магнитные поля взаимодействуют с токами стержней, а не с вихревыми токами в электропроводящей шине. В итоге усилия поперечной стабилизации возрастают, улучшается поперечная динамика магнитнолевитационного транспорта.

Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным потоком позволяют реализовать высокие линейные скорости даже при промышленной частоте электропитания, поэтому одной из наиболее перспективных областей применения этих двигателей является высокоскоростной магнитнолевитационный транспорт, который перемещается со скоростью 350–500 км/ч. Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным потоком просты по конструкции, технологичны в изготовлении и обладают высокой надежностью. В связи с этим разработка основ их теории и методики расчета является актуальной задачей.

### **Математическое моделирование распределения магнитодвижущей силы ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком**

Для электромагнитного расчета ЛАД и определения его интегральных характеристик необходимо разработать математические модели машины, учитывающие распределение магнитодвижущей силы (МДС) в воздушном зазоре и в электропроводящей части вторичного элемента. Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным замыканием магнитного потока имеют разомкнутую магнитную систему, при их работе проявляются продольный и поперечный концевые эффекты, которые оказывают большое влияние на тяговые свойства ЛАД, поэтому при расчете необходимо учитывать влияние концевых эффектов. Для учета влияния продольного и поперечного концевых эффектов линейный асинхронный двигатель представляется в виде двух расчетных моделей, на которых изображается распределение магнитодвижущих сил в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Такой метод анализа МДС для ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком был использован в РГУПС. Используем такой подход для определения магнитодвижущей силы в ЛАД, конструкции которых предназначены для использования на перспективном высокоскоростном магнитнолевитационном транспорте.

Расчетная модель ЛАД в продольном направлении представлена на рис. 3 в виде чередующихся через определенные промежутки индукторов линейных электродвигателей. Промежутки между индукторами являются зонами продольного краевого эффекта, которая может быть принята  $L_{к\max} \cong 2\tau$ . Из рис. 3 видно, что в продольном направлении МДС изменяется синусоидально с периодом  $l$ . Полагаем, что в зонах продольного краевого эффекта магнитодвижущая сила равна нулю.

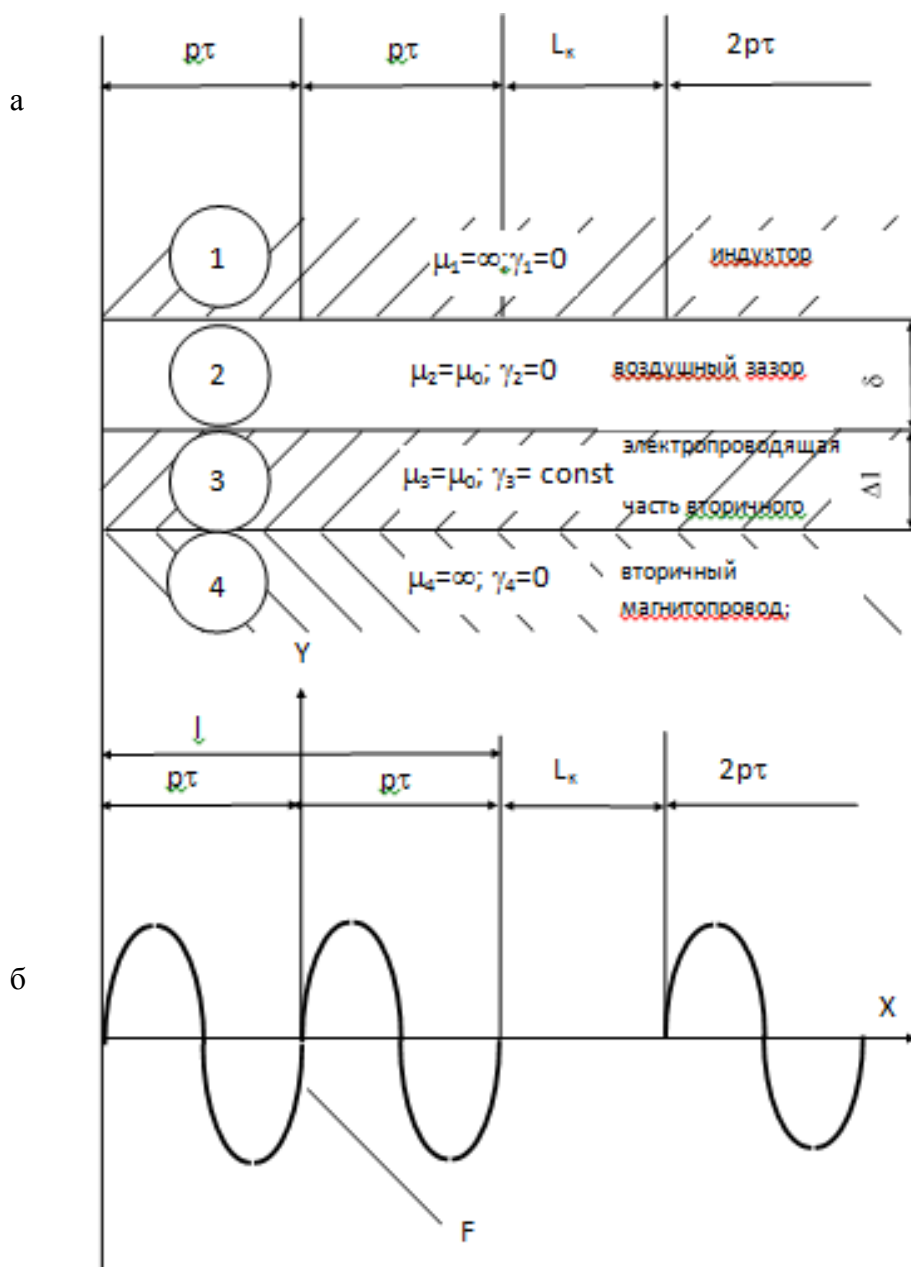


Рис. 3. Расчетная модель и распределение МДС линейного двигателя в продольном направлении: а) основные зоны машины: 1 – индуктор; 2 – воздушный зазор; 3 – электропроводящая часть вторичного элемента; 4 – обратный магнитопровод; б) распределение МДС в направлении движения



Рассмотрим расчетную модель линейного асинхронного двигателя в поперечном направлении (рис. 4). Картина распределения магнитодвижущей силы линейного асинхронного двигателя в поперечном направлении показывает, что машина образована шестью одинаковыми линейными двигателями, действующими согласно, поэтому достаточно рассчитать один линейный асинхронный двигатель, а результаты умножить на шесть.

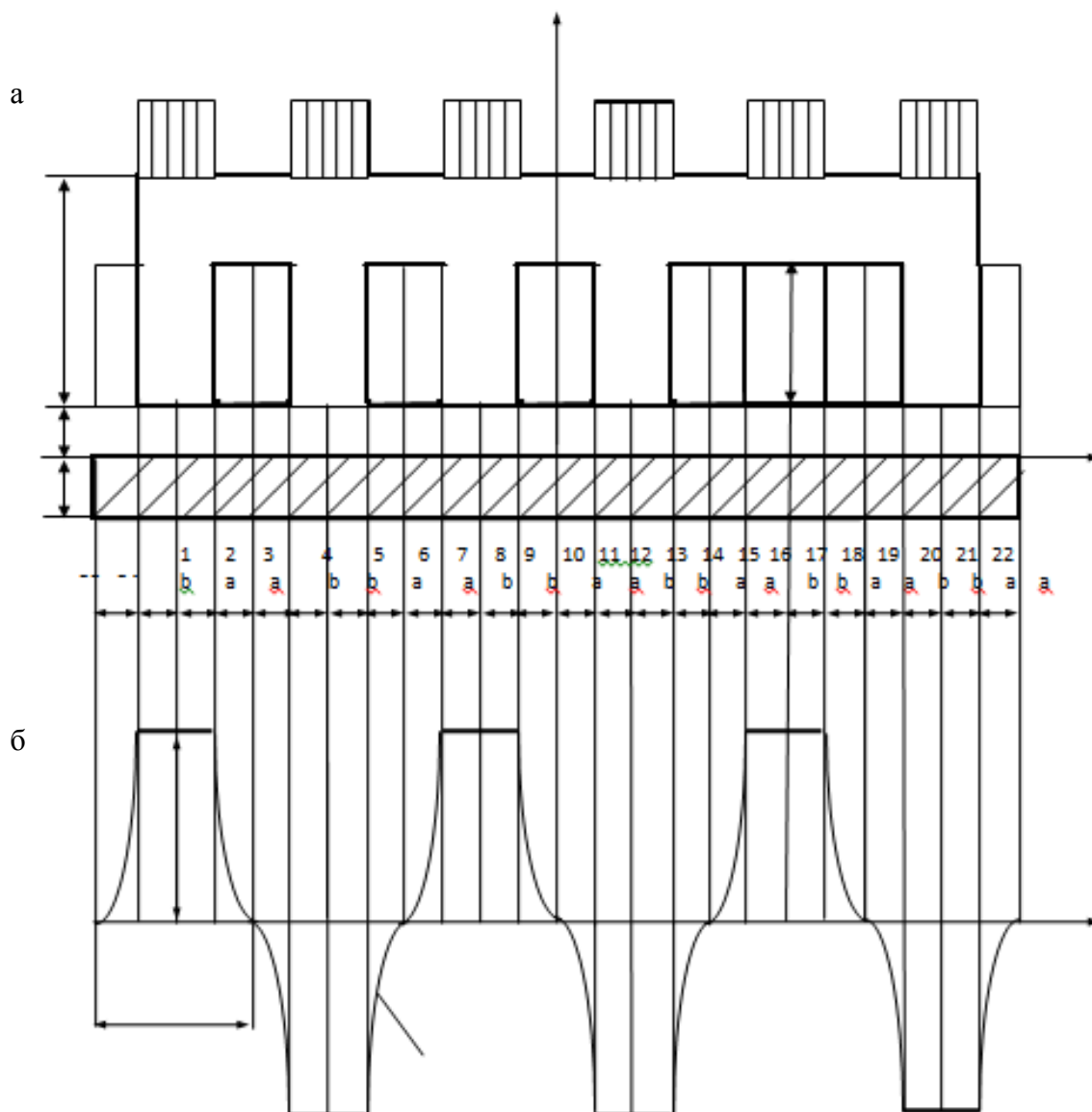


Рис. 4. Расчетная модель и распределение МДС линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком в поперечном направлении:  
а) поперечное сечение ЛАД; б) распределение МДС

Рассмотрим линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком, имеющий конструкцию, представленную на рис. 1.

ЛАД разбит для анализа распределения МДС на зоны 1–24. Воспользуемся рядом допущений, позволяющих получить аналитическое решение задачи. Полагаем, что:

- магнитная проницаемость магнитопровода равна бесконечности;
- электрическая проводимость магнитопровода равна нулю;
- ток индуктора сосредоточен в бесконечно тонком слое на поверхности зубцов, обращенных ко вторичному элементу;
- ток индуктора создает в направлении оси  $x$  синусоидально бегущую волну МДС;
- составляющие плотности тока по оси  $y$  в индукторе и вторичном элементе равны нулю.

В выбранном варианте конструкции ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком в соответствии с расчетными моделями (рис. 3, 4) и с учетом принятых допущений значения магнитодвижущих сил получены для всех рассматриваемых зон в поперечном направлении.

В соответствии с принятыми допущениями и расчетными моделями (рис. 3, 4) и с преобразованиями для ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком установлено, что МДС данного линейного двигателя представляет собой периодическую функцию с периодом  $T_x = l$  по оси  $x$  и с периодом  $T_z = 2L$  по оси  $z$ , которая задана следующим образом

$$F(x, z, t) = \begin{cases} F_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \\ \text{при } -p\tau \leq x \leq p\tau; \quad -(a+b) \leq z \leq (a+b); \\ F_m \left[ 1 - \sin \frac{\pi(z-a)}{2b} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \\ \text{при } -p\tau \leq x \leq p\tau; \quad a \leq z \leq (a+b); \\ F_m \left[ 1 + \sin \frac{\pi(z+a)}{2b} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \\ \text{при } -p\tau \leq x \leq p\tau; \quad -(a+b) \leq z \leq -a, \end{cases}$$

где  $F_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} q \cdot m \cdot w_c \cdot I_{1\phi} \cdot k_{од1}$ ;

$q$  – число пазов на полюс и фазу;

$w_c$  – число витков в катушке обмотки;

$m$  – число фаз;

$I_{1\phi}$  – ток фазы индуктора;

$k_{o\delta 1}$  – обмоточный коэффициент для первой гармоники тока;

$\tau$  – полюсное деление индуктора;

$a, b$  – поперечные размеры сердечника.

С учетом конструкции индуктора ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком его магнитодвижущую силу после ряда преобразований представим в виде двойного ряда Фурье:

$$F(x, z, t) = \frac{8\tau F_m}{\pi^2 l} \sum_n \sum_v n_{\pi} \cos\left(\pi n \frac{z}{L}\right) v_{\kappa} e^{j(\omega t + 2\pi v \frac{x}{l})},$$

где  $n$  – целое положительное, нечетное число – порядок гармонической составляющей МДС по оси  $z$ , где период первой гармоники составляет  $2L = 4(a + b)$ ;

$v$  – любое целое число – порядок гармоники в направлении оси  $x$ ;

$n_{\pi}$  – коэффициент, учитывающий распределение МДС в зоне лобовых частей обмотки.

Коэффициент, учитывающий распределение МДС в зоне лобовых частей тягового ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, определяется соотношением

$$n_{\pi} = \frac{1}{n \left[ 1 - \left( 2n \frac{b}{l} \right)^2 \right]} \left[ \sin \frac{\pi n (a + b)}{L} - 2n \frac{b}{L} \cos \left( \pi n \frac{a}{L} \right) \right];$$
$$v_{\kappa} = \frac{\sin \pi n \left( 1 + v \frac{2\tau}{l} \right)}{1 + v \frac{2\tau}{l}},$$

где  $v_{\kappa}$  – коэффициент, учитывающий число полюсов ЛАД.

Полученное представление магнитодвижущих сил ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком в виде двойных рядов Фурье справедливо для машин с любым числом полюсов. Предложенный подход к определению распределения магнитодвижущей силы позволяет свести реальные модели ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком со сложным строением магнитных систем индукторов к расчетным математическим, позволяющих рассчитывать магнитное поле ЛАД.

## Заключение

Рассмотрен ряд конструкций линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком с точки зрения целесообразности их применения для перспективного высокоскоростного магнитнолевитаци-

онного транспорта в качестве комбинированных систем тяги и боковой стабилизации.

Предложена методика аналитического определения магнитодвижущей силы, позволяющая исследовать ее распределение в воздушном зазоре при любой конструкции индуктора тягового ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком для высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта.

Разработаны математические модели для новых конструкций индукторов тяговых линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком, позволяющие находить распределение магнитодвижущей силы ЛАД в воздушном зазоре между индуктором и вторичным элементом и устанавливать взаимосвязи между параметрами и размерами линейной машины и величиной МДС, что повысит точность расчетов при проектировании данных двигателей для высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта.

### **Библиографический список**

1. Антонов Ю.Ф. Магнитнолевитационная транспортная технология: монография / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев и др.; под ред. В.А. Гапановича – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.

2. Зайцев А.А. Транспорт на магнитном подвесе: моногр. / А.А. Зайцев, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова. – СПб.: ПГУПС, 2010. – 160 с.

3. Антонов Ю.Ф. Магнитнолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с.

4. Зайцев А.А. Магнитнолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны: моногр. / А.А. Зайцев, Е.И. Морозова, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова. – СПб.: НП-Принт, 2015. – 140 с.

5. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитнолевитационного транспорта / А.А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 62–65.

6. Зайцев А.А. Магнитнолевитационные транспортные системы и технологии / А.А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73.

7. Антонов Ю.Ф. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев, Е.И. Морозова // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 4 (41). – С. 5–15.

8. Лapidус Б.М. Железнодорожный транспорт: философия будущего / Б.М. Лapidус, Л.В. Лapidус. – М.: Прометей, 2015. – 232 с.

9. Соломин А.В. Линейный асинхронный двигатель для высокоскоростной транспортной системы на магнитной подвеске / А.В. Соломин // Вест. РГУПС. – 2004. – № 4. – С. 41–44.

10. Соломин В.А. О рациональном взаимном расположении индуктора и вторичного элемента тягового линейного асинхронного двигателя для высокоскоростного транспорта / В.А. Соломин, А.В. Соломин, Л.Л. Замшина // Вест. РГУПС. – 2009. – № 2. – С. 120–123.

11. Соломин В.А. Усилия поперечной самостабилизации тягового линейного асинхронного двигателя / В.А. Соломин, А.В. Соломин, Л.Л. Замшина, А.Л. Быкадоров // Вестн. РГУПС. – 2012. – № 1. – С. 71–74.

12. Пашков Н.Н. Уравнения движения магнитнолевитационного подвижного состава / Н.Н. Пашков // Транспортные системы и технологии. – Вып. 1 (1), 2015. – С. 59–69. – URL: <http://www.transstest.ru/razdel-2-3-pashkov.html> (дата обращения 27.05.2017).

13. Соломин В.А. Система боковой самостабилизации высокоскоростного экипажа с магнитной левитацией / В.А. Соломин, В.Н. Носков, М.Ю. Пустоветов, Н.С. Флегонтов // Магнитнолевитационные транспортные системы и технологии. МТСТ`13. Труды 1-й Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург, 29–31 окт. 2013 г. – под ред. Ю.Ф. Антонова. – СПб.: PUDRA, 2013. – С. 66–67.

14. А.с. СССР № 868942, МПК 41/04. 1981.

15. А.с. СССР № 801198, МПК 41/04. 1981.

16. Пат. Россия № 2518915, МПК Н 02 К 41/025. 2014.

**Сведения об авторе:**

СОЛОМИН Андрей Владимирович, к. т. н., доцент.

E-mail: [vag@kaf.rgups.ru](mailto:vag@kaf.rgups.ru).

Ростовский государственный университет путей сообщения

© СОЛОМИН А. В., 2017

**A. V. Solomin**

## **COMBINATION TRACTION AND LATERAL STABILISATION SYSTEM FOR MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT**

Date of receipt 09.09.2017

Decision on publication 26.10.2017

The problems of improvement of modern types of transport and creation of new ones are important and topical for the human society development. One of the most promising and environmentally-friendly modes of transport is the high-speed maglev transport, moving at speeds of approximately 500 km/h.

**Objective.** Justification of linear induction motor, development and research of various constructions of this type of motors.

**Methods.** Description of linear induction motor with longitudinal and transverse magnetic flux for combined traction and lateral stabilisation system of maglev transport, having increased lateral stabilisation forces. The mathematical modelling of magnetomotive force (MF) in the air gap of traction linear motor of this type has been conducted. To analyse the MF the assumption has been made about even distribution of magnetic induction in the air gap in transverse direction and its sinusoidal longitudinal direction, making it possible to develop new mathematical model of MF distribution in the air gap of linear induction motor with longitudinal and transverse magnetic flux

**Results.** The developed mathematical model for calculation of MF on traction linear machine will enable increasing accuracy of traction and lateral stabilisation combined system forces for maglev transport. The same relates to mutual location of inductor to the secondary element. All this proves the successful ten-year commercial operation experience of magnetically suspended train carrying passengers from an airport to Shanghai, P.R. China.

The values of traction and lateral stabilisation forces of linear induction motor with longitudinal and transverse magnetic flux is greatly influenced by the character of current distribution in the secondary element. The character itself is influenced by MF distribution in the air gap.

Combined traction and lateral stabilisation system, lateral stabilisation, linear induction motor (LIM), longitudinal-transverse magnetic flux, magnetomotive force (MF), secondary element (SE).

### **Introduction**

Development of transport in the Russian Federation, which has a vast territory and a good geographic location, is of great strategic importance. Realisation of new transport routes, connecting West with East and North with South of this country, and creation of transport corridors in its territory, connecting European and Asian countries for transportation of goods and passengers, will enable solving many geopolitical and economic issues. To achieve this goal, it is necessary

not only to improve the existing transport modes, but also to create conceptually new, high-speed ones. Today's high-speed transport modes cannot respond to new challenges.

Magnetic levitation transport can have its own niche in creation of transport infrastructure of the number of countries, including Russia. The problems related to creation of maglev transport have been tackled by Russian scientists and engineers for over 10 years already. These scientists work at transport universities, in scientific and research organisations. The development of this mode of transport is paid much attention to in JSC "RZD", which supports researches aimed at studying various aspects of this problem, including by means of financial help. And the results of these studies are described in detail in various serious publications [1–8]. The best-known research results are those obtained by Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University scientists [1–7].

To practically implement high-speed maglev transport systems, it is necessary to solve a number of scientific and technical problems, with the traffic safety being one of them. Magnetically suspended trains traffic safety is a crucial problem comprising a large number of aspects. One of them is improvement of dynamic properties of maglev transport by means of ensuring its transverse stabilisation relatively to the guideway. Rostov State Transport University (RGUPS) has developed a linear induction motor (LIM) with longitudinal and transverse magnetic flux. Apart from traction forces, LIM with longitudinal and transverse magnetic flux (LTMF) is capable of achieving lateral stabilisation forces [9]. Transverse stabilisation forces automatically emerge themselves when lateral displacement of the vehicle takes place, suspended in the magnetic field, without any extra devices and location sensors. LIM with LTMF functions on the basis of magnetic fields flowing towards each other. A number of results of researches of LIM with LTMF at RGUPS has been published in [10, 11]. The motion and transverse dynamics of maglev transport is very topical which is indicated by researches being carried out at the Russian University of Transport (MIIT) [12].

### **Construction schemes and peculiarities of combined traction and lateral stabilisation system performance**

One of the constructions making it possible to create traction and lateral stabilisation forces for maglev transport, is described in the [13]. The increase of traction force in combined traction and lateral stabilisation system is ensured by LIM with LTMF [14].

LIM with LTMF [14] has toothless (smooth) active zones in its motion direction that helps increase sinusoidal distribution of magnetic flux in the air gap and the traction force value of LIM.

To improve magnetic field distribution transversely to the motion direction, the LIM with inductor has been developed (fig. 1), the magnetic system of

which is arranged by transversely placed cores 1, bearing winding coils 2. Transversely laminated cores are connected by longitudinally laminated cores 3. The longitudinally laminated cores are made up by two slant cores, the limbs of which are inserted into grooves of transverse cores. On the longitudinal cores, the winding coils are placed 4. Polyphase winding is divided into two parts, with one of them placed on the transverse cores and the other on the longitudinal ones. The secondary element is composite.

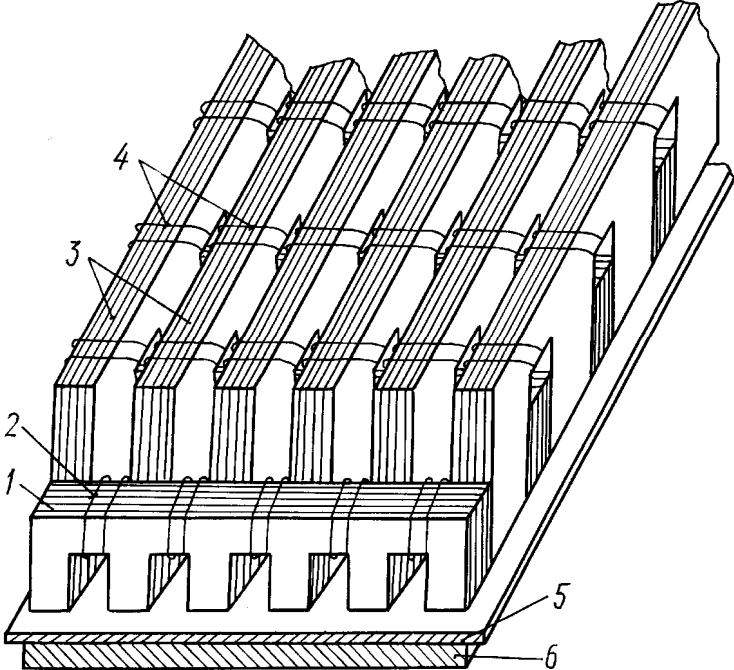


Fig. 1. Linear induction motor with longitudinal and transverse magnetic flux:  
 1 – transversely laminated core; 2, 4 – winding; 3 – longitudinally laminated core;  
 5 – electroconductive bus; 6 – ferromagnetic base

The electroconductive part 5 of the secondary element is laid over the reverse magnetic conductor 6. Toothless inductor structure of this LIM with LTMF ensures equal transverse distribution of magnetic flux in the air gap, thus making it possible to enhance lateral stabilisation forces.

The working principle of LIM, the schemes of which can be seen in the fig. 1, 2, are the same with the magnetic fields flowing towards each other.

New construction of LIM with LTMF [16] for combined traction and lateral stabilisation systems enables increasing lateral stabilisation forces owing to the fact that during vehicle lateral displacement, a part of the inductor is placed above the short-circuited winding which is placed on both sides of the guideway. In this case, transverse magnetic fluxes interact with core currents and not with whirling fluxes in the bus. As a result, transverse stabilisation forces grow, and the lateral dynamics of maglev transport improves too.



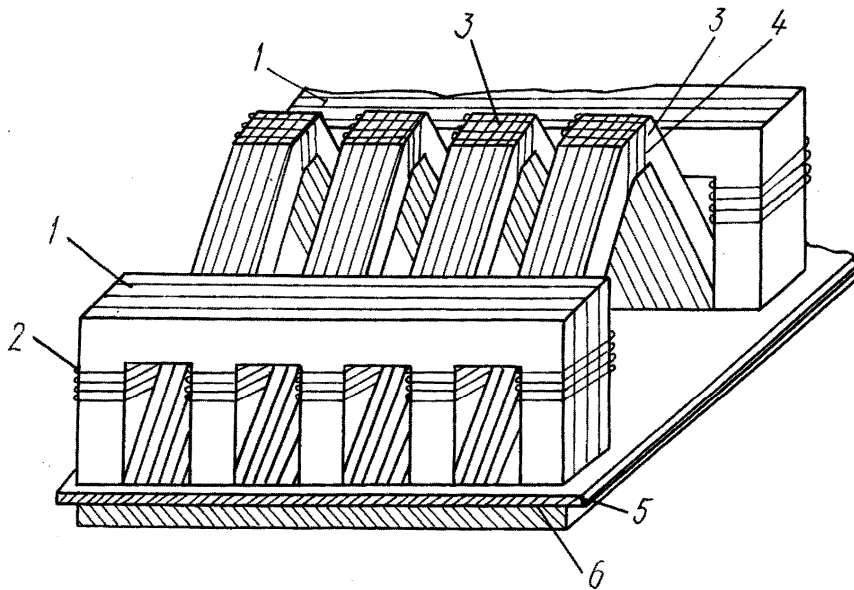


Fig. 2. Linear induction motor with longitudinal and transverse magnetic flux:  
 1 – transversely laminated core; 2, 4 – winding; 3 – longitudinally laminated core;  
 5 – electroconductive strip; 6 – ferromagnetic base

LIMs with LTMF enable realising high speeds even at industrial electric power supply. Therefore, one of the most promising fields of these motors' application is high-speed maglev transport running at speeds 350–500 km/h. LIM with LTMF are not sophisticated, but are highly reliable. In this respect, the topical task is to develop their theoretical base and calculation methods.

### **Mathematical modelling of magnetomotive force distribution of LIM with LTFM**

For electromagnetic calculation of LIM and determination of its integral properties, it is obligatory to develop machine mathematical models, considering machine magnetomotive force (MF) distribution in the air gap and in the conductive part of the secondary element. Linear induction motors with longitudinal and transverse short-circuited magnetic flux have open magnetic system, and there are longitudinal and transverse end effects occurring during their performance, which strongly influence LIM traction properties. Therefore, it is important to consider end effects during operation. In order to take into account the influence of longitudinal and transverse end effects, a linear induction motor is represented in the form of two calculation models, which display magnetomotive forces distribution in two mutually perpendicular directions. This method of analysis of the MF for the linear induction motor with a longitudinal and transverse magnetic flux has been used at RGUPS. We use this approach to determine the magnetomotive force in the LIM, the designs of which are intended for use on a promising high-speed magnetic levitation transport.

The calculation model of LIM in the longitudinal direction is shown in the fig. 3 in the form of linear motors' inductors alternating with each other. The intervals between the inductors are the longitudinal end effect zones. The zone can be taken as  $L_{\kappa \max} \cong 2\tau$ . It is seen from the fig. 3 that in the longitudinal direction the MF changes evenly (sinusoidally) with the period  $l$ . We suppose that in the longitudinal end effect zones equals zero.

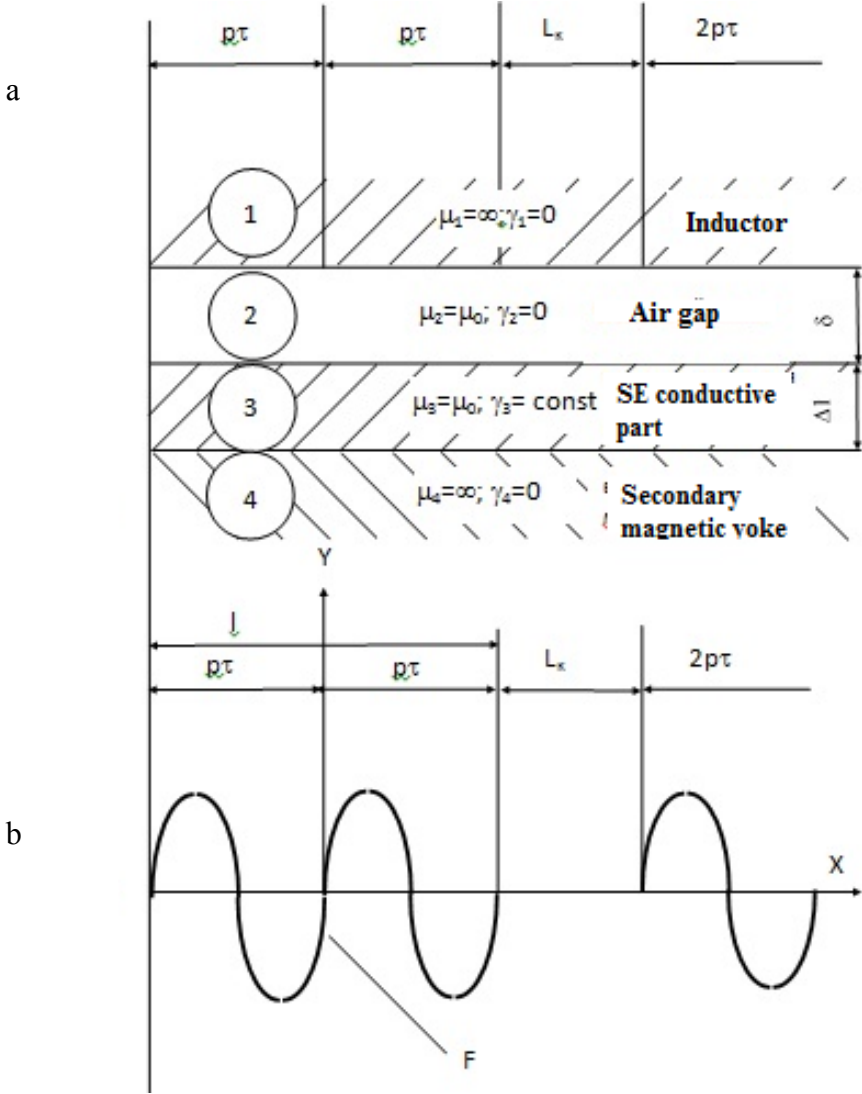


Fig. 3. Calculation model and MF longitudinal distribution of LIM:  
 a) machine basic zones: 1 – inductor; 2 – air gap; 3 – electromotive part of the SE;  
 4 – reverse magnetic yoke; b) longitudinal distribution of MF

Let us analyse the model of linear induction motor in the transverse direction (fig. 4). The scheme of MF transverse distribution indicates that the machine is formed by 6 similar linear motors, which function in unison. Therefore, it is sufficient to calculate only one LIM and the results obtained can be multiplied by 6.

Let us analyse LIM with LTMF, having the structure shown in the fig. 1.

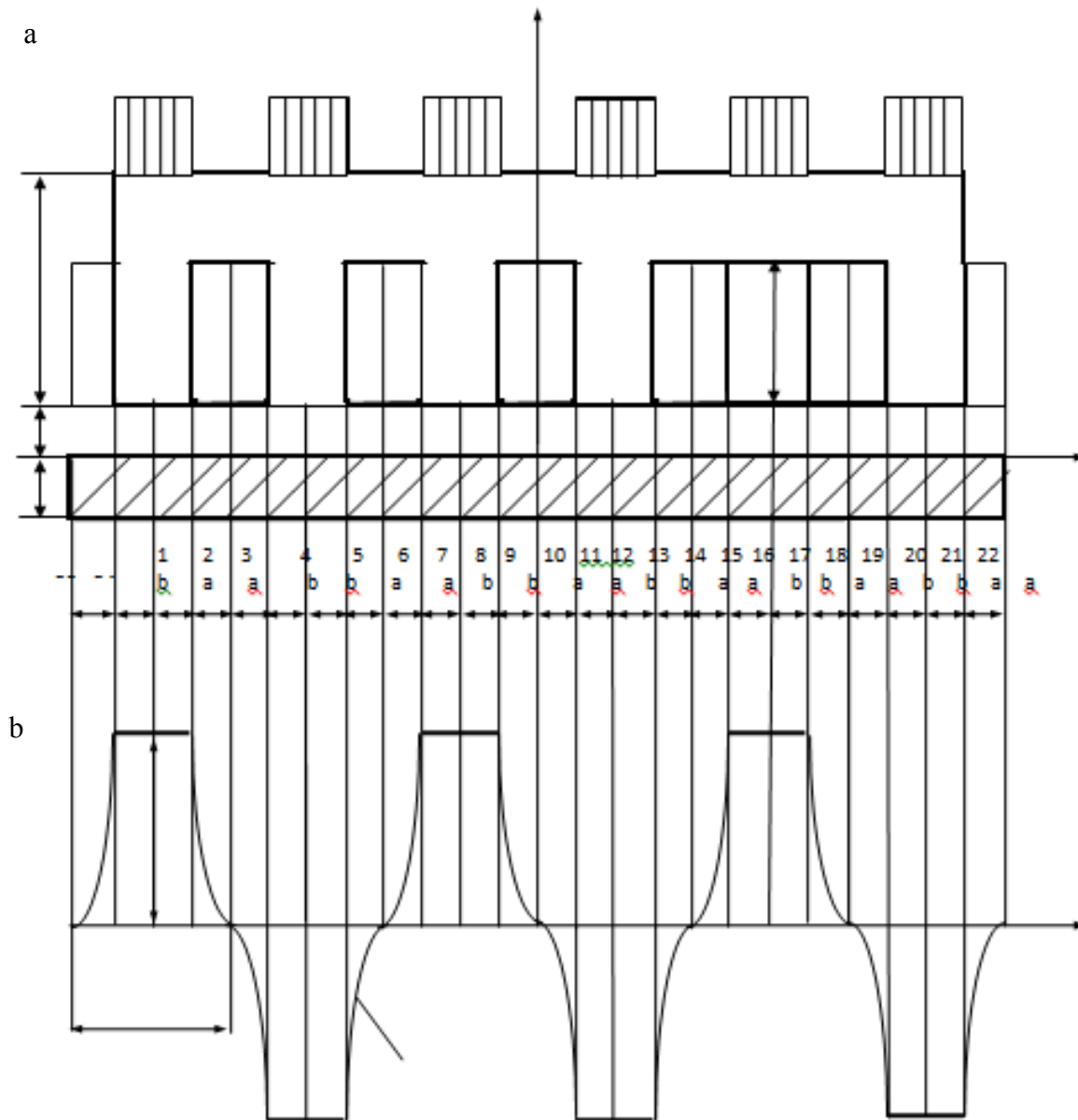


Fig. 4. Calculation model and transverse distribution of MF of linear induction motor with transverse and longitudinal flux: a) cross section of LIM; b) MF distribution

For analysis of MF distribution, LIM is divided into zones 1–24. Let us make use of the number of assumptions allowing us to obtain analytical solution of the task. We suppose that:

- magnetic permeability of the yoke is infinite;
- yoke electric conductivity is equals zero;
- inductor current is focused on infinitely thin layer on the surface of teeth facing the SE;

- inductor current generates sinusoidal running wave of MF in the direction of the  $x$  axis;
- current density constituents on the  $y$  axis in the SE equal zero.

For this construction of LIM with LTMF in accordance with calculation models (fig. 3, 4), taking into account the taken assumptions, MF values have been obtained for all transverse zones analysed.

In accordance with the assumptions taken and the calculation models (fig. 3, 4), and a number of transformations for LIM with LTMF, it has been stated that MF of this motor is a periodic function with the period  $T_x = l$  on the  $x$  axis and with the period  $T_z = 2L$  on the  $z$  axis which is set as follows:

$$F(x, z, t) = \begin{cases} F_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} ; \\ it - p\tau \leq x \leq p\tau; -(a+b) \leq z \leq (a+b); \\ F_m \left[ 1 - \sin \frac{\pi(z-a)}{2b} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} ; \\ it - p\tau \leq x \leq p\tau; a \leq z \leq (a+b); \\ F_m \left[ 1 + \sin \frac{\pi(z+a)}{2b} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} ; \\ it - p\tau \leq x \leq p\tau; -(a+b) \leq z \leq -a, \end{cases}$$

where  $F_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} q \cdot m \cdot w_c \cdot I_{\phi} \cdot k_{o\delta 1}$ ;

$q$  – number of grooves per pole and phase;

$w_c$  – number of windings in the coil;

$m$  – number of phases;

$I_{\phi}$  – inductor phase current;

$k_{o\delta 1}$  – winding coefficient for current fundamental harmonic;

$\tau$  – pole division of in the inductor;

$a, b$  – transverse sizes of the core.

Considering the construction of the inductor of LIM with LTMF, after a number of transformations, we will represent as double Fourier series

$$F(x, z, t) = \frac{8\tau F_m}{\pi^2 l} \sum_n \sum_v n_{\pi} \cos(\pi n \frac{z}{L}) v_{\kappa} e^{j(\omega t + 2\pi v \frac{x}{l})},$$

where  $n$  – integer, positive, odd number – order of the harmonic constituent of MF on the  $z$  axis, where the period of fundamental harmonic is

$$2L = 4(a + b);$$

$v$  – any integer number – order of the harmonic in the  $x$  axis;

$n_{\pi}$  – coefficient considering MF distribution in the zone of coil end.

Coefficient considering MF distribution in the zone of coil end of traction LIM with LTMF is determined as follows

$$n_{\pi} = \frac{1}{n \left[ 1 - \left( 2n \frac{b}{l} \right)^2 \right]} \left[ \sin \frac{\pi n (a + b)}{L} - 2n \frac{b}{L} \cos \left( \pi n \frac{a}{L} \right) \right];$$

$$v_{\kappa} = \frac{\sin pn \left( 1 + v \frac{2\tau}{l} \right)}{1 + v \frac{2\tau}{l}},$$

where  $v_{\kappa}$  – coefficient considering the number of poles of LIM.

The received idea of magnetomotive forces of LIM with a longitudinal and transverse magnetic flux in the form of double Fourier series is valid for machines with any number of poles. The proposed approach to determine the distribution of the magnetomotive force makes it possible to combine the real models of linear induction motors with a longitudinal and transverse magnetic flux with the complex structure of the magnetic inductor systems to the calculated mathematical ones that make it possible to calculate the magnetic field of the LIM.

## Conclusion

A range of constructions of linear induction motors with longitudinal and transverse magnetic flux has been analysed, in terms of their relevance for application for future maglev transport as a combined traction and lateral stabilisation system.

The method has been suggested to analytically determine magnetomotive force, making it possible to analyse its distribution in the air gap at any construction of LIM inductor with longitudinal and transverse magnetic flux for maglev transport.

The mathematical models for new constructions of inductors of LIM with LTMF, which enables finding MF distribution in the air gap between inductor and the secondary element, and determine interconnections between parameters and sizes of linear machines and MF value, which will increase the accuracy of calculations during the design of motors for maglev transport.

## References

1. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A. et al. Magnetic Levitation Transport Technology [Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya]. Monogr. Ed. V.A. Gapanovich. Moscow, 2014. 476 p.
2. Zaitsev A.A., Talashkin G.N., Sokolova Ya.V. Magnetically Suspended Transport [Transport na magnitnom podvese]. Monogr. St. Petersburg, 2010. 160 p.
3. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A. Magnetic Levitation Transport: Scientific Problems and Technical Solutions [Magnitolevitatsionnyi transport: nauchnyie problem i tekhnicheskiie reshniia]. Moscow, 2015. 612 p.
4. Zaitsev A.A., Morozova E.I., Talashkin G.N., Sokolova Ya.V. Magnetic Levitation Transport in the Whole Transport System of the Country [Magnitolevitatsionnyi transport v edinoi transportnoi systeme strany]. St. Petersburg, 2015. 140 p.
5. Zaitsev A.A. *Railway Transport*, 2016, no. 12, pp. 62–65.
6. Zaitsev A.A. *Railway Transport*, 2014, no. 5, pp. 69–73.
7. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A., Morozova E.I., *Proc. Petersburg State Transp. Univ.* 2014, is. 4 (41), pp. 5–15.
8. Lapidus B.M., Lapidus L.V. Railway Transport: the Philosophy of Tomorrow [Zheleznodorozhnyi transport: filosofii budushchego]. Moscow, 2015. 232 p.
9. Solomin A.V. *Proc. Rostov State Transp. Univ.*, 2004, no. 4, pp. 41–44.
10. Solomin V.A. Solomin A.V., Zamshina L.L. *Proc. Rostov State Transp. Univ.*, 2009, no. 2, pp. 120–123.
11. Solomin V.A. Solomin A.V., Zamshina L.L., Bykadorov A.L. *Proc. Rostov State Transp. Univ.*, 2012, no. 1, pp. 71–74.
12. Pashkov N.N. *Transp. Syst. Technol.*, 2015, vol. 1 (1), pp. 59–69. Available at: <http://www.transssyst.ru/razdel-2-3-pashkov.html> (accessed 27.05.2017).
13. Solomin V.A., Noskov V.N., Pustovetov M.Yu., Flegontov N.S. Lateral Self-Stabilisation System of High-Speed Maglev Transport [Sistema bokovoi samostabilizatsyi vysokoskorostnogo ekipazha s magnitnoi levitatsyiei]. *Magnetic Levitation Transp. Syst. and Technol. MTST'13. Proc. 1st Int. Sci. Conf.*, St. Petersburg, 29–31 Oct. 2013. Ed. Yu.F. Antonova. St. Petersburg, 2013, pp. 66–67.
14. A.c. USSR № 868942, IPC 41/04. 1981.
15. A.c. USSR № 801198, IPC 41/04. 1981.
16. Patent RU № 2518915, IPC H 02 K 41/025. 2014.

### Information about the author:

Andrey V. SOLOMIN, Ph. D., Cand. Sci. (Eng.) Associate Prof.  
E-mail: [vag@kaf.rgups.ru](mailto:vag@kaf.rgups.ru)  
Rostov State University of Railway Transport

В. А. Соломин, А. А. Бичилова, Л. Л. Замшина, Н. А. Трубицина

## РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ ДЛЯ МАГНИТНОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Дата поступления 24.05.2017

Решение о публикации 07.11.2017

Рассматривается регулируемый линейный асинхронный двигатель (ЛАД) с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента (ВЭ), который выполняет функции якоря машины. Линейное расположение короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД позволило предложить конструктивные варианты регулирования сопротивления обмотки ВЭ.

**Цель.** Разработать и исследовать ЛАД с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента для магнитнолевитационного транспорта.

На современном уровне развития электромеханики, асинхронного электропривода и магнитнолевитационного транспорта основным методом изменения частоты вращения двигателей и скорости линейного перемещения высокоскоростных транспортных экипажей является частотное регулирование. Частотное регулирование позволяет изменять частоту вращения машин и линейную скорость ЛАД плавно и в широком диапазоне. Высокая стоимость статических электронных преобразователей большой мощности ограничивает широкомасштабное применение частотного регулирования. Кроме того, повышение частоты тока снижает вращающий момент и тяговое усилие.

**Результаты.** Применение регулируемых линейных асинхронных двигателей с изменяемыми сопротивлениями короткозамкнутых обмоток вторичных элементов позволит расширить диапазон регулирования ЛАД, предназначенных для высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта при больших тяговых усилиях (в том числе при пуске в ход) методом вытеснения тока в пазу вторичного элемента ЛАД.

**Выводы.** Рассмотрены конструкции линейных асинхронных двигателей, вопросы расчета магнитного поля в пазу вторичного элемента, дана оценка влиянию вытеснения тока на пускорегулировочные характеристики машины.

Линейный асинхронный двигатель, регулируемая короткозамкнутая обмотка, магнитнолевитационный транспорт, магнитное поле в пазу, вытеснение тока в пазу вторичного элемента.

### Введение

С каждым годом проблемы развития транспортной отрасли во всем мире становятся все более актуальными. Особое положение в перспективной транспортной системе Российской Федерации должен занять магнитнолевитационный высокоскоростной транспорт. В России в последнее время занимаются проблемами, связанными с созданием и практическим

применением магнитнолевитационного транспорта. В его развитии заинтересовано ОАО «Российские железные дороги», поддерживающее поисковые НИР в исследовании различных аспектов данной проблемы. О серьезном отношении к проблеме создания магнитнолевитационного транспорта свидетельствует большое количество публикаций, некоторые из них имеют фундаментальный характер [1–8]. Наибольшую известность получили научные результаты, достигнутые в разработке, теоретических и экспериментальных исследованиях магнитнолевитационного транспорта научными работниками и инженерами г. Санкт-Петербурга, в первую очередь, учеными Петербургского государственного университета путей сообщения [1–7].

Вопросы регулирования скорости движения высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта всегда будут в числе самых важных. В ближайшем будущем наиболее вероятно, что в качестве основного типа тяговой машины магнитнолевитационного транспорта будет использоваться линейный асинхронный двигатель (ЛАД). Уже свыше 10 лет в Китае успешно эксплуатируется магнитнолевитационный поезд с тяговыми ЛАД. Частотное регулирование рассматривается практически безусловно как основной способ управления магнитнолевитационным транспортом с тяговыми ЛАД. Частотный способ регулирования помимо высокой стоимости статических преобразователей частоты и напряжения не обеспечивает значительных пусковых усилий и достаточных усилий тяги при низких скоростях движения.

## Цель

Цель данной статьи – разработать и исследовать ЛАД с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента для магнитнолевитационного транспорта.

В Ростовском государственном университете путей сообщения (РГУПС) разработан новый тип тяговой машины для магнитнолевитационного транспорта – ЛАД, у которого обмотка вторичного элемента (ВЭ) выполнена короткозамкнутой, с возможностью плавного изменения ее сопротивления [9]. ЛАД с короткозамкнутой обмоткой ВЭ обладает такими же пусковыми и регулировочными возможностями, как и асинхронный двигатель с фазной обмоткой. По мнению авторов, может оказаться эффективным сочетание частотного регулирования магнитнолевитационным транспортом с управлением путем изменения сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ ЛАД при высоких и низких скоростях движения.



## Конструкция и принцип действия регулируемого ЛАД

ВЭ ЛАД с короткозамкнутой обмоткой можно расположить в путевой структуре высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта, а можно установить на экипаже. С точки зрения регулирования тягового усилия и скорости движения, оба варианта практически равноценны.

В ГУПС разработаны регулируемые ЛАД с короткозамкнутой обмоткой, расположенной на вторичном элементе [10–14]. Главная особенность таких ЛАД заключается в возможности регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ, что обеспечивается линейным выполнением индуктора ЛАД и его вторичного элемента. В пазах сердечника ВЭ ЛАД уложены изолированные проводники, составляющие стержни обмотки ВЭ, с одной стороны замкнутые общей электропроводящей шиной, а с другой стороны заканчивающиеся элементом, установленным с возможностью перемещения. Заметим, что в мощных асинхронных двигателях с фазными роторами при помощи контактных колец и щеток могут коммутироваться токи порядка нескольких сотен, а то и тысяч ампер. Токи такого же порядка могут коммутироваться и в короткозамкнутых обмотках ВЭ регулируемых ЛАД.

Индукторы тяговых ЛАД данного типа могут иметь любую конструкцию. В результате перемещения замыкающего элемента ЛАД изменяется число замкнутых проводников обмотки ВЭ и регулируется ее сопротивление. Ряд конструкций ЛАД с регулируемым сопротивлением обмотки ВЭ описан в монографии [15] и в статье [16].

Регулируемый ЛАД с увеличенным пусковым усилием [10] схематически показан на рис. 1. Индуктор содержит трехфазную обмотку, а в сердечнике вторичного элемента кроме основных пазов 10, в которых расположены стержни основной короткозамкнутой обмотки ВЭ, выполнены дополнительные пазы 11 для размещения пусковой обмотки ЛАД. Стержни пусковой короткозамкнутой обмотки размещены в нижних частях дополнительных пазов для увеличения эффекта вытеснения тока при пуске двигателя. Принцип работы представленного регулируемого ЛАД: при подключении трехфазной обмотки индуктора к источнику напряжения возбуждается бегущее магнитное поле, пересекающее стержни обмотки вторичного элемента и наводящее в них электродвижущие силы (ЭДС). Для увеличения пускового тягового усилия подвижный элемент при помощи приводного механизма замыкает только стержни пусковой обмотки, размещенные в нижних частях дополнительных пазов. Под действием ЭДС по стержням пусковой обмотки потечет ток, который при взаимодействии с бегущим магнитным полем создаст пусковое тяговое усилие. При глубоком расположении в пазах узких стержней эффект вытеснения тока будет резко проявляться, сопротивление короткозамкнутой пусковой обмотки увеличится, что позволит значительно повысить пусковое тяговое усилие двигателя.

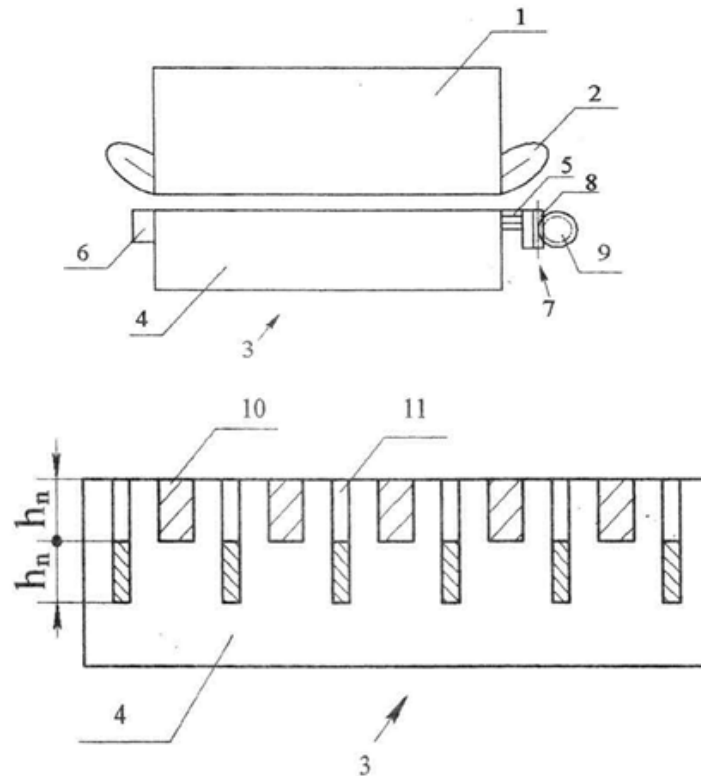


Рис. 1. Регулируемый ЛАД и его ВЭ:

- 1 – индуктор; 2 – обмотка индуктора; 3 – вторичный элемент; 4 – сердечник ВЭ;  
 5 – проводники КЗ обмотки ВЭ; 6 – шина; 7 – замыкающий элемент; 8 – зубчатая рейка;  
 9 – зубчатое колесо; 10 – пазы для основных стержней обмотки ВЭ;  
 11 – пазы для стержней пусковой обмотки

Двигатель начинает разгоняться, по мере разгона ЛАД подвижный элемент перемещается и одновременно частично замыкает стержни основной и пусковой обмоток ВЭ, а затем в номинальном режиме пусковая обмотка размыкается, а основная полностью закорачивается. В номинальном режиме регулируемый ЛАД работает с минимальными электрическими потерями в короткозамкнутой обмотке ВЭ и при высоком коэффициенте полезного действия.

### Магнитное поле и вытеснение тока в пазу вторичного элемента ЛАД

Выполнение стержней короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД из отдельных изолированных проводников, замкнутых с одной стороны общей шиной, а с другой – замыкающим элементом, содержащим электропроводящие и изоляционные участки, позволяет закорачивать проводники стержней при его перемещении. Становится возможным замкнуть отдельные проводники в каждом пазу вторичного элемента, расположенных на любом уровне по высоте паза, и получить как бы частично запол-

ненный паз ВЭ ЛАД. Возникают и новые задачи по расчету магнитного поля в пазу ВЭ и по учету влияния вытеснения тока на параметры обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД.

Расчетная модель паза ВЭ регулируемого ЛАД для данного случая показана на рис. 2. Видно, что замыкающим элементом 3 в пазах ВЭ замкнуто по два нижних изолированных проводника 1. Направление перемещения замыкающего элемента 3 показано стрелкой (рис. 2). Закороченные подвижным элементом 3 проводники 1 заштрихованы.

В процессе регулирования скорости в сторону ее уменьшения путем увеличения сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ скольжение увеличивается и возникает вытеснение тока в пазу, аналогичное пусковому режиму.

При анализе приняты допущения:

- магнитная проводимость стали сердечника ВЭ регулируемого ЛАД бесконечно велика;
- длина паза равна бесконечности;
- магнитные силовые линии перпендикулярны стенкам паза ВЭ;
- проводники, образующие стержень обмотки ВЭ, имеют бесконечно тонкую изоляцию.

Ортогональная система координат (рис. 2б) содержит ось  $z$ , направленную вдоль паза, ось  $x$ , ориентированную в поперечном направлении, и ось  $y$ , направленную вверх. С учетом допущений можно утверждать, что напряженность магнитного поля будет изменяться только по одной координате  $z$ . Уравнение для напряженности магнитного поля будет одномерным

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial y^2} = j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \dot{H}. \quad (1)$$

Общее решение уравнения (1) известно из математики

$$\dot{H} = C_1 \cdot e^{-py} + C_2 \cdot e^{py},$$

где  $p = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu_0}$ .

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  определяются на основании закона полного тока

$$\oint \dot{H} d\vec{l} = \dot{I},$$

где  $\dot{I}$  – ток, протекающий по стержню обмотки ВЭ;  
 $d\vec{l}$  – элемент длины стержня.

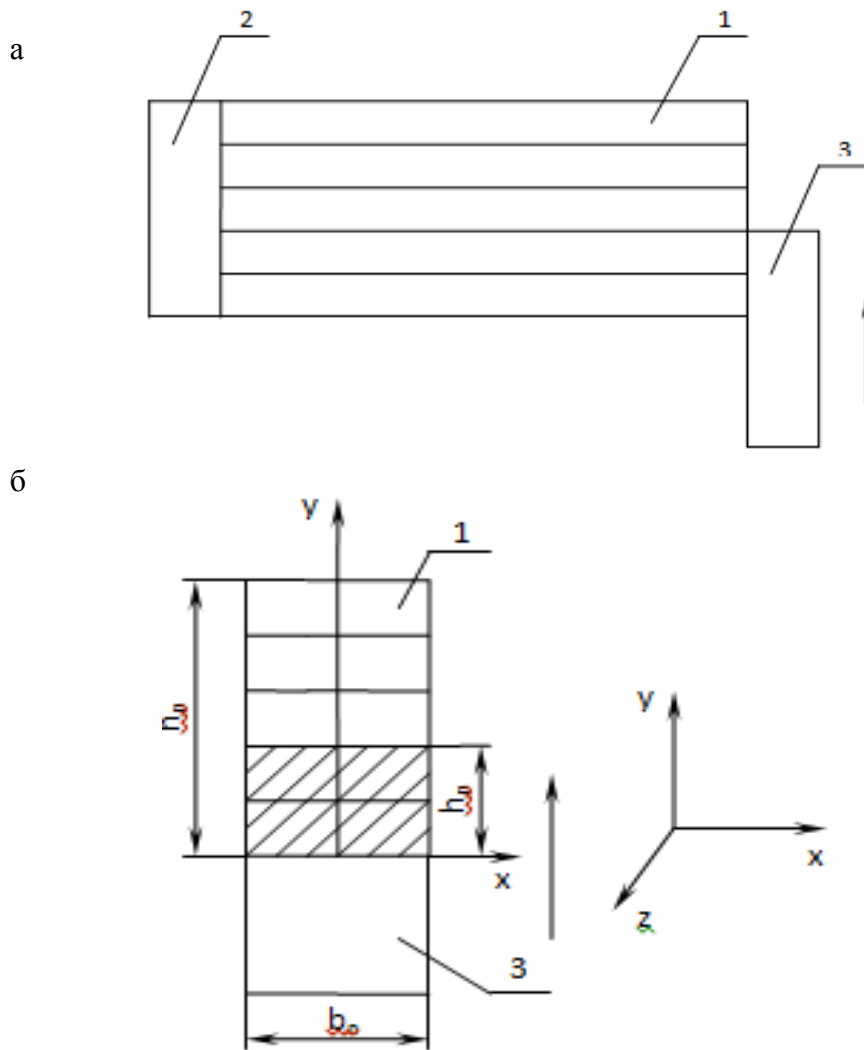


Рис. 2. Закорачивание проводников в пазу при движении замыкающего элемента снизу вверх: а) фрагмент обмотки; б) паз;  
 1 – проводники стержня; 2 – шина; 3 – замыкающий элемент

В общем случае при замыкании подвижным элементом части проводников в пазах ВЭ регулируемого ЛАД (рис. 2) уровень закорачивания будет определяться коэффициентом  $\alpha$ , лежащим в пределах  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

Тогда граничные условия будут представлены в виде  $\dot{H}b_n = 0$  при  $y = 0$  и  $\dot{H}b_n = \dot{I}$  при  $y = \alpha h_n$ .

При этих граничных условиях постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$ :

$$C_1 + C_2 = 0; \quad \frac{\dot{I}}{b_n} = C_1(e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n});$$

$$C_1 = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{1}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}}; \quad C_2 = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{1}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}}.$$

Напряженность магнитного поля в пазу ВЭ ЛАД составит

$$\dot{H} = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{e^{-py} - e^{py}}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}} = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{shpy}{shp\alpha h_n}.$$

Плотность тока в пазу ВЭ определяется уравнением

$$\dot{\delta} = rot\dot{H}.$$

Учитывая, что  $\delta_x = 0$ ;  $\delta_y = 0$ ;  $\delta_z = \dot{\delta}$ , а также  $\frac{\partial \dot{H}}{\partial x} = 0$ , получим

$$\dot{\delta} = -\frac{\partial \dot{H}}{\partial y} = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{pchpy}{shp\alpha h_n} = -\dot{\delta}_{cp} \frac{pchpy}{shp\alpha h_n}.$$

Напряженность электрического поля в пазу ВЭ ЛАД

$$\dot{E} = -\frac{\dot{\delta}}{\gamma} = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{p}{\gamma} \cdot \frac{chpy}{shp\alpha h_n}.$$

Электромагнитная мощность, поступающая в область паза, по которой протекает ток, и передаваемая через воздушный зазор от индуктора ЛАД

$$\dot{S} = \frac{1}{2} \cdot [\dot{E}(0) \cdot \dot{H}^*(0) - \dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{H}^*(\alpha h_n)],$$

где  $l$  – длина активной части стержня, лежащей в пазу.

Потери мощности при частично замкнутом стержне обмотки ВЭ равны реальной части электромагнитной мощности

$$P = -\frac{l}{2} Re[\dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{E}^*(\alpha h_n)] = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n \cdot \alpha h_n} \cdot Re \frac{p\alpha h_n \cdot chp\alpha h_n}{shp\alpha h_n}, \quad (2)$$

где  $I_m^2 = \dot{I}_m \cdot \dot{I}_m^*$  – квадрат модуля вектора тока.

Сопротивление проводников в замкнутой части стержня короткозамкнутой обмотки ВЭ постоянному току

$$R_a = \frac{1}{\gamma \cdot b_n \cdot \alpha h_n}.$$

Если  $rah_n = (1 + j)k\alpha h_n$ , то, вводя обозначение  $kh_n = \xi$  – относительной глубины проникновения тока в паз ВЭ и подставляя  $rah_n = (1 + j)\alpha\xi$  в (2), получим

$$\begin{aligned} P &= \frac{I_m^2}{2} R_a \cdot \operatorname{Re} \left[ (1 + j)\alpha\xi \cdot \frac{ch(1 + j)\alpha\xi}{sh(1 + j)\alpha\xi} \right] = \\ &= \frac{I_m^2}{2} R_a \cdot \operatorname{Re} \left[ (1 + j)\alpha\xi \cdot \frac{ch\alpha\xi \cdot \cos\alpha\xi + jsh\alpha\xi \cdot \sin\alpha\xi}{sh\alpha\xi \cdot \cos\alpha\xi + jch\alpha\xi \cdot \sin\alpha\xi} \right] = \\ &= \frac{I_m^2}{2} \alpha\xi R_a \cdot \frac{sh2\alpha\xi + \sin2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos2\alpha\xi} = R_a \frac{I_m^2}{2}, \end{aligned}$$

где  $R_a = \alpha\xi \cdot R_\alpha \cdot \frac{sh2\alpha\xi + \sin2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos2\alpha\xi}$  – сопротивление замкнутой части стержня обмотки ВЭ переменному току.

Коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления замкнутых проводников стержня ВЭ регулируемого ЛАД,

$$\varphi(\xi) = \frac{R_a}{R_\alpha} = \alpha\xi \cdot \frac{sh2\alpha\xi + \sin2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos2\alpha\xi}. \quad (3)$$

Мнимая часть электромагнитной мощности, поступающей в паз обмотки вторичного элемента ЛАД, является реактивной мощностью  $Q = I_m^2 \cdot X$ , где  $X$  – индуктивное сопротивление закороченной части стержня обмотки ВЭ регулируемого ЛАД.

Реактивная мощность, поступающая в замкнутую часть стержня,

$$\begin{aligned} Q &= -Jm \left[ \frac{l}{2} \dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{H}^*(\alpha h_n) \right] = \\ &= \frac{l}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n} \cdot Jm \left[ (1 + j)k \frac{ch(1 + j)k\alpha h_n}{sh(1 + j)k\alpha h_n} \right] = \\ &= \frac{l}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n} \cdot k \frac{sh2k\alpha h_n - \sin2k\alpha h_n}{ch2k\alpha h_n - \cos2k\alpha h_n}. \end{aligned}$$

Индуктивное сопротивление замкнутой части стержня обмотки ВЭ без учета вытеснения тока в пазу

$$X_a = \mu_0 \omega l \frac{\alpha h_n}{3b_n}.$$

Учитывая, что  $k^2 = \mu \cdot \gamma \frac{\omega}{2}$  и  $\xi = kh_n$ , получим

$$Q = X_a \frac{I_m^2}{2} \cdot \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi} = X_a \frac{I_m^2}{2},$$

где  $X_a = X_\alpha \cdot \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi}$  – индуктивное сопротивление замкнутой части стержня обмотки ВЭ с учетом вытеснения тока в пазу.

Коэффициент, учитывающий уменьшение индуктивного сопротивления замкнутой части паза ВЭ при вытеснении тока в пазу,

$$\lambda(\xi) = \frac{X_a}{X_\alpha} = \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi}. \quad (4)$$

Для учета влияния процесса вытеснения тока на параметры короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД при различном положении замыкающего элемента (рис. 2) на основании полученных соотношений (3) и (4) разработана программа расчета коэффициентов увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений обмотки ВЭ. Результаты расчета для конкретного варианта конструкции тягового регулируемого линейного асинхронного двигателя для магнитнолевитационного транспорта представлены на рис. 3, 4.

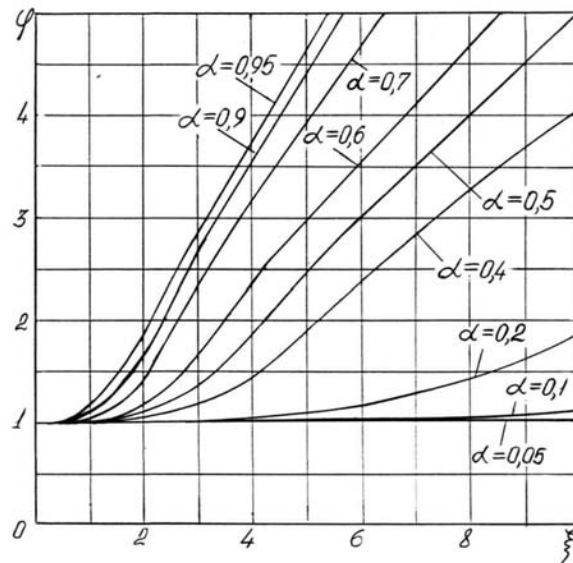


Рис. 3. Коэффициенты увеличения активного сопротивления при перемещении замыкающего элемента снизу вверх.

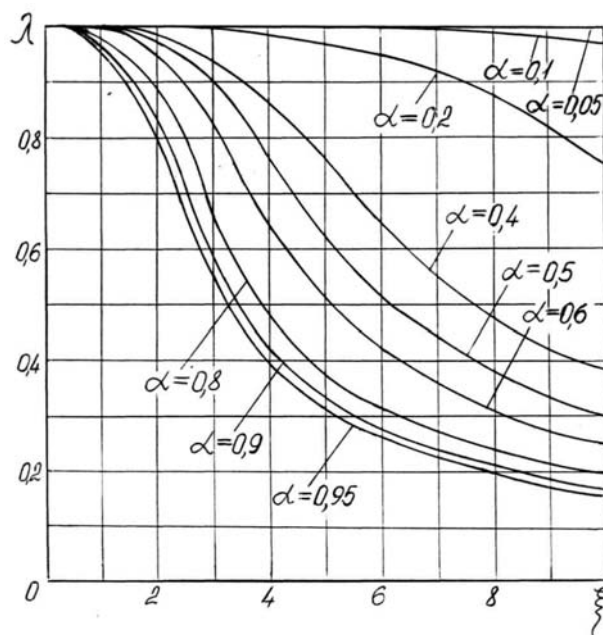


Рис. 4. Коэффициенты уменьшения индуктивного сопротивления при перемещении замыкающего элемента снизу вверх

### Заключение

Кривые на рис. 3, 4 свидетельствуют, что при увеличении количества короточенных проводников в пазу ВЭ при перемещении замыкающего элемента снизу вверх растет коэффициент увеличения активного сопротивления и падает коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ регулируемого ЛАД.



Если  $\alpha = 0,1$ , то с учетом вытеснения тока в пазу при изменении  $\xi$  от 0 до 5 коэффициент  $\varphi(\xi)$  увеличился всего на 0,82 %, а коэффициент  $\lambda(\xi)$  уменьшился на 0,29 %, при  $\alpha = 0,1$  значения активного и индуктивного сопротивлений обмотки ВЭ остаются практически неизменными и не зависят от вытеснения тока в пазу, при расчетах ЛАД это можно не учитывать.

Иная картина наблюдается при увеличении количества закороченных проводников в пазах ВЭ: при  $\alpha = 0,9$  и изменении  $\xi$  от 0 до 5 коэффициент  $\varphi(\xi)$  увеличился на 362 %, а коэффициент  $\lambda(\xi)$  уменьшился на 67 %. Здесь эффект вытеснения тока в пазу ВЭ (поверхностный эффект) значительно влияет на активное и индуктивное сопротивления обмотки ВЭ регулируемого ЛАД. Из данных расчета видно (см. рис. 3), что особенно резко возрастает активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ВЭ регулируемого линейного асинхронного двигателя, и это необходимо учитывать при расчетах пуско-регулирующих характеристик двигателя.

### 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. Зайцев А.А. Транспорт на магнитном подвесе / А.А. Зайцев, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова; под ред. А.А. Зайцева. – СПб.: Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 160 с.
3. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с.
4. Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны / А.А. Зайцев, Е.И. Морозова, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова. – СПб.: НП-Принт, 2015. – 140 с.
5. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта / А.А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 62–65.
6. Зайцев А.А. Магнитолевитационные транспортные системы и технологии / А.А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73.
7. Антонов Ю.Ф. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев, Е.И. Морозова // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 4 (41). – С. 5–15.
8. Лapidус Б.М. Железнодорожный транспорт: философия будущего / Б.М. Лapidус, Л.В. Лapidус. – М.: Прометей, 2015. – 232 с.

9. Асинхронный двигатель с разомкнутым магнитопроводом индуктора. Авторское свидетельство СССР № 1104619. 1984.

10. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2348099. 2009.

11. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2343621. 2009.

12. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2349018. 2009.

13. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2391762. 2010.

14. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2396680. 2010.

15. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2400909. 2010.

16. Соломин А.В. Математическое моделирование линейных асинхронных двигателей для тяговых и тормозных устройств высокоскоростного транспорта: моногр. / А.В. Соломин. – Ростов н/Дону: РГУПС, 2008. – 204 с.

17. Соломин А.В. Регулируемый линейный асинхронный двигатель / А.В. Соломин // Электротехника. – 2004. – № 12. – С. 31–34.

**Сведения об авторах:**

СОЛОМИН Владимир Александрович, д. т. н., профессор.

E-mail: ema@kaf.rgups.ru

БИЧИЛОВА Анастасия Алановна, магистрант.

E-mail: ema@kaf.rgups.ru

ЗАМШИНА Лариса Леонидовна, к. т. н., доцент.

E-mail: ema@rgups.ru

ТРУБИЦИНА Надежда Анатольевна, к. т. н., доцент.

E-mail: ema@rgups.ru

Ростовский государственный университет путей сообщения

© Соломин В. А., Бичилова А. А.,  
Замшина Л. Л., Трубицина Н. А., 2017

V. A. Solomin, A. A. Bichilova, L. L. Zamshina, N. A. Trybitsina

## ADJUSTABLE SQUIRREL-CAGE LINEAR INDUCTION MOTOR FOR MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT

Data of receipt 24.05.2017

Decision on publication 07.11.2017

The article deals with linear induction motor (LIM) with a squirrel-cage winding of the secondary element (SE), which functions as the armature of the machine. Linear location of squirrel-cage winding of the secondary element of LIM allowed suggesting a number of options for the regulation of the winding resistance of SE.

**Objective.** Development and research of LIM with adjustable winding resistance of the secondary element for magnetic levitation transport, and the study of the properties of adjustable LIM.

At the modern level of development of the electrical engineering, asynchronous electric drive and magnetic levitation transport, the primary method of changing the frequency rotation of motor and speed of linear motion of high-speed transport vehicles is frequency control. Frequency control allows changing the frequency of rotation of the machine and linear speed of LIM smoothly and in broad diapason. The high cost of static electronic converters of high power limits the large-scale application of frequency control. The increase of the current frequency also leads to lower torque and traction.

**Results.** According to the authors, the application of the adjustable linear induction motors with variable resistances of short-circuited windings of the secondary elements will allow to expand the range of control of LIM, intended for high-speed magnetic levitation transport with the realisation of large traction, including the start (starting the vehicle) by means of current displacement in the groove of the secondary element of the LIM.

**Conclusion.** The linear induction motors of this type, as well as the calculation of the magnetic field in the groove of the secondary element, and evaluation of the influence of the current displacement on the starting and controlling features of the machine are considered.

Squirrel-cage linear induction motor, adjustable short-circuited winding, magnetic levitation transport, the magnetic field in the groove, the current displacement in the groove of the secondary element.

### Introduction

Every year the transport development issues get more and more topical. Magnetic levitation transport is to take its special place in the creation of a future transport system of the Russian Federation. In recent years, Russian specialists have dealt with the problems related to creation and practical application of magnetic levitation transport. The development of this mode of transport draws great interest of JSC "RZD", which supports researches aimed at studying various aspects of this problem. The serious approach to creation of maglev transport is indicated by a large number of scientific publications, some of

which have a fundamental feature [1–8]. The best known research results are those obtained in development of theoretical and experimental studies of maglev transport by specialists and scientists of Saint Petersburg, and the first place, by Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University scientists [1–7].

Maglev transport speed control issues will always be among the most significant ones. In the near future, it is most obvious that linear induction motor (LIM) will be used as the primary maglev transport traction machine type. For over 10 years, China has been deploying maglev train with linear induction motors. Frequency control is undoubtedly viewed as the main way to operate maglev transport with LIM. Frequency control, ignoring high costs of static frequency and voltage converters, does not ensure achievement of significant starting impulse and sufficient traction power at low speeds.

### **Purpose**

The purpose of this study is development and research of adjustable LIM with short-circuited winding for maglev transport.

At Rostov State Transport University (RGUPS) a new type of traction machine for maglev transport has been developed – linear induction motor with the short-circuited secondary element winding with a possibility to smoothly change its resistance [9]. Linear induction motor with the short-circuited secondary element winding has the same starting and controlling possibilities as the phase winding linear induction motor does. As to the experts, it might prove efficient if we combine frequency control with operation by virtue of change of short-circuited winding of the secondary element resistance at low and high speeds.

### **Construction and work of the adjustable LIM**

The secondary element with short-circuited winding may be located in the maglev transport guideway or may be installed in the vehicle. In terms of control of traction force and speed of train, both options are equally suitable.

RGUPS has developed adjustable LIM with short-circuited windings placed in the secondary element [10–14]. The main peculiarity of these linear induction motors is that the possibility of control of short-circuited winding resistance in the secondary element, which is ensured by linear construction of LIM inductor and its secondary element. In the groove of the core of the secondary element of LIM the insulated conductors are placed, constituting the winding bars of the SE, short-circuited on the one side by general conductor bus, and short-circuited by a movable element on the other side. It needs to be pointed out that powerful LIMs with phase rotors, by virtue of slip rings and brushes, may generate power of hundreds and even thousands amp. These powerful currents may be generated by short-circuited windings of the SE in adjustable LIM.

Inductors of traction LIMs of this type may have any structure. As a result of movement of LIM locking dog, the number of short-circuited conductors of

the SE is changed, with its resistance controlled. A number of LIM structures with the SE winding resistance control is described in the monograph [15] and in the article [16].

The adjustable LIM with enhanced starting impulse [10] is schematically shown in the fig. 1. The inductor has a three-phase winding, whereas the SE core, apart from main grooves 10, in which winding bars of the main short-circuited winding of the SE, has three additional grooves 11 organised in it for the LIM starting winding to be placed therein. Short-circuited winding bars are placed in the lower parts of the additional grooves for enhancement of the current displacement effect during the start. The principle of the work of the demonstrated adjustable LIM: when a three-phase winding of the inductor is connected to a voltage source, a travelling magnetic field is excited, crossing the winding bars of the secondary element and inducing electromotive forces (EMF) in them. To increase the starting traction force, the movable element, with the help of the drive mechanism, only closes the starting winding bars located in the lower parts of the additional grooves. Under the action of EMF, a current will flow through the starting winding bars, which, when interacting with the travelling magnetic field, will create a starting traction force.

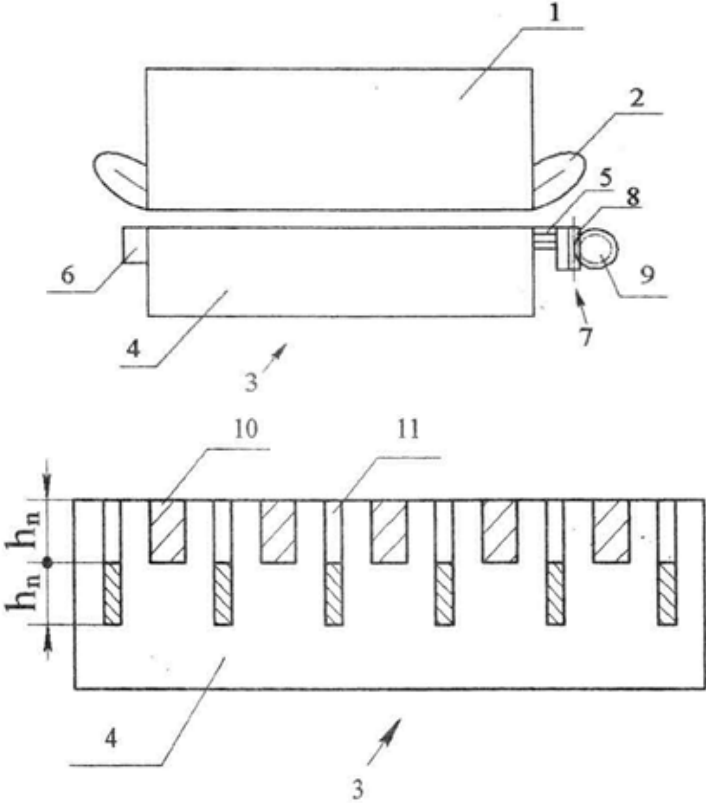


Fig. 1. Adjustable LIM and its secondary element:

- 1 – inductor; 2 – inductor winding; 3 – secondary element; 4 – secondary element core;
- 5 – conductors of short-circuited winding of the secondary element; 6 – bus; 7 – locking dog;
- 8 – tooth rack; 9 – pinion; 10 – grooves for main winding bars of the second element;
- 11 – grooves for starting winding bars

With a deep location of the narrow bars in the grooves, the current displacement effect will sharply manifest, the resistance of the short-circuited starting winding will increase, which makes it possible to significantly increase the starting traction force of the motor.

So, with the motor accelerating, the movable element moves and partially locks simultaneously starting and main winding bars of the SE. Then, in the nominal mode, the starting winding opens and the main is completely short-circuited. In the nominal mode, the adjustable LIM runs with minimum power losses in the short-circuited winding of the SE and with high energy conversion efficiency.

### **Magnetic field and current displacement in the groove of the secondary element of LIM**

Arranging short-circuited winding bars of LIM SE as separate, insulated conductors, short-circuited by common bus on the one side and on the other – by locking dog, which contains conductive and insulating sections, enables closing conductors of bars during its movement. It becomes possible to short-circuit separate conductors located at any level on the height of the groove. The possibility of obtaining the so-called partially filled groove of the LIM SE. The new tasks on calculation of the LIM SE magnetic field and counting influence of current displacement on the parameters of SE winding in the adjustable LIM.

The calculation model of the secondary element groove for this case is shown in the fig. 2. It is seen that each two lower insulated conductors 1 are short-circuited by locking dog 3 in the SE grooves. Direction of the locking dog 3 movement is pointed by an arrow (fig. 2). The conductors 1 which are short-circuited by locking dog 3 are shaded.

In the process of the speed control in the direction of its decrease by increasing the resistance of the short-circuited winding, the glide increases and a current is displaced into the groove, similar to the starting regime.

During the analysis, the following assumptions have been made:

the magnetic conductivity of the SE steel core of the adjustable LIM is infinitely big;

- the length of the groove is infinite;
- magnetic power lines are perpendicular to the walls of the SE groove;
- conductors which make the core of the SE winding have the infinitely thin insulation;

Orthogonal coordinates (fug. 2b) contains the axis  $z$ , directed along the groove, axis  $x$ , oriented transversely, and the axis  $y$ , directed upwards. With the assumptions made, we may say that the intensity of the magnetic field will

change only on the  $z$  coordinate. The magnetic field intensity equation will be one-dimensional.

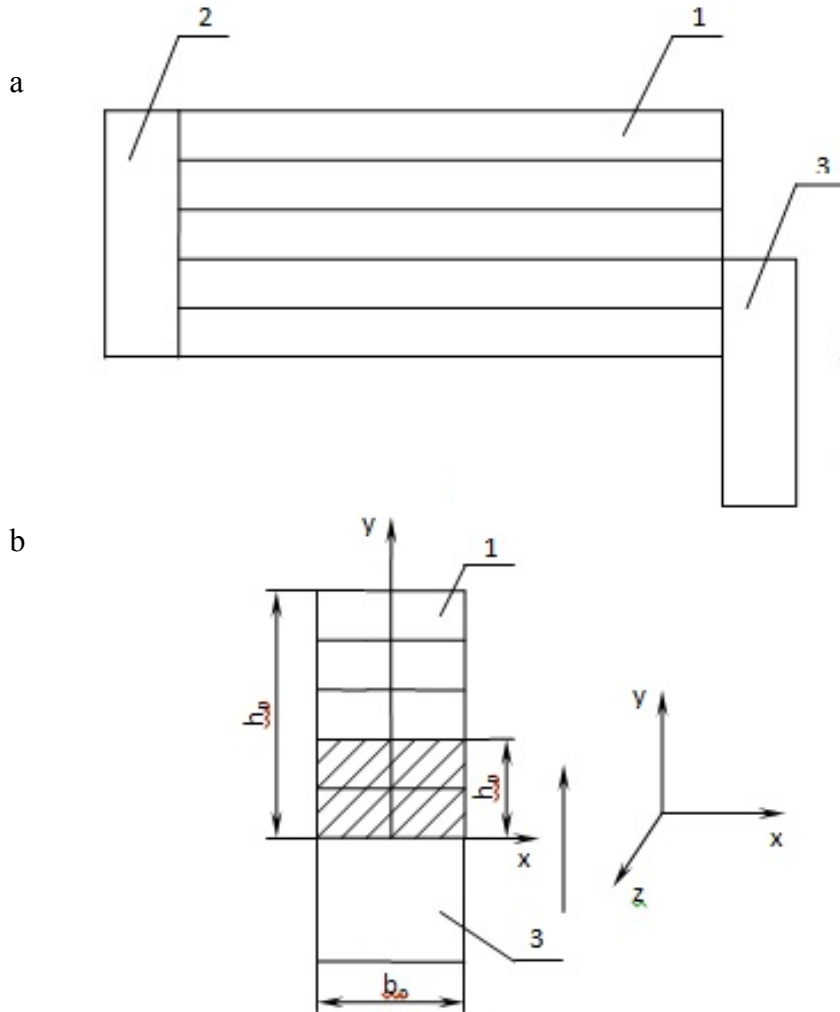


Fig. 2. Short-circuiting the conductors in the groove during movement of the locking dog from the bottom upwards: a) winding fragment; b) groove;  
1 – conductors of the core; 2 – bus; 3 – locking dog

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial y^2} = j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \dot{H}. \quad (1)$$

General equation solution (1) is known from mathematics

$$\dot{H} = C_1 \cdot e^{-py} + C_2 \cdot e^{py},$$

where  $p = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu_0}$ .

The constants of integration  $C_1$  and  $C_2$  are determined on the basis of Kirchhoff's circuit laws (*Total current law*)

$$\oint \dot{H} d\bar{l} = \dot{I},$$

where  $\dot{I}$  – current flowing in the groove of the SE winding;

$d\bar{l}$  – core length element.

Generally, when the movable element short-circuits the parts of the conductors of the SE winding in the adjustable LIM (fig. 2), the level of short-circuiting will be determined by coefficient  $\alpha$ , lying within  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

Then the boundary conditions will be  $\dot{H}b_n = 0$  with  $y = 0$  and  $\dot{H}b_n = \dot{I}$  with  $y = \alpha h_n$ .

With these boundary conditions the constants of the integration  $C_1$  and  $C_2$ :

$$C_1 + C_2 = 0; \quad \frac{\dot{I}}{b_n} = C_1(e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n});$$

$$C_1 = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{1}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}}; \quad C_2 = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{1}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}}.$$

The magnetic field intensity in the groove of the SE of LIM will make

$$\dot{H} = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{e^{-py} - e^{py}}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}} = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{shpy}{shp\alpha h_n}.$$

Current density in the groove of the SE is determined by the equation

$$\dot{\delta} = rot\dot{H}.$$

Taking into account that  $\delta_x = 0$ ;  $\delta_y = 0$ ;  $\delta_z = \dot{\delta}$ , and  $\frac{\partial \dot{H}}{\partial x} = 0$ , we obtain

$$\dot{\delta} = -\frac{\partial \dot{H}}{\partial y} = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{pchpy}{shp\alpha h_n} = -\dot{\delta}_{cp} \frac{pchpy}{shp\alpha h_n}.$$

The intensity of the electric field in the groove of the LIM SE

$$\dot{E} = -\frac{\dot{\delta}}{\gamma} = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{p}{\gamma} \cdot \frac{chpy}{shp\alpha h_n}.$$

Electromagnetic power, flowing into the groove, where the current runs, and transmitted through the air gap from the LIM inductor

$$\dot{S} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \dot{E}(0) \cdot \dot{H}^*(0) - \dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{H}^*(\alpha h_n) \right],$$



where  $l$  – length of the active part of the bar, lying in the groove.

The power loss for a partially short-circuited winding bar of the SE equals the real part of the electromagnetic power

$$P = -\frac{l}{2} \operatorname{Re} \left[ \dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{E}^*(\alpha h_n) \right] = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n \cdot \alpha h_n} \cdot \operatorname{Re} \frac{p \alpha h_n \cdot c h p \alpha h_n}{s h p \alpha h_n}, \quad (2)$$

where  $I_m^2 = \dot{I}_m \cdot \dot{I}_m^*$  – current vector squared modulus.

The resistance of conductors in the closed part of the short-circuited winding of the secondary element to the direct current

$$R_a = \frac{1}{\gamma \cdot b_n \cdot \alpha h_n}.$$

If  $p \alpha h_n = (1 + j) k \alpha h_n$ , then introducing the designation  $k h_n = \xi$  – relative depth of current penetration in the groove of the SE, and putting  $p \alpha h_n = (1 + j) \alpha \xi$  in (2), we obtain

$$\begin{aligned} P &= \frac{I_m^2}{2} R_a \cdot \operatorname{Re} \left[ (1 + j) \alpha \xi \cdot \frac{c h (1 + j) \alpha \xi}{s h (1 + j) \alpha \xi} \right] = \\ &= \frac{I_m^2}{2} R_a \cdot \operatorname{Re} \left[ (1 + j) \alpha \xi \cdot \frac{c h \alpha \xi \cdot \cos \alpha \xi + j s h \alpha \xi \cdot \sin \alpha \xi}{s h \alpha \xi \cdot \cos \alpha \xi + j c h \alpha \xi \cdot \sin \alpha \xi} \right] = \\ &= \frac{I_m^2}{2} \alpha \xi R_a \cdot \frac{s h 2 \alpha \xi + \sin 2 \alpha \xi}{c h 2 \alpha \xi - \cos 2 \alpha \xi} = R_a \frac{I_m^2}{2}, \end{aligned}$$

where  $R_a = \alpha \xi \cdot R_\alpha \cdot \frac{s h 2 \alpha \xi + \sin 2 \alpha \xi}{c h 2 \alpha \xi - \cos 2 \alpha \xi}$  – resistance of the closed part of SE core to the AC.

The coefficient considering the increase if active resistance of closed conductors of the SE core of LIM

$$\varphi(\xi) = \frac{R_a}{R_\alpha} = \alpha \xi \cdot \frac{s h 2 \alpha \xi + \sin 2 \alpha \xi}{c h 2 \alpha \xi - \cos 2 \alpha \xi}. \quad (3)$$

The imaginary part of the electromagnetic power entering the groove of the winding of the secondary element of LIM is reactive power  $Q = I_m^2 \cdot X$ , where  $X$

is the inductive resistance of the short-circuited part of the winding bar of the SE of the adjustable LIM.

Reactive power flowing into the closed part of the core

$$\begin{aligned}
 Q &= -Jm \left[ \frac{l}{2} \dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{H}^*(\alpha h_n) \right] = \\
 &= \frac{l}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n} \cdot Jm \left[ (1+j)k \frac{ch(1+j)k\alpha h_n}{sh(1+j)k\alpha h_n} \right] = \\
 &= \frac{l}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n} \cdot k \frac{sh2k\alpha h_n - \sin 2k\alpha h_n}{ch2k\alpha h_n - \cos 2k\alpha h_n}.
 \end{aligned}$$

Inductive resistance of the closed part of the SE core without taking into account current displacement in the groove

$$X_a = \mu_0 \omega l \frac{\alpha h_n}{3b_n}.$$

Taking into account that  $k^2 = \mu \cdot \gamma \frac{\omega}{2}$  and  $\xi = kh_n$ , we obtain

$$Q = X_a \frac{I_m^2}{2} \cdot \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi} = X_a \frac{I_m^2}{2},$$

where  $X_a = X_\alpha \cdot \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi}$  – inductive resistance of the short-circuited part of the core of the SE winding considering current displacement in the groove.

Coefficient considering decrease of the inductive resistance in the closed part of the SE core with current displacement in the groove

$$\lambda(\xi) = \frac{X_a}{X_\alpha} = \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi}. \quad (4)$$

To take into account the influence of the process of current displacement on the parameters of short-circuited winding of the LIM SE with different location of the locking dog (fig. 2) on the basis of the relations (3) and (4), the programme for calculation of coefficients of active resistance increase and induc-

tive resistance decrease of the SE winding. The results of the calculation for specific variation of construction of adjustable traction linear inductor motor for maglev transport are shown in the fig. 3, 4.

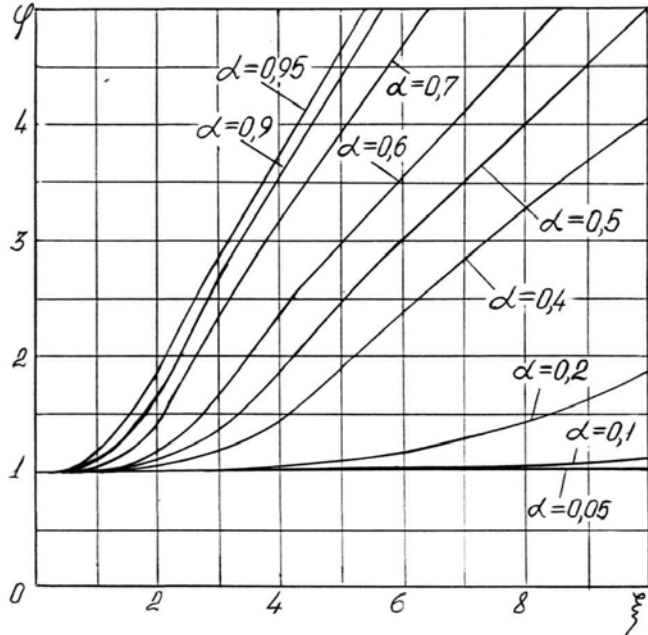


Fig. 3. Coefficients of active resistance increase when locking dog moves upwards

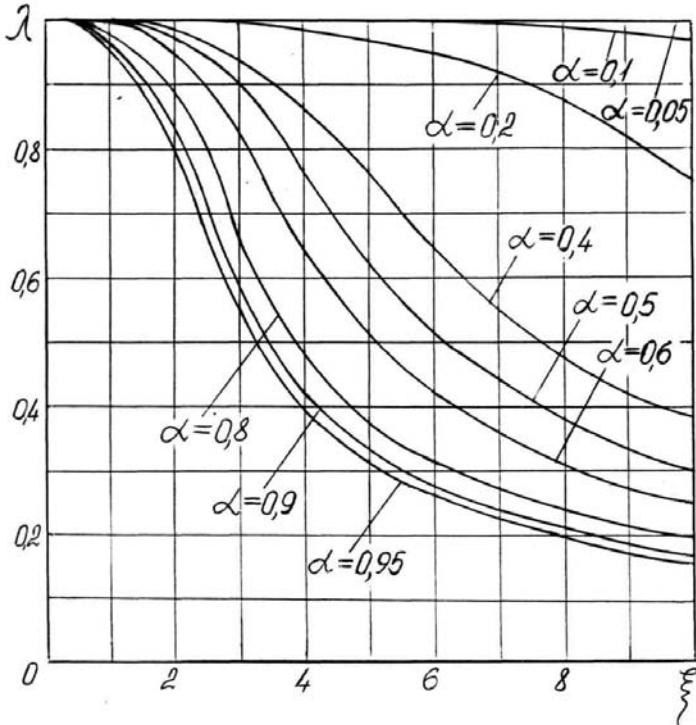


Fig. 4. Coefficients of inductive resistance decrease when locking dog moves upwards

## Conclusion

The curved lines (fig. 3, 4) indicate that with the increase of the number of the short-circuited conductors in the grooves of the SE when the locking dog moves upwards, the coefficient of active resistance rises, whereas the coefficient of the inductive resistance falls down to short-circuited winding of the secondary element of LIM.

If  $\alpha = 0,1$  then taking into account the current displacement in the groove with changes  $\xi$  from 0 to 5, the coefficient  $\varphi(\xi)$  increased only by 0,82 %, whereas the coefficient  $\lambda(\xi)$  decreased by 0,29 %; with  $\alpha = 0,1$  values of active and inductive resistances remain almost the same in the value, and are not dependent on the current displacement in the groove, which can be ignored during LIM calculations.

A different situation is observed when the quantity of short-circuited conductors in the grooves of the SE increases: at  $\alpha = 0,9$  and changes  $\xi$  from 0 to 5 the coefficient  $\varphi(\xi)$  increased by 362 %, and the coefficient  $\lambda(\xi)$  decreased by 67 %. Here the current displacement effect in the groove of the SE (surface effect) largely influences the active and inductive winding resistances of the secondary element of adjustable LIM. It is seen from the calculation data (fig. 3) that active resistance of short-circuited SE winding increases especially sharply, and this should be taken into account while calculating starting and controlling properties of the motor.

## References

1. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A. Magnetic Levitation Transport Technology [Magnitolevitatsionnaya transportnaya tehnologia]. Moscow, 2014. 476 p.
2. Zaitsev A.A., Talashkin G.N., Sokolova Ya.V. Transport on magnetic suspension [Transport na magnitnom podvесе]. St. Petersburg, 2010. 160 p.
3. Magnetic Levitation Transport: scientific problems and technical decisions [Magnitolevitatsionnyi transport: nauchnye problemy i tekhnicheskie reshenia], eds. Yu.F. Antonov, A. A. Zaitsev. Moscow, 2015. 612 p.
4. Zaitsev A.A., Morozova E.I., Talashkin G.N., Sokolova Ya.V. Magnetic levitation transport in the entire transport system of the country [Magnitolevitatsionnyi transport v edinoi transportnoi sisteme strany]. St. Petersburg, 2015. 140 p.
5. Zaitsev A.A. *Railway transp. [Zheleznodorozhnyi transport]*, 2016, no. 12, pp. 62–65.
6. Zaitsev A.A. *Railway transp. [Zheleznodorozhnyi transport]*, 2014, no. 5, pp. 69–73.

7. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A., Morozova E.I. *News of the Petersburg State Transp. Univ.* [Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya], 2014, is. 4 (41), pp. 5–15.

8. Lapidus B.M., Lapidus L.V. Railway transport: the philosophy of the future [Zheleznodorozhnyi transport: filosofiya budushchego]. Moscow, 2015. 232 p.

9. Induction motor with open magnetic circuit of the inductor [Asinkhronnyi dvigatel' s razomknutym magnitoprovodom induktora]. Copyright certificate of the USSR № 1104619. 1984.

10. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2348099.

11. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2343621.

12. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2349018.

13. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2391762.

14. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2396680.

15. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2400909.

16. Solomin A.V. Mathematical modelling of linear induction motors for traction and braking devices of high-speed transport [Matematicheskoe modelirovanie lineinykh asinkhronnykh dvigatelei dlya tyagovykh i tormoznykh ustroystv vysokoskorostnogo transporta]. Rostov-on-Don, 2008. 204 p.

17. Solomin A.V. *Electrical Engineering [Elektrotehnika]*, 2004, no. 12, pp. 31–34.

**Information about the authors:**

Vladimir A. SOLOMIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor.

E-mail: [ema@kaf.rgups.ru](mailto:ema@kaf.rgups.ru)

Anastasia A. BICHILOVA, Graduate student.

E-mail: [ema@kaf.rgups.ru](mailto:ema@kaf.rgups.ru)

Larisa L. ZAMSHINA, Can. Sci. (Eng.), Associate Prof.

E-mail: [ema@rgups.ru](mailto:ema@rgups.ru)

Nadezhda A. TRUBITSINA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof.

E-mail: [ema@rgups.ru](mailto:ema@rgups.ru)

Rostov State Transport University

© Solomin V. A., Bichilova A. A.,  
Zamshina L. L., Trybitsina N. A., 2017

Н. А. Журавлева, А. Ю. Паныхев

## **ПРОБЛЕМЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ В ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ В НОВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УКЛАДЕ**

Дата поступления 09.10.2017

Решение о публикации 19.12.2017

Предложен методологический подход к оценке стоимости скорости транспортных систем в новом технологическом укладе (The Fourth Industrial Revolution).

**Цель.** Исследовать экономические эффекты работы транспортно-логистических систем (ТЛС) как инфраструктуры экономики высоких скоростей.

**Методы.** Дан углубленный анализ железнодорожной инфраструктуры как подсистемы, имеющей выраженные конкурентные преимущества и обеспечивающей приоритетность вхождения транспортной системы в новый технологический уклад. Описаны основные параметры влияния нового технологического уклада на транспортные системы, в частности, доминанта глобального сетевого производства и потребления, управление цепочками поставок и создание добавленной стоимости через интеграцию продуктов и услуг.

Методология исследования основана на квантовом описании экономики как совокупности первичных неделимых (квантовых) экономических структур (модели или образа), действий и отношений между ними (сервисной бизнес-модели), процессов (прогнозного обслуживания, отслеживания состояния), экономического взаимодействия между объектами (совместного использования ресурсов, мгновенного реагирования) в пространстве и времени.

Введено понятие экономики высоких скоростей как меры принятия обществом инноваций, что видоизменяет все глобальные и национальные рынки, систему доступа к ним, межотраслевые цепочки создания стоимостей. Управление временем, высокие скорости становятся ключевым конкурентным преимуществом в схеме: «заказ – услуга по исполнению заказа (сервисная бизнес-модель)».

**Результаты.** Разработаны методология оценки скорости в ТЛС, новый понятийный аппарат, метод оценки эффектов от высокоскоростных магистралей. Обоснован алгоритм принятия решений об их ценности для потребителей транспортных услуг в новом технологическом укладе.

На основе анализа трех трансформаций расстояния: длины, соединяющей два объекта (выражается в единицах длины), затрат на преодоление расстояния и времени на его преодоление (скорости) – обосновано практическое применение векторного коэффициента интенсивности процессов перемещения в качестве единицы измерения любого движения, а в качестве оценки временной и пространственной эффективности проектов развития ТЛС – производство массы перевозимого товара на векторный коэффициент интенсивности перемещения.

Оценка скорости, ценность времени, экономика высоких скоростей, технологический уклад, квантовая экономика, интенсивность перемещения.

## Введение

Трансформация транспортных систем определяется новым технологическим укладом. В истории человечества каждый переход к новому укладу формировал соответствующую ему транспортную систему. Сегодня много пишут об инновационных транспортных системах, забывая, что в верхней части инновационной пирамиды лежит сама суть коммерциализации инновационного продукта, в данном случае – транспортной услуги. Именно транспортная услуга, ее свойства, процессы производства и потребления приобретают иную сущность в экономике ближайшего будущего.

В последние годы активно обсуждается вопрос, что должно стать локомотивом инновационного обновления транспортных систем: новая смешанная транспортная услуга, производство новых видов подвижного состава, или перевозка как отрасль в целом, или сфера деятельности, связывающая производство, обмен и потребление. Каким образом оценить эффект от скоростных прорывных технологий в транспортных системах?

С нашей точки зрения, проблема должна быть описана с позиций перехода общества на новый технологический уклад, а именно индустрию 4.0. Данный уклад формирует систему экономических отношений, центральным звеном которых становится категория времени<sup>22</sup>. Существенно меняется процесс ожидания новых товаров и услуг, причем в условиях индивидуальных предпочтений – в любое время и в любом месте. Экономика стремится к высоким скоростям производства и перемещения. В этом смысле проекты развития транспортных систем высоких скоростей приобретают иные свойства и, соответственно, требуют принципиальных изменений в методологии формирования оценки их ценности.

Цель данного исследования – экономическое описание оценки скорости в транспортных системах нового технологического уклада. В связи с этим возникают два объекта исследования: транспортные системы и новая экономика, суть которой – экономика высоких скоростей, формируемая новым технологическим укладом. Они столь тесно связаны, что их рассмотрение изолировано друг от друга меняет сущность оценки скорости. Это связано со следующими обстоятельствами.

1) Мир уходит в новые категории высоких скоростей. Мощнейшее развитие получают инфраструктурные отрасли экономики, в первую очередь, транспортно-логистические системы. Существенно снизится роль транспорта как посредника в пользу потребительских качеств товара и технологической ренты. Уже широко обсуждаются так называемые «шеринговая» и «циркулярная» экономика [1]. Нами ранее введено и описано понятие *экономики высоких скоростей* как способа ведения хозяй-

---

<sup>22</sup> См., например, закон экономии времени, обозначенный Д. Рикардо и введенный в оборот К. Марксом (Маркс К., Энгельс Ф. Соч. в 30 т. 1961. Т. 24. С. 648).

ства, при котором основной эффект обнаруживается с помощью оценки стоимости времени как основного, не возобновляемого ресурса [2].

2) В новейшей истории ориентированность на эффективные транспортные системы стала краеугольным камнем развития инфраструктуры конкурентных товарных рынков. При этом нынешние транспортные системы практически исчерпали резервы роста в настоящем технологическом укладе. Переход к более совершенному технологическому укладу требует соответствующей транспортной системы.

3) В транспортных системах подсистема железнодорожных перевозок имеет выраженные конкурентные преимущества, обеспечивая приоритетность их вхождения в новый технологический уклад. Это, прежде всего, возможность массовых перевозок грузов и пассажиров; высокая пропускная способность; регулярность перевозок независимо от климата; потенциал более высокой скорости, в том числе по транспортным коридорам; активное развитие высокоскоростного транспорта, в том числе грузового, например на основе магнитной левитации. Самым сложным элементом в железнодорожной перевозке является ее инфраструктура – высокая стоимость и длительные сроки окупаемости проектов ее модернизации. Но именно железнодорожная инфраструктура подвержена активному влиянию новых технологий развития высоких скоростей, таких как, например, проект Hyperloop (вакуумный поезд со скоростью 1200 км/ч, пассажирские перевозки), магнитная левитация (до 1000 км/ч, контейнерные перевозки).

Данные обстоятельства расставляют реперные точки (defining points) зарождения экономики высоких скоростей на базе высокоскоростной инфраструктуры транспортных систем в формировании нового технологического уклада.

Традиционно оценка эффективности проектов высокоскоростных магистралей (ВСМ) строится на одном или комбинации нескольких методов, таких как метод разницы эффективных транспортных расходов и метод оценки чистого дисконтированного дохода. Остальные эффекты (социальный, экологический и пр.) считаются либо косвенными методами на базе экспертных оценок, либо прямым счетом. По нашему мнению, этот подход применим только к проектам технической модернизации и реконструкции транспортных систем. В отношении транспортных систем нового технологического уклада или экономики высоких скоростей использование стандартных оценок экономической эффективности некорректно.

В данном исследовании основные проблемы оценки скорости связываются с определением стоимости транспортно-логистических систем как инфраструктуры экономики высоких скоростей, а именно с учетом комплекса эффектов, возникающих в производстве и потреблении высокоскоростной транспортной услуги, и в достигаемом эффекте мультипликации.



Методология исследования построена на квантовом описании экономики как совокупности первичных неделимых (квантовых) экономических структур (модели или образа), действий и отношений между ними (сервисной бизнес-модели), процессов (прогнозного обслуживания, отслеживания состояния), экономического взаимодействия между объектами экономического действия (совместного использования ресурсов, мгновенного реагирования) в пространстве и времени [3–5].

## **Транспортно-логистические системы как объект исследования**

Существуют различные понятия транспортно-логистических систем (ТЛС). Традиционно под ними понимают совокупность потребителей и производителей услуг, а также используемые системы управления, транспортные средства, пути сообщения, сооружения и иное имущество. В более расширенных определениях транспортно-логистическая система дана как совокупность объектов и субъектов транспортной и логистической инфраструктуры вместе с материальными, финансовыми и информационными потоками между ними, выполняющая функции транспортировки, хранения, распределения товаров, а также информационного и правового сопровождения товарных потоков.

В любом случае, чтобы транспортно-логистическая система могла четко функционировать, нужна соответствующая инфраструктура. Процессы перемещения товаров, складирования и хранения и сопровождающие их информационные потоки требуют определенных технических средств. Эти средства составляют инфраструктуру логистики, а их взаимосвязи создают логистическую систему. Инфраструктура должна обеспечивать четкое и бесперебойное выполнение всех логистических функций. В состав инфраструктуры транспортной логистики входят:

- транспортные пути всех видов транспорта, в том числе трубопроводного, а также транспортные узлы, а именно морские, речные и авиационные порты, контейнерные терминалы, железнодорожные перегрузочные и сортировочные станции, терминалы комбинированного транспорта;
- здания и постройки, где складировются и хранятся материальные ценности с техническим оснащением, позволяющим манипулировать грузами и реализовывать основные функции, например, комплектацию, декомплектацию и упаковку, а также покрытие пола, погрузочно-разгрузочные фронты, рампы;
- элементы узловой инфраструктуры логистики, такие как распределительные центры, центры логистических услуг, транспортно-складские объекты;
- устройства и средства переработки и передачи информации вместе с соответствующим программным обеспечением.

Согласно принятой в ЕС классификации, транспортно-логистическая система состоит из следующих сегментов:

- грузоперевозки и экспедиторские услуги;
- комплексные логистические услуги, включающие услуги хранения и дистрибуции товаров;
- управленческая логистика, в том числе услуги по оптимизации логистических бизнес-процессов.

С позиций нашего исследования следует описать ТЛС в качестве инфраструктурного элемента экономики высоких скоростей. Экономика ТЛС генерирует добавленную стоимость за счет сервисов составления оптимальных маршрутов доставки грузов, обеспечения полной загрузки транспортных средств, контроля прохождения грузов на всех этапах логистической цепочки и т. д.

Этот спектр услуг должен быть описан на языке потребителя, понятен ему и востребован им, а также иметь явно выраженную ценность. Каждая услуга имеет четко оговоренные параметры, гарантированное качество и известную себестоимость. Услуга может иметь несколько уровней, каждый из которых является набором собственных значений параметров услуги. Клиент выбирает состав и уровень необходимых ему услуг. Отношения между клиентом и поставщиком закрепляются соглашением SLA (Service Level Agreement).

Новый технологический уклад предполагает управление цепочками поставок и создание добавленной стоимости через интеграцию продуктов и услуг. ТЛС должна учитывать доминанту глобального сетевого производства и потребления.

В настоящее время наиболее эффективной ТЛС является система контрактной логистики (3PL), развиваемой за счет аутсорсинга части функций компаний-клиентов в сфере организации и поддержки дилерских сетей и построения цепочек движения товаров от поставщика к клиенту (inbound logistics) и от клиента к потребителям его товаров (outbound logistics), а также обратного движения материальных ценностей от потребителей к поставщику (reverse logistics). Согласно принятой классификации, контрактная логистика построена на сервисах складирования и обработки грузов, организации их доставки транспортом, а также управления движением товаров на протяжении всей цепочки поставок. По оценкам ведущих 3PL-операторов, в последние пять лет объем рынка контрактной логистики увеличивался в среднем на 8 % в год и составляет до 55 % объема мирового транспортно-логистического рынка.

Однако скорость оказания услуги контрактной логистики не может удовлетворять потребностям экономики высоких скоростей, прежде всего в силу сдерживающей транспортной инфраструктуры и фрагментарной цифровизации логистических процессов. Наибольшее соответствие может быть обеспечено логистическим уровнем 5PL (Fifth Party Logistics), или «Интернет-

логистикой», предполагающей управление всеми элементами цепочки поставок при помощи глобальных информационных технологий. При этом реализация этого уровня транспортно-логистической услуги должна быть обеспечена соответствующей скоростной инфраструктурой.

## **Экономика высоких скоростей**

Скорость в новом экономическом укладе генерирует новую экономическую сущность – экономику высоких скоростей. По своему типу экономика высоких скоростей – это экономика, где будущее время равно настоящему и прошлому времени. То есть в оценке времени совпадают прогноз, план, факт и основным инструментом ее анализа выступает прогнозная аналитика.

Экономика высоких скоростей видоизменяет все глобальные и национальные рынки, систему доступа к ним, межотраслевые цепочки создания стоимостей, соответственно, конкуренция выходит за пределы раздела существующих рынков в сторону борьбы за формирование новых. Конкуренция за товары и технологии перестанет быть актуальной: основная борьба уже идет за системы управления временем, или высокими скоростями. Как и любой тип экономики, экономика высоких скоростей изменяет не только сферу предложения, но и потребления. И этот процесс невозможно описать в последовательности: «спрос определяет предложение» или «предложение формирует спрос», т. е. базовым постулатом, на котором формируется сегодняшняя экономическая политика.

Главным показателем развития экономики высоких скоростей является мера принятия обществом инноваций, причем не только технологических, но и управленческих, экономических, социальных. Следует отметить, что с каждым новым технологическим укладом скорость принятия инноваций сокращается в разы. Так, если первая техническая революция – механизация (использование идеи воды и пара для производственных целей) длилась более ста лет, то уже нынешняя – автоматизация (использование компьютеров для автоматизации производства) с начала 2000-х годов практически полностью освоена к настоящему времени.

В основе нового технологического уклада лежит Индустриализация 4.0 – разновидность интернета вещей, концепция вычислительной сети, промышленного производства и сложных физических машин, интегрированных с интеллектуальными системами.

Технологический прогресс (его вес в изменении будущего оценивается в 79 %), в свою очередь, будет влиять на цепочку производства продукции, а именно на уход от традиционной схемы «производство – реализация» к схеме «заказ – услуга по исполнению заказа (сервисная бизнес-модель)», а изменяющаяся модель потребления «кросс-отраслевая автоматизация, моментальный заказ, сервис по требованию» – к «цепочке поставок продукции».

Следует учитывать трансформацию промышленности в сторону иной организации производства и появления «умного» продукта (услуги). Переход от массового производства к производству под заказ клиента и от предприятий полного цикла – к концентрации на конкурентных преимуществах существенно изменит и саму услугу перевозки: мелкие партии под заказ с доставкой «точно в срок» на длинные расстояния. Появление и массовое распространение «умного» продукта (сенсоры и датчики, программируемые свойства и прочее) приведут к значительному росту в его стоимости расходов на программное обеспечение и к требованию минимизации транспортной составляющей в конечной цене потребления.

Экономика высоких скоростей, построенная на совмещении будущего и настоящего времени, поменяет ценность с «владения» на «использование», поскольку для потребителя главной становится реализация индивидуальных потребностей и важнейшей проблемой станет компромисс общественных и индивидуальных потребностей.

Идет формирование новой организационной модели бизнеса. Ориентация на конкретного потребителя и всемерное использование информации как движущего ресурса, учет конкретных особенностей конкретного потребителя в конкретном месте и всемерное использование технологий цифровых трансформаций реальных бизнес-процессов перестраивают всю схему взаимоотношений в экономике и обществе. Формируется новое дерево целей трансформации: реализуемость, зрелость возможностей, полнота их оцифровывания и учет рисков при реализации.

Экономика высоких скоростей должна стремиться обеспечить нулевое время ожидания новых товаров и услуг, причем в условиях индивидуальных предпочтений – в любое время и в любом месте. Модель такой экономики должна быть «неизбежно отзывчивой» к постоянным улучшениям. Поскольку клиент является в ней жизненно важной частью успешной стратегии, его руководящая обратная связь развивает тактики, при которых стремятся совершенствовать качество и скорость обслуживания. С другой стороны, информация этой обратной связи позволяет строить все более точные аналитические прогнозы. И на этой стадии план и прогноз совпадают по времени. Это существенно меняет облик транспортно-логистических систем.

### **Методологические основы оценки скорости**

Методология оценки скорости ТЛС, соответствующей экономике высоких скоростей, требует развития понятийного аппарата, научно-методологической базы оценки эффектов от их создания и внедрения, а также обоснованного алгоритма принятия решений об их ценности для потребителей транспортных услуг в новом экономическом укладе.

Описанное выше изменение бизнес-модели перевозки приведет к трансформации транспортно-логистических систем в интегрированную логистическую поддержку производства. Это означает, что методологически оценка скорости должна быть связана с контрактом жизненного цикла продукта (услуги). Долговременные сервисные отношения должны базироваться на контракте жизненного цикла любого проекта высоких скоростей, что отражает экономически оправданное приобретение продукта и услуг его поддержки как интегрированного пакета нормированных показателей, составляющих сервис. Под нормируемыми показателями услуги мы понимаем ее операционную готовность.

Именно нормируемость показателей услуги (или продукта) обеспечивает возможность «оцифровывания» экономических процессов новых транспортных систем, их рыночного поведения, конкурентных стратегий, что ведет к пониманию стоимости скорости.

Как известно, в оценке эффективности цифровой экономики применяется показатель – единица ценности. Он связан, прежде всего, со значительно меньшей трудоемкостью всех бизнес-процессов, а также затрат общественных, интеллектуальных, политических ресурсов. Наибольшее применение в оценке уровня развития цифровой экономики получил индекс цифровизации BCG, рассчитываемый как средневзвешенная сумма трех субиндексов: развития инфраструктуры, онлайн-расходов, активности пользователей<sup>1</sup>. Данные показатели могут быть использованы нами в определении ценности времени в ТЛС экономики высоких скоростей или в новом экономическом укладе.

В данном исследовании предлагается методология оценки скорости ТЛС в новом экономическом укладе, построенная на квантовом описании экономики как совокупности:

- первичных неделимых (квантовых) экономических структур (модели или образа);
- действий и отношений между экономическими структурами (сервисной бизнес-модели);
- процессов (прогнозного обслуживания, отслеживания состояния);
- экономического взаимодействия между объектами (совместного использования ресурсов, мгновенного реагирования) в пространстве и времени.

Время как экономическая категория переносит акцент ценности с первоначальной цены приобретаемого товара или услуги на общую стоимость владения им. Владение эффективной услугой перевозки обеспечивается в том случае, когда долговременная кривая средних издержек ТЛС приобретает нисходящий характер. С железнодорожными транспортными системами это возможно, когда проекты высокоскоростного движения подтверждают

<sup>1</sup> BCG e-Intensity. URL: [https://www.bcgperspectives.com/content/interactive/telecommunications\\_media\\_entertainment\\_bcg\\_e\\_intensity\\_index](https://www.bcgperspectives.com/content/interactive/telecommunications_media_entertainment_bcg_e_intensity_index).

эффект роста доходности, обусловленного увеличением плотности сети и скоростью перемещения. Эксплуатационные удельные издержки снижаются по мере увеличения производительности железнодорожной линии, поскольку фиксированная стоимость предоставления рельсовых путей распределяется на все большее число единиц перевозок. Для обнаружения эффекта скорости железнодорожной сети требуется высокая степень использования инфраструктуры при росте скорости перевозки: чем выше степень использования, тем лучше экономика инфраструктуры, тем большая доходность может быть обеспечена ее владельцу и пользователю [6].

Время как экономически оцененную ценность в транспортной экономике можно обнаружить, используя два основных показателя: идентичный эффект (требуемому количеству и качеству транспортной услуги) при минимизации времени, затраченном на его получение, или положительную возрастающую эффективность в проектах с длительным сроком окупаемости. На транспорте положительное значение данных показателей может быть достигнуто путем внедрения новых технологий, обнаруживающих эффект в увеличении пропускной и провозной способности (скорости) транспортной системы, либо реальным ростом маржинальной доходности грузоотправителей и ростом ценности у пассажиров. В практику экономических обоснований новых железнодорожных технологий введен показатель «социальная скорость», позволяющий определить моменты времени, точки перехода на новую ступень развития линии посредством внедрения на ней новых транспортных технологий или продуктов [7].

Исходя из трех различных трансформаций расстояния: длины, соединяющей два объекта (выражается в единицах длины), затрат на преодоление расстояния и времени на его преодоление (скорости) – между ними существует взаимосвязь, а также явление замещения.

В связи с данным утверждением предлагаем следующие методологические подходы к описанию скорости.

Во-первых, следует особо подчеркнуть, что в качестве меры стоимости перевозки лежат затраты не только труда и капитала, но и времени, потому что каждая перемена пространственного положения материи требует движения, а каждое движение совершается во времени. Таким образом, процесс преодоления пространственного расстояния между начальным и конечным пунктами есть цепь действий и отношений между ними (сервисная бизнес-модель), которая может трансформироваться во временное понятие или скорость ( $Dt$ ).

Во-вторых, расстояние перемещения является интервалом, разделяющим места возникновения транспортных и пассажирских потоков. Этот интервал (дистанцию) можно рассматривать различным образом, прежде всего, как совокупность первичных неделимых (квантовых) экономических структур или пространственное расстояние, выраженное в мерах длины (километрах или милях) ( $Dl$ ).

В третьих, как мы отмечали ранее, технологии сокращения расстояния соответствуют технологическому укладу, а в нашем случае исследуются через оценку состояния ТЛС как инфраструктуры экономики высоких скоростей. Именно ТЛС генерируют затраты, связанные с преодолением расстояния. Иными словами, экономические затраты на преодоление пространственного интервала между двумя пунктами всей своей величиной отражают экономическое взаимодействие между объектами (совместное использование ресурсов, мгновенное реагирование) и в свою очередь отражаются на стоимости транспортной продукции, образуя экономическое расстояние ( $D_k$ ). Но разные расстояния имеют разную потребность их преодоления, связанную с эффектом гравитации, свойственным каждому конкретному этапу развития общества. Если опираться на принципы квантовой механики, то оператор скорости зависит от оператора импульса, деленного на массу перевозки. Эту потребность можно описать понятием направления.

Экономически направление означает, что за преодоление расстояния потребитель готов платить именно ту цену, которая соответствует требованиям к его выгоде. Наиболее корректно данное значение может отражать показатель «маржинальная прибыль». Но в данном применении его необходимо уточнить. Прежде всего, стоит отметить, что слово «прибыль» в русскоязычной экономике означает «выручка минус затраты». Термин «маржинальный доход» (от англ. *marginal revenue*) используется в двух значениях: «предельный доход» – дополнительный доход, получаемый от продажи дополнительной единицы товара, и «доход», полученный от реализации после возмещения переменных затрат. В последнем значении маржинальный доход является источником образования прибыли и покрытия постоянных затрат.

Несмотря на то, что такой расчет маржинального дохода не показывает полноту его зависимости от постоянных затрат, переменных затрат и цены, эту зависимость легко обнаружить при известной интерпретации формулы, что в нашем случае применительно к транспортной продукции – позволяет выделить в ней влияние временного и пространственного факторов.

Если предположить, что скорость является функцией трансформации расстояния и направления, то

$$Dt = f \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\infty}{n} (Dl, Dk), \text{ или } D_t = m \frac{Dl}{Dk},$$

где  $m$  – коэффициент, выражающий функциональную зависимость при различных уровнях технологии ТЛС.

Следовательно, основные проблемы учета фактора времени в стоимости железнодорожной перевозки можно оценить, используя рост маржинального дохода:

- от сокращения времени перевозки (скоростной инфраструктуры);

- развития инфраструктуры новых доходобразующих направлений;
- роста скорости на предельной дальности перемещения.

Аналогично можно оценить стоимость скорости владения любым товаром или услугой.

Рассматривая высокоскоростную транспортную систему, мы выходим на новый показатель – добавленную стоимость в единицу времени, генерируемую километром расстояния и гравитационной единицей направления. Это означает, что в оценке времени в качестве единицы измерения любого движения может быть использован векторный коэффициент интенсивности процессов перемещения, а в качестве оценки временной и пространственной эффективности проектов развития транспортно-логистических систем – произведение массы перевозимого товара на векторный коэффициент интенсивности перемещения.

Таким образом, скорость, направление и расстояние могут сформировать показатель оценки времени перемещения в денежном измерении или стоимость единицы услуги по перевозке высокоскоростной транспортно-логистической системой.

Дальнейшее моделирование и оцифровывание этих параметров есть основа подхода к оценке экономической эффективности скорости в инфраструктурных проектах экономики высоких скоростей.

### **Дискуссия (историография вопроса)**

Первые работы, описывающие время как экономическую категорию, появились в 1960-х годах. Наиболее полное исследование фактора времени в транспортном процессе принадлежит И. Тарскому [8]. Однако активная дискуссия о ценности времени и проблемах оценки скорости транспортных систем идет только в последнее время. Ее начало связано с осознанием потребности общества в высокоскоростных транспортных системах, в частности, воздействия ВСМ на трансформацию национальной и региональной экономики, с устранением региональных различий и активизацией экономического роста [9].

Часть исследований связана с областью стратегического анализа последствий ВСМ как для экологии, так и для устойчивого развития регионов. В частности, стратегии развития высокоскоростного сообщения в ЕС исследованы на основе трех высокоскоростных железных дорог с разным потенциалом: HS2 в Великобритании, RFAV в Португалии и Baltica 2 европейской железнодорожной линии Каунас. Авторы анализируют критерии необходимых и стратегически оправданных решений при принятии проектов ВСМ [10].

Ряд авторов рассматривает проблемы конкурентных моделей организаций высокоскоростных железнодорожных перевозок и влияние частоты и скорости трафика на оценку стоимости ВСМ [11].



В основном дискуссия связана с ценностью времени. В частности, исследование смешанных перевозок ВСМ, а именно интеграция железнодорожных и авиаперевозок исследуется в работе [12]. Авторы оценивают влияние сокращения времени перевозки на прибыль операторов и рост ценности данной услуги для пассажиров. В этой же работе рассматривается возможность роста стоимости интеграции на основе сокращения времени на пересадки.

В развитии проблемы интеграции высокоскоростных видов транспорта (железнодорожных и авиаперевозок) обсуждается эффективность их интермодальности и внутренней конкуренции. Ряд авторов анализирует зависимость функции спроса на перевозки от доходов населения, конкурентные издержки воздушного транспорта и цены на альтернативные перевозки железнодорожным транспортом. Ведутся оригинальные исследования перекрестной эластичности ВСМ различных видов транспорта, подтверждается рост конкурентоспособности высокоскоростных железных дорог [13].

Проблемы методологии оценки макроэкономических рисков снижения эффективности ВСМ и общих методических подходов к оценке эффективности проектов высокоскоростного движения в различных экономических условиях на основе, в частности, показателей NPV и IRR и различных значений ставки дисконтирования, рассматриваются в работе [14].

Критический анализ экономической оценки эффектов от ВСМ на основе проекта высокоскоростной железнодорожной инфраструктуры Швеции и роли этой оценки в процессе принятия решений по проекту дан в работе [15]. Автор полагает, что нынешние методики оценки таких проектов недостаточны, методологически не совместимы с пониманием реальных эффектов и скорее выполняют роль обоснования заявки на проект или намерений создать ВСМ. Мы полностью разделяем данную точку зрения.

Ряд авторов отмечает, что в методах оценки скорости должны учитываться эффекты пространственной эффективности ВСМ. В частности, такое исследование на примере ВСМ Китая приведено в работе Ш. Дзья, Ч. Чжоу, Ч. Цын [4]. Данное исследование выстраивает модель эволюции рынка с точки зрения экономического субъекта и сопоставления местоположения в условиях неоднородного пространства. Доказано, что развитие перевозок может снизить транспортные расходы, которые тесно связаны с расположением производственных ресурсов. Экономический эффект от высокоскоростного железнодорожного транспорта был изучен с помощью методов «разность в разности» (DID) и «отбор подобного по вероятности» (PSM-DID). Результаты исследования показывают, что строительство высокоскоростной железнодорожной магистрали в Китае положительно влияет на экономический рост и становится важным фактором в изменении структуры территориальной экономики Китая.

Некоторые авторы исследуют процедуры оценки пространственного воздействия ВСМ на примере городских агломераций. Авторы полагают, что территориальное воздействие ВСМ должно оцениваться двумя подходами,

т. е. учитывать проблемы как эффективности, так и равного доступа. Данная работа описывает такой метод оценки проектов ВСМ, используя процедуру анализа пространственного воздействия и вычисления показателей доступности, поддерживаемых Геоинформационной системой (GIS) [16].

Оценка пространственной эффективности транспортной логистики в региональном масштабе рассмотрена в работе П. Шрисавата, Н. Кронпрасерта и К. Арунотайанун [17]. В исследовании используется GIS для анализа многокритериальной модели и визуализации пространственных данных. Предложенный инструмент принятия решений внедрен в платформу GIS и является мощным средством при работе с комплексными пространственными данными. Такие данные, относящиеся к эффективности оценки, могут быть визуализированы для потенциальных преимуществ и недостатков каждого пространства и использованы для стратегического планирования, повышения логистической эффективности в регионах.

Для нашего исследования важны методологические работы в области квантовой экономики. В частности, в работе В. П. Маслова отражена дискуссия о психологических, социологических и статистических вопросах экономики в их связи с новой идемпотентной, или «тропической», арифметикой. Дается математическое обоснование и уточняются эмпирические статистические закономерности в экономике, важные для методологии описания экономики высоких скоростей [18]. В работе Л. Браева предложено понятие нецеситной квантовой экономики – выведение цен и циклов из технологически необходимых пропорций и лагов потребления, производства, денежного товарообмена и их модернизации [5].

## **Заключение**

Таким образом, переход общества на новый технологический уклад, а именно индустрию 4.0, формирует систему новых экономических отношений, центральным звеном которых становится категория времени. Существенно меняется система ожидания новых товаров и услуг, причем в условиях индивидуальных предпочтений – в любое время и в любом месте. Экономика стремится к высоким скоростям производства и перемещения. Появляется новая сущность – экономика высоких скоростей.

Исследование тенденций трансформации транспортно-логистических систем в новый будущий технологический уклад позволило сделать следующие выводы:

1) имеющаяся методология оценки эффективности проектов высокоскоростных транспортно-логистических систем не учитывает ценности времени;

2) формирование нового методологического подхода к оценке проектов ВСМ требует переосмысления категории времени и ее трансформации в скорость в новом технологическом укладе;

3) время как экономически оцененную ценность в транспортной экономике можно обнаружить, используя показатели пространственной эффективности и эффекта гравитации (адекватным количеству и качеству транспортной услуги) при минимизации времени, затраченном на ее производство, и положительную возрастающую эффективность в проектах за счет роста доходности потребителей транспортной услуги на стадии эксплуатации ВСМ.

Следует ожидать, что изменение бизнес-модели перевозки приведет к трансформации ТЛС в интегрированную логистическую поддержку производства. Это означает, что методологически оценка скорости должна быть связана с контрактом жизненного цикла продукта (услуги). Долговременные сервисные отношения должны базироваться на контракте жизненного цикла любого проекта высоких скоростей, что отражает экономически оправданное приобретение продукта и услуг его поддержки как интегрированного пакета нормированных показателей, составляющих сервис.

### Библиографический список

1. Dedicat Ch. Circular economy: what it means, how to get there. – URL: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-importance-of-a-circular-economy> (дата обращения 01.10.2017).

2. Журавлева Н.А. Цифровая экономика как основа экономики высоких скоростей / Н.А. Журавлева // Транспортные системы и технологии. – 2017. – № 2(8). – С. 47–49. – URL: [http://transsyst.ru/2\(8\)2017-15.html](http://transsyst.ru/2(8)2017-15.html) (дата обращения 21.11.2017).

3. Мельников В.А. Квантовая экономика действий: моногр. / В.А. Мельников. – 2-е изд., испр. и перераб. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 248 с.

4. Jia Sh. No difference in effect of high-speed rail on regional economic growth based on match effect perspective? / Sh. Jia, Ch. Zhou, Ch. Qin // Transportation Res. Part A: Policy and Practice. – 2017. – Vol. 106. – P. 144–157.

5. Браев Л. Цены и деньги. Начала нецеситной квантовой экономики / Л. Браев. – Йошкар-Ола: Диалог, 2010. – 446 с.

6. Журавлева Н.А. Экономическая оценка повышения временной и пространственной эффективности железнодорожного транспорта / Н.А. Журавлева // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии Труды 2-й Межд. науч. конф. МТСТ'14; под редакцией Ю.Ф. Антонова. – Киров, 2014. – С. 393–405.

7. Бубнова Г.В. Управление развитием специализированных железнодорожных линий – инновационный подход / Г.В. Бубнова, Ю.Н. Федоров // Экономика железных дорог. – 2014. – № 9. – С. 75–80.

8. Xia W. Air and high-speed rail transport integration on profits and welfare: effects of air-rail connecting time / W. Xia, A. Zhang // J. Air Transp. Management, 2017. – P. 181–190.

9. Тарский И. Фактор времени в транспортном процессе / И. Тарский. М: Транспорт, 1979. – 14 с.

10. Carvalho S. High speed rail comparative strategic assessments in eu member states / S. Carvalho, M. Partidario, W. Sheate // *Envir. Impact Assessment Rev.*, 2017. – Vol. 66. – P. 1–13.

11. Álvarez-SanJaime O. A model of internal and external competition in a high speed rail line / O. Álvarez-SanJaime, P. Cantos-Sanchez, R. Moner-Colonques, J.J. Sempere-Monerris // *Econ. of Transp.* – 2015. – Vol. 4, Is. 3. – P. 178–187.

12. Vickerman R. Can high-speed rail have a transformative effect on the economy? // *Transp. Policy.* – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X17301002> (дата обращения 10.11.2017).

13. Gundelfinger-Casar J. Intermodal competition between high-speed rail and air transport in Spain / J. Gundelfinger-Casar, P. Coto-Millán // *Utilities Policy.* 2017. – Vol. 47. – P. 12–17.

14. Limon T. Risk analysis and high speed rail projects in france: introducing economic slowdown into appraisal methodologies / T. Limon Y. Crozet // *Transp. Res. Procedia.* – 2017. – Vol. 25. – P. 2824–2842.

15. Ronnle E. A novel approach to economic evaluation of infrastructure? – examining the benefit analyses in the swedish high-speed rail project / E. Ronnle // *Case Studies on Transport Policy.* 2017. – Vol. 5, Is. 3. – P. 492–498.

16. Monzón E.O. Efficiency and spatial equity impacts of high-speed rail extensions in urban areas / E.O. Monzón, E. López // *Cities.* 2013. – Vol. 30. – P. 18–30.

17. Srisawat P. Development of decision support system for evaluating spatial efficiency of regional transport logistics / P. Srisawat, N. Kronprasert, K. Arunotayanun // *Transp. Res. Procedia.* 2017. – Vol. 25. – P. 4832–4851.

18. Маслов В.П. Квантовая экономика / В.П. Маслов // М.: Наука, 2006. – 96 с.

**Сведения об авторах:**

ЖУРАВЛЕВА Наталья Александровна, д. э. н., профессор, заведующая кафедрой.

E-mail: zhuravleva\_na@mail.ru

ПАНЫЧЕВ Александр Юрьевич, к. э. н., профессор, ректор.

E-mail: panichev\_a\_y@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

© Журавлева Н. А., Панычев А. Ю., 2017

N. A. Zhuravleva, A. Yu. Panychev

## PROBLEMS OF ECONOMIC ASSESSEMENT OF SPEED IN TRANSPORT AND LOGISTICAL SYSTEMS IN THE NEW TECHNOLOGICAL PARADIGM

Date of receipt 09.10.2017

Decision on publication 19.12.2017

The article suggests a methodological approach to assessment of speed costs of transport systems at the new technological paradigm (*The Fourth Industrial Revolution*).

**Objective:** The purpose of the work is to study economic effects of transport and logistical systems (TLS) performance as the infrastructure of high speeds economics.

**Methods.** Deep analysis of railway infrastructure as a subsystem has been given, which has marked competitive advantages and ensures inclusion of the transport system in the new technological paradigm.

The basic parameters of influence of new technological paradigm on transport systems, namely, dominance of global network production and consumption, supply chain management and added value creation through integration of products and services.

The methodology of the study is based upon quantum description of the economics as a combination of the initial indivisible (quantum) economic structures (model or image), actions and relations between them (service business model), processes (predictive maintenance, state tracking), economic interaction between economic action objects (joint use of resources, instant response) in the space and time.

The authors have introduced the notion of high speed economics as a measure of the society's taking innovations, which changes all national and global markets, access to them, and interbranch value chains creation. Time management, high speeds are the key competitive advantages of the scheme: "order – fulfillment of the order (service business model)".

**Results.** The methods for assessment of speed of TLS, new nomenclature, method of high speed caused effects assessment have been developed. The algorithm of decision making about value of high speeds for transport services consumers in the new technological paradigm has been justified.

On the basis of the analysis of three different distance transformation: length, connecting two objects (expressed in length units), costs and time (speed) for covering distance, – practical application of vector coefficient of the intensity of motion processes as the unit of measurement of any motion has been justified. As the assessment of time and space efficiency of TLS projects' development, the product of the weight of the goods transported and vector coefficient of motion intensity is used.

Speed assessment, time value, high speed economics, technological paradigm, quantum economics, motion intensity.

## Introduction

Transformation of transport systems is determined by new technological paradigm. The history of mankind saw every other transmission to new paradigm formed its corresponding transport system. Today, it is written much about innovative transport systems, forgetting that the top of the innovation pyramid is covered by the essence of the innovative product commercialisation – transport service in this case. It is the transport service with its properties, production and consumption processes that acquire new different essence in the near future economics.

In recent years, the issue of what should become the locomotive of innovative renewal of transport systems has been actively discussed: a new mixed transport service, production of new types of rolling stock, or transportation as an industry as a whole; or a sphere of activity linking production, exchange and consumption. How to evaluate the effect of high-speed breakthrough technologies in transport systems?

From our viewpoint, the issues should be described from the view of transition of the society to new technological paradigm, namely the industry 4.0. This paradigm forms the system of economic relations, the central part of which is the category of time<sup>23</sup>. The process of waiting for new goods and services is changing significantly, and under the conditions of individual preferences at any time and in any place. The economy is striving for high production and transportation speeds. In this respect, projects for the development of high-speed transport systems acquire other properties and, therefore, require fundamental changes in the methodology for assessing their values.

The purpose of this study is to economically describe the assessment of speed in transport systems of new technological paradigm. In this connection, two objects of research arise: transport systems and new economy, the essence of which is high speed economics, formed by new technological paradigm. They are bound so closely that considering them separately would change the essence of speed assessment. This is bound with the following circumstances.

1) The world is entering the new high-speed category. Infrastructure branches of the economy and, in the first place, transport and logistical systems will boom economically. The role of transport as an intermediary will decrease drastically in favour of consumer properties of goods and technological rent. The so-called “sharing” and “circular” economies are being widely discussed already [1]. We have previously introduced and described the notion of *high-speed economics* as a way of doing business, whereby the main effect is detected by estimating the cost of time as the main, non-renewable resource [2].

---

<sup>23</sup> See, for example, the time saving law defined by David Ricardo and introduced by Karl Marx (Marx K., Engels F. Work in 30 vol. 1961. T. 24. P. 648).

2) In the modern history, the focus on efficient transport systems has become a cornerstone of the development of the infrastructure of competitive commodity markets. At the same time, the current transport systems have practically exhausted the growth reserves in the present technological paradigm. The transition to a more advanced technological structure requires an appropriate transport system.

3) In transport systems, the subsystem of railway transportation has marked competitive advantages, thus ensuring the first place inclusion in the new technological paradigm. These are, first of all, possibility of mass freight and passengers transportation; high capacity; non-stop transportation irrespective of climate conditions; higher speed potential, including that in transport corridors; fast development of high-speed transport, including freight one, for example of the bases of magnetic suspension. The most difficult point in railway transportation is its infrastructure: high costs and long payback periods of its modernisation projects. However, on the other side, it is railway infrastructure that is exposed to new technologies influence. For example, the Hyperloop project with its 1200 km/h passenger transportation or magnetic levitation with its up to 1000 km/h container transportation.

These circumstances are the defining points of the emergence of high-speed economics on the basis of high-speed infrastructure of transport systems in the formation of the new technological paradigm.

Traditionally the assessment of efficiency of HSR projects is based upon or a combination of several methods, such as: a method of difference of efficient transport expenditures and a method of net present value assessment. Other effects (social, ecological, etc.) are considered either indirect methods on the bases of expert assessment, or a direct account. From our point of view, this approach is applicable only to technical modernisation projects and reconstruction of transport systems. In the case of transport systems of a new technological paradigm or high-speed economy, the application of standard economic efficiency assessment is incorrect.

In this study, the basic speed assessment problems are bound with determination of transport and logistical systems as infrastructure of high-speed economics, namely taking into account a set of effects arising in the production and consumption of high-speed transportation services, as well as the multiplier effect.

The set of study methods have been based upon the quantum description of economics as a combination of initial and indivisible (quantum) economic structures (model and image), actions and relations between them (service business model), processes (predictive maintenance, state tracking), economic interaction between economic action objects (joint use of resources, instant response) in the space and time [3–5].

## Transport and logistical systems as a research object

There are different notions of transport and logistical systems (TLS). Traditionally, they mean a combination of consumers and service producers, as well as the management systems used, vehicles, communication routes, structures and other property. In more extended definitions, the transport and logistical system is defined as a combination of objects and subjects of the transport and logistical infrastructure, together with material, financial and information flows between them, performing the functions of transportation, storage, distribution of goods, as well as information and legal support for commodity flows.

In any case, for a proper functioning of the TLS, the relative infrastructure is needed. The processes of transportation, storage, distribution of goods, as well as information flows accompanying them, require certain technical means. These means make the infrastructure of logistics, and their relation make the logistical system. The infrastructure should ensure accurate and uninterrupted performance of all logistical functions. The infrastructure of transport logistics encompasses:

- transport routes of all types of transport, including pipelines, as well as transport hubs, namely sea hubs, river hubs and airports, container terminals, railway transshipping and shunting stations, combined transport terminals;
- buildings and other facilities ensuring storage with its technical equipment,, enabling manipulation of freight and realisation of basic functions, for example, packaging, and loading and unloading fronts, loading ramps;
- elements of the key logistics infrastructure, such as distribution centres, logistics service centres, transport and storage facilities;
- equipment and means of information processing and transmission together with relative software.

In accordance with the EU classification, transport and logistical system has the following segments:

- freight transportation and forwarding services;
- complex logistical services including storage and distribution of goods;
- management logistics, including optimisation of logistical business processes.

From the perspective of our study, it is necessary to describe the TLS as an infrastructure element of a high-speed economy. The economy of TLS generates added value at the expense of the services of compiling optimal routes for the delivery of goods, ensuring the full load of transport means, controlling the passage of goods at all stages of the supply chain, and so on.

This service spectrum should be described in the language of a consumer namely easy to understand and sought after by them, as well as have a marked value. Every service has clearly stipulated parameters, guaranteed quality and a



known cost. The service may have several levels, each of which being a set of own service parameters value. A client chooses the contents and the level of the needed service. The relations between the client and the supplier are fixed by the SLA (Service Level Agreement).

The new technological paradigm predisposes the management of supply chains and the creation of value added through the integration of products and services. The TLS should take into account the dominance of global network production and consumption.

Now, the most efficient TLS is the Third Party Logistics, developed at the expense of outsourcing of a part of a company's functions in organisation and support of dealership network and creation of inbound logistics and outbound logistics, as well as reverse logistics. In accordance with the classification approved, 3PL is based upon on warehousing and processing services, organisation of transportation, and management of goods flow during the transportation. According to leading 3PL operators, in the last five years the contract logistics market volume has increased by an average of 8 % per year and amounts to 55 % of the volume of the global transport and logistics market.

However, the speed of providing 3PL services cannot meet the demand of high-speed economics, primarily due to constraining transport infrastructure and fragmented digitisation of logistics processes. The meeting of the demand might be achieved at the expense of logistics level 5PL (Fifth Party Logistics) or "Internet Logistics", consisting in management of all elements of the chain by means of global information technologies. At the same time, the realisation of this level of transport and logistics service should be ensured by relative high-speed infrastructure.

### **High-speed economics**

The speed in the new economic paradigm generates a new economic entity – high-speed economics. Actually, high-speed economics is an economy where the future time equals the present time and is equal to the past time. It means, in the evaluation of time, the forecast, the plan, the fact coincide with the forecast analysis being the main tool for its analysis.

High-speed economics modifies all global and national markets, the system of access to them, interbranch value chains and, accordingly, the competition goes beyond existing markets towards the struggle for the formation of new ones. Goods and technology competition will cease to be relevant – the main struggle is already going for time management systems, or high speeds. Like any type of economy, – the economy of high speeds changes not only the supply sphere, but also consumption one. And this process cannot be described as: "demand creates supply" or "supply forms demand", i. e. the basic postulate forming today's economic policy.

The main indicator of the development of a high-speed economy is the measure of innovations accepted by the society, not only technological, but also managerial, economic, social. It should be noted that with each new technological paradigm, the speed of acceptance of innovations is several times faster. So, if the first technical revolution - mechanisation (using water and steam for production purposes) lasted more than a hundred years, the current one – automation (use of computers for the automation of production) since the beginning of the 2000s has been almost completely mastered by now.

At the heart of the new technological paradigm the so-called Industrialization 4.0 lies. It is the Internet, the concept of the computer network, industrial production and sophisticated machines integrated with intelligent systems.

The technological progress (its involvement in the change of future will be measured 79 % of the entire influence) will influence the production chain, namely, cancellation of the traditional system “production-realisation” being replaced by “order-fulfillment service (service business-model)”. And the changing consumption model – “cross-branch automation, instant order, consumption service” will be replaced by “production supply chain”.

It is advisable to consider transformation of industry to some other, different production organisation and emergence of “smart” product or service. Transition from mass production to customer-ordered production and from integrated plant concentration on competitive advantages will significantly change the very service of transportation: small lots under the order with delivery «just in time» for long distances. The emergence and mass distribution of «smart» product (sensors, programmable matter, etc.) will lead to significant increase in its software costs and to the requirement to minimise the transport component at the final price of consumption.

The high-speed economy, built on the “combination” of future and present, will change the value of “ownership” to “use”, since the main thing for the consumer is the realisation of individual needs and the most important problem will be a compromise of public and individual needs.

A new organisational model of business is in the process of formation. Focus on specific consumer and the full use of information as a driving resource, consideration of specific features of a particular consumer in a particular place and use of the technologies of digital transformations of real business processes in every possible way, reconstruct the entire scheme of relationships in the economy and society. A new tree of transformation goals is being formed: realisation probability, maturity of possibilities, their completeness of digitisation and consideration of risks during implementation.

High-speed economy should strive to ensure zero time of waiting for new products and services in the conditions of individual preferences anywhere and anytime. The model of this economy should “inevitably welcome” constant improvement. Since the client is an essentially vital part of a successful strategy,

their feedback develops tactics which strives to improve quality and speed of service. On the other hand, information of this feedback enables making more precise analytical forecasts. And at this stage, the plan and forecast coincide in time. This significantly changes the image of transport and logistical systems.

### **Methods of speed assessment**

Methods of speed assessment of TLS, corresponding to the economy of high speeds, requires development of the set of notions, scientific and methodological base of evaluation of their creation and implementation effects. They also require justified algorithm of decision making as to their value for consumers of transport services in the new economic paradigm.

The above described alteration of the business model of transportation will lead to the transformation of transport and logistics systems into integrated logistical support of production. This means that methodologically, assessment of speed should be related to the contract of the product's life cycle (service). Long-term service relations should rest on the life-cycle contract of any high-speed project, which reflects the economically justified purchase of the product and its support services as an integrated package of standardised factors that make up the service. Under the standardised indicators of the service, we mean its operational readiness.

It is the standardisation (“normality”) of the factors of a service (or product) that makes it possible to “digitize” the economic processes of new transport systems, their market behaviour, competitive strategies, which leads to understanding of the cost of speed.

As it is known, in assessment of the efficiency of the digital economy, a unit of value as the indicator is used. It is connected, first of all, with considerably lesser labour intensity of all business processes, as well as costs of public, intellectual, political processes. The greatest use in assessing the level of development of the digital economy was acquired by BCG e-Intensity<sup>1</sup>, calculated as the weighted average of three subindexes: infrastructure development, online expenditures, user activity. We can use these indicators in determining the value of time in the TLS of a high-speed economy or a new economic paradigm.

This study suggest TLS speed assessment in the new economic paradigm based upon the quantum description of economics as:

- a combination of initial indivisible (quantum) economic structures (model and image);
- actions and relations between economic structures (service business model);
- processes (forecast service, state control);

---

<sup>1</sup> BCG e-Intensity. [https://www.bcgperspectives.com/content/interactive/telecommunications\\_media\\_entertainment\\_bcg\\_e\\_intensity\\_index](https://www.bcgperspectives.com/content/interactive/telecommunications_media_entertainment_bcg_e_intensity_index).

- economic interaction between economic action objects (joint exploitation of resources, instant reaction) in time and space.

Time, being an economic category, transfers the emphasis of value from the initial price of the acquired product or service to the total cost of ownership. Possession of an efficient transportation service is ensured when the long-term average cost curve of the TLS acquires a downward character. In the case of railway transport systems, it is possible when high-speed traffic projects confirm the effect of growth explained by increase of network density and speed of traffic. Operational unit costs decrease as the productivity of the railway line increases, because the fixed cost of railway operation provision is distributed to an increasing number of units of transport. To detect the speed effect of the railway network, a high degree of infrastructure operation is required with an increase in the speed of transportation: the higher the operation rate is, the better is the infrastructure economy, the greater the profitability can be provided to its owner and user [6].

Time as economically valued unit may be detected using two basic indicators: identical effect (the required quantity and quality of the transport service) with minimisation of time spent for its obtaining or positively increasing efficiency in the long-term payback projects. On the transport, positive value of these indicators can be achieved: by means of implementation of new technologies, detecting the effect in increase of capacity and speed of a transport system; by means of real growth of marginal incomes of freight senders and value growth among the passengers. The economic justification of new railway technologies had a term “social speed” introduced, which allows defining the moments of time, transition points of another stage of development of the line by means of implementation of transport technologies and products [7].

Based on the three different transformations of the distance: the length connecting two objects (expressed in units of length), the costs for covering the distance and the time to cover it (speed), there is a relationship between them and a substitution phenomenon.

In accordance with this statement, we suggest the following methodological approaches to the description of speed.

First, it should be specially emphasised that measure of the cost of transportation is not only labour and capital expenditures, but also the expenditure of time, since each change of the spatial position of matter requires motion, and every motion happens in time. Thus, the process of covering the spatial distance between the initial and final points is a chain of actions and relations between them (the service business model), which can be transformed into a temporary concept or speed ( $Dt$ ).

Secondly, the motion distance is an interval, dividing transport and freight traffic emergence places. This interval (distance) may be viewed differently. In the first place, it is a combination of initial indivisible (quantum) economic structures or a spatial distance expressed in length (kilometres, miles, etc) ( $Dl$ ).

Thirdly, as it was previously pointed out, shortening distance technologies match the technological paradigm, and in our case they are researched thorough assessment of the state of TLS as the infrastructure of high-speed economics. It is TLS that generate expenditures related to covering distances. In other words, economic expenditures on covering spatial interval between two points reflect economic interaction between objects of economic action (joint exploitation of resources, instant reaction) and in their turn, are reflected on the cost of transport production, forming economic distance ( $Dk$ ). But different distances have a different need for covering them, associated with the effect of gravity inherent in every particular stage of development of society. If we rely on the principles of quantum mechanics, then the velocity operator depends on the momentum operator divided by the mass of the transport. This need can be described by the concept of direction.

In terms of economics, direction means that for covering the distance, the consumer is willing to pay the fee that meets the requirements for its benefit. The most correct value can be reflected by the marginal profit. But in this application this indicator should be specified. First of all, it is worth saying that the word “profit” in the Russian-speaking economy means “revenue minus costs”. The term “marginal revenue” (in English) is used in two ways: “marginal profit” is the additional income received from the sale of an additional unit of goods and the “income” received from sales after recovering variable costs. In the latter sense, marginal revenue is the source of profit formation and coverage of fixed costs.

Despite the fact that such calculation of marginal revenue does not show the completeness of its dependence on fixed costs, variable costs and prices, this dependence is easy to detect with the known interpretation of the formula, which in our case, with regard to transport products, allows us to distinguish the influence of time and space factors in it.

If we assume that the velocity is the distance and direction transformation function, then

$$Dt = f \sum_{n=1}^{\infty} (Dl, Dk), \text{ or } D_t = m \frac{Dl}{Dk},$$

where  $m$  – coefficient, which reflects functional dependence at different levels of TLS technology.

Accordingly, basic problems of consideration of time factor in the cost of railway transportation may be assessed with by means growth of marginal revenue

- from shortening transit time (high-speed infrastructure);
- growth of marginal revenue from the development of the infrastructure of new income-generating directions;

- growth of marginal revenue from the growth of speed at the maximum distance of transportation.

The same way can be used when assessing the costs of any product or service ownership.

Considering high-speed transport system, we come to a new indicator – added value in the value of time, with the added value generated by distance in kilometres and gravitational value of direction. This means that in the assessment of time, the vector coefficient of the intensity of motion processes can be used as the unit of measurement of any motion, and as assessment of the temporal and spatial efficiency of projects for the development of transport and logistical systems – the product of the mass of the goods being transported by the vector coefficient of motion intensity.

Thus, the speed, direction and distance can form an indicator of the assessment of motion time in monetary terms or the cost of 1 unit of the transportation service by a high-speed transport and logistics system.

Further modelling and digitisation of these parameters are the basis of the approach to assessment of the economic efficiency of speed in the infrastructure projects of high-speed economics.

### **Discussion (history of the issue)**

The first studies describing time as the economic category sprang up in 1960s. The most complete study was made by I. Tarskii [8]. However, the active discussion about the value of time and problems of speed assessment of transport systems have been conducted only lately. The beginning of the discussion is connected with the society's understanding of demand in high-speed transport systems, namely, HSR influence on transformation of national and regional economies, elimination of regional differences and activation of economic growth [9].

Part of the studies is connected with the sphere of strategic analysis of HSR both for the environment and for sustainable growth of regions. In particular, high-speed communications development strategies in the EU have been explored on the basis of three high-speed railways with different capacities: HS2 in the UK, RFAV in Portugal and the European railway line Kaunas Baltica 2. The authors analyse the criteria for necessary and strategically justified decisions in the adoption of the HSR projects [10].

Some authors discuss the problems of competitive models of high-speed railway transportation organisations and the influence of the frequency and speed of traffic on the assessment of the cost of a high-speed railway system [11].

The most part of the discussion is related to the value of time. In particular, the study of mixed HSR transportations, namely, the integration of railway and air transports is investigated in the source [12]. The authors assess the influence of reduce of transportation time on the profits of operators and the growth of the

value of this service for passengers. In the same paper, the possibility of growing cost of integration on the basis of transport mean exchange time decrease.

In the development of the problem of the integration of high-speed modes of transport (air and railway transports), the efficiency of their intermodality and internal competition is discussed. A number of authors analyse the dependence of the demand function on transportation from the population's incomes, the competitive costs of air transport and the prices for alternative railway transportation. Original researches of the cross elasticity of high-speed lines of various types of transport are conducted, and the competitiveness of high-speed railways is confirmed [13].

The problems of the methodology for assessment of macroeconomic risks of reducing the efficiency of high-speed lines and general methodological approaches to assessment of the efficiency of high-speed traffic projects in various economic conditions, based in particular on NPV and IRR indicators and various values of the discount rate are considered in [14].

A critic analysis of the economic assessment of the effects of high-speed lines based on the Swedish high-speed railway infrastructure project and the role of this assessment in the project decision-making process is given in [15]. The author believes that the existing methods for evaluating such projects are not sufficient, they are methodologically incompatible with understanding real effects and rather serve as a justification for the application for a project or for the intent to create high-speed lines. We totally share this point of view.

Some of the authors point out that in the methods of speed assessment the high-speed lines spatial efficiency effects should be considered. In particular, this kind of research of the basis of China's HSR is seen in the work of Sh. Jia, Ch. Zhou, Ch. Qin [4]. This study constructs a market area evolution model from the perspective of economic subject and location matching under the hypothesis of non-homogeneous space. It is proved that transportation development can reduce transport costs, which is closely related to location factor endowments the economic impact of high-speed rail were studied by DID and PSM-DID methods. The results show that China's high-speed rail construction has a positive effect on economic growth and will become an important force in reshaping the organization of China's spatial economy.

Procedures of HSR spatial influence are researched by a number of authors, in particular, on the example of agglomerations. The authors maintain that, procedures for assessing the spatial impacts of HSR must therefore follow a twofold approach which addresses issues of both efficiency and equity. This analysis can be made by jointly assessing both the magnitude and distribution of the accessibility improvements deriving from a HSR project. This paper describes an assessment methodology for HSR projects which follows this twofold approach. The procedure uses spatial impact analysis techniques and is based on the computation of accessibility indicators, supported by a Geographical Information System (GIS) [16].

The assessment of spatial efficiency of transport logistics on the regional scale has been considered in the work of P. Srisawat, N. Kronprasert, K. Arunotayanun [17]. This study used the GIS technology to analyse the Multi-Criteria Decision-Making model and visualise the spatial data. The proposed spatial decision-making tool embedded in a GIS platform can be a powerful tool to support decision made in case of highly complex spatial data. Such data related to efficiency evaluation can be visualised for the potential, advantages, and disadvantages of each area and can be used for strategic planning, enhancing logistics efficiency in regional areas.

For the purposes of this study, the methodological work in the field of quantum mechanics is significant. In particular, Maslov's work reflects a discussion on the psychological, sociological and statistical issues of the economy in their connection with the new idempotent, or "tropical" arithmetic. The mathematical substantiation and refinement of empirical statistical regularities in the economy, which is important for the methodology of describing the economy of high speeds, is given [18]. In L. Braev's work, the concept of a non-quantum quantum economy is proposed: the deduction of prices and cycles from technologically necessary proportions and lags of consumption, production, money exchange and their modernisation [5].

## **Conclusion**

Thus, transition of the society to new technological paradigm, the Industry 4.0, forms a new system of economic relationships, the central point of which is the category of time. The system of waiting for new goods and services is changing significantly, and in the conditions of individual preferences at any time and in any place. The economy is striving for high production and transportation speeds. A new essence appears - the economy of high speeds.

This research of tendencies of transformation of transport and logistical systems into a new future technological paradigm allowed drawing the following conclusions:

1) the existing methodology of assessment of the efficiency of projects of high-speed transport and logistics systems does not take into account the value of time;

2) the formation of a new methodological approach to the assessment of high-speed projects requires rethinking the category of time and its transformation into speed in a new technological paradigm;

3) time as economically valued unit may be detected using two basic indicators: identical effect (the required quantity and quality of the transport service) with minimisation of time spent for its production and positive rising efficiency in the projects owing to increase in the profitability of transport service consumers on stage of operation.



We should expect that alteration of the business model of transportation will lead to the transformation of the TLS into integrated logistical support of production. This means that the methodological assessment of speed should be related to the contract of the product's life cycle (service). Long-term service relations will have to be based on the life-cycle contract of any high-speed project, which reflects the economically justified purchase of the product and its support services as an integrated package of standardised indicators that make up the service.

## References

1. Dedicat Ch. Circular economy: what it means, how to get there. Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-importance-of-a-circular-economy> (accessed 01.10.2017).
2. Zhuravleva N.A. *Transp. Syst. Technol.*, 2017, no. 2 (8), pp. 47–49. Available at: [http://transsyst.ru/2\(8\)2017-15.html](http://transsyst.ru/2(8)2017-15.html) (accessed 21.11.2017).
3. Melnikov V.A. Quantum Economics of Action [Kvantovaya ekonomika deistvii]. Krasnoyarsk, 2011. 248 p.
4. Jia Sh., Zhou Ch., Qin Ch. *Transportation Res. Part A: Policy and Practice*, 2017, vol. 106, pp. 144–157.
5. Braev L. Prices and money. The beginning of a non-quantum economy [Tseny i den'gi. Nachala nekvantovoi ekonomiki]. Yoshkar-Ola, 2010. 446 p.
6. Zhuravleva N.A. Economic Evaluation of Increase of Time and Spatial Efficiency of Railway Transport [Ekonomicheskaya otsenka povysheniya vremennoi i prostranstvennoi effektivnosti zheleznodorozhnogo transporta]. *Proc. 2-nd Int. Sci. Conf. Maglev Transport Systems and Technologies [Trudy 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Magnitolevitatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii"]*. Kirov, 2014, pp. 393–405.
7. Bubnova G.V., Fedorov Yu.N. *Econ. Railways [Ehkonomika zheleznih dorog]*, 2014, no. 9, pp. 75–80.
8. Xia W., Zhang A. J. *Air Transp. Management*, 2017, pp. 181–190.
9. Tarskii I. The Time Factor in the Transport Process [Faktor vremeni v transportnom protsesse]. Moscow, 1979, 14 p.
10. Carvalho S., Partidario M., Sheate W. *Envir. Impact Assess. Rev.*, 2017, vol. 66, pp. 1–13.
11. Álvarez-SanJaime O., Cantos-Sanchez P., Moner-Colonques R. Sempere-Monerris J.J. *Econ. of Transp.*, 2015, vol. 4, Is. 3, pp. 178–187.
12. Vickerman R. Can High-Speed Rail Have a Transformative Effect on the Economy? *Transp. Policy*. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X17301002> (accessed 10.11.2017).
13. Gundelfinger-Casar J., Coto-Millán P. *Utilities Policy*, 2017, vol. 47, pp. 12–17.

14. Limon T., Crozet Y. *Transp. Res. Procedia*, 2017, vol. 25, pp. 2824–2842.
15. Ronnle E. *Case Studies on Transport Policy*, 2017, vol. 5, Is. 3, pp. 492–498.
16. Monzón E.O., López E. *Cities*, 2013, vol. 30, pp. 18–30.
17. Srisawat P., Kronprasert N., Arunotayanun K. *Transp. Res. Procedia*, 2017, vol. 25, pp. 4832–4851.
18. Maslov V.P. *Quantum Economics [Kvantovaya ekonomika]*. Moscow, 2006. 96 p.

**Information about the authors:**

Natalia A. ZHURAVLEVA, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department chair.

E-mail: zhuravleva\_na@mail.ru

Alexander Yu. PANYCHEV, Cand. Sci. (Econ.), Rector.

E-mail: panichev\_a\_y@mail.ru

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

© Zhuravleva N. A., Panychev A. Yu., 2017

**М. В. Федорова**

## **ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ**

Дата поступления 01.11.2017

Решение о публикации 11.01.2017

**Введение.** На современном этапе развития методических подходов к оценке социально-экономической эффективности все внешние эффекты проекта делятся на те, которые можно и которые нельзя выразить в денежных единицах. В свою очередь, последние разделяются на имеющие количественное выражение и описываемые только на качественном уровне. Внешние эффекты, которые можно оценить в денежном выражении, непосредственно включаются в расчеты социально-экономической эффективности проекта в виде дополнительных притоков и оттоков денежных средств.

**Постановка проблемы.** Концептуальной основой оценки социально-экономической эффективности новых скоростных линий является всесторонний учет всех внешних эффектов от реализации инвестиционного проекта (экономических и неэкономических), которые не отражаются на стоимостных показателях деятельности участников проекта.

**Цель.** Разработать систему показателей для оценки социально-экономической эффективности стратегии развития скоростного городского транспорта.

**Методы.** Изучение существующих методик оценки социально-экономической эффективности, поиск недостатков и преимуществ, исследование преимуществ магнитолевитационной технологии.

**Результаты.** Особое значение приобретает разработка данной системы показателей для магнитолевитационного транспорта, отличающегося такими преимуществами, как невозможность схода с рельсов, большая маршрутная скорость, следовательно, меньшие затраты времени в пути, меньший уровень шума и вибрации, чем у легкорельсового транспорта и метро, полное отсутствие пыли.

**Заключение.** Предлагаемая система показателей для оценки социально-экономической эффективности стратегии развития скоростного городского транспорта учитывает все преимущества магнитолевитационной технологии и делает ее приоритетной при выборе скоростного городского транспорта.

Социально-экономическая эффективность, внешние эффекты, скоростной городской транспорт, магнитная левитация.

## Введение

Оценка экономической эффективности стратегии скоростного городского транспорта является заключительным этапом формирования стратегии. При ее разработке необходимо создать критерии оценок ее реализации и итогового состояния компании.

Для эффективности, финансовая информация должна быть оптимальной по объему, своевременной, достоверной, значимой, связываться с приоритетными целями и задачами стратегии.

В зарубежной практике используют такие методы оценки стратегии: анализ жизненного цикла, анализ портфеля заказов, матрица МакКинси, бенчмаркинг. Все они связаны с соответствием конкретных вариантов стратегии положению организации на рынке и ее относительным стратегическим возможностям. Но эти методы носят описательный характер и не позволяют количественно оценить социально-экономическую эффективность стратегии скоростного городского транспорта, поэтому мы обоснуем систему показателей ее оценки.

В работе проанализированы имеющиеся методики оценки социально-экономической эффективности и сделаны выводы.

Расчеты коммерческой, бюджетной, экономической и социально-экономической эффективности инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте выполняются преимущественно в соответствии со следующими методическими материалами:

- с методическими рекомендациями по оценке инвестиционных проектов (во второй редакции), утвержденными Министерством экономики РФ, Минфином РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике № ВК 477 от 21.06.1999 г. (далее – Методика № ВК 477 от 21.06.1999 г.);
- методическими рекомендациями по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте (приложение к указанию МПС России от 31.08.1998 г. № В-1024у) (далее – Методика № В-1024у от 31.08.1998 г.);
- методикой расчета показателей и применения критериев эффективности региональных инвестиционных проектов, утвержденной приказом Министерства регионального развития РФ от 31.07.2008 г. № 117 (далее – Методика № 117 от 31.07.2008 г.);
- методикой расчета показателей и применения критериев эффективности инвестиционных проектов, претендующих на получение государственной поддержки за счет средств Инве-

стиционного фонда РФ, утвержденной приказом Минэкономразвития и Минфином от 23.05.2006 г. № 139/82н (далее – Методика № 139/82н от 23.05.2006 г.);

- методикой оценки социально-экономической эффективности строительства новых железнодорожных линий общего пользования, утвержденной старшим вице-президентом ОАО «РЖД» Б.М. Лapidусом 29.08.2009 г. (далее – Методика ОАО «РЖД» от 29.08.2009 г.).

Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия инвестиционного проекта для общества в целом: как непосредственные результаты и затраты проекта, так и «внешние» затраты и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Действующая общая схема оценки социально-экономической эффективности инвестиционных проектов (представлена ниже) позволяет выявить и определить общественную эффективность как экономическую категорию [1].

Некоторые виды деятельности в сфере производства и потребления обуславливают прямые издержки или выгоды для потребителей и фирм, не являющихся непосредственными участниками этих видов деятельности. Соответственно, такого рода результаты не могут быть учтены в экономических показателях производителя товаров и услуг: затратах, доходах, прибыли и т. д. Недооценка издержек и выгод третьих лиц приводит к завышению либо к занижению объема выпуска благ по сравнению с эффективным с общественной точки зрения объемом выпуска. Речь идет о существовании так называемых внешних эффектов (экстерналий).

Внешний эффект – это затраты и результаты проекта, не нашедшие адекватного отражения в показателях хозяйственной деятельности субъектов экономической деятельности, участвующих в проекте.

В самом общем виде внешние эффекты можно разделить на экологические (иногда их называют технологические), социальные, экономические и общественные блага, не имеющие цены.

К экологическим (технологическим) экстерналиям относятся:

- изменение загрязнения почв, вредных выбросов в атмосферу, в водоемы;
- неэффективное использование месторождений полезных ископаемых и сельскохозяйственных угодий;
- нарушение экологического (биологического) баланса территории;
- уничтожение (приращение) лесов, зеленых насаждений в городских поселениях;
- угрозы взрывов, пожаров и т. п.

Внешние эффекты социального характера включают экстерналии, непосредственно связанные с уровнем жизни населения (в отличие от технологических, влияние которых можно считать опосредованным). К ним можно отнести:

- изменение доходов населения, безработицы, цен на товары и услуги, качества продуктов питания, качества и стоимости жилья, обеспеченности жильем, обеспеченности услугами хозяйственно-бытового и коммунального назначения, учреждений культуры, спорта, транспортного обслуживания, уровня образования и здравоохранения, условий труда, числа рабочих мест с тяжелыми, вредными и опасными условиями труда, профессиональных заболеваний и производственного травматизма, количества правонарушений;
- экономию или дополнительные затраты свободного времени населения за счет различных факторов.

Внешние эффекты экономического характера отражаются в затратах и доходах предприятий и организаций, не участвующих в проекте. К ним можно отнести:

- изменение стоимости земли и объектов недвижимости, не связанных с проектом, в результате его реализации, затрат на предприятиях, не участвующих в проекте;
- создание и развитие новых производств (за счет обеспечения транспортом, сырьем, инновационными разработками);
- экономию на транспортных расходах предприятий здравоохранения, культуры за счет строительства новой дороги и т. д.

Один из основных способов учета внешних эффектов в инвестиционном проектировании – это их включение в цены производимых товаров и услуг и потребляемых ресурсов. Корректировка рыночных цен для расчета эффективности проектов с общественной точки зрения (социально-экономической эффективности) носит название конверсии рыночных цен. Новые, скорректированные цены называются также экономическими, в западной литературе – теневыми (*shadow prices*).

В качестве источников информации для разработки оценки социально-экономической эффективности инвестиционного проекта строительства новой скоростной линии рассматриваются:

- проектные материалы в объеме ТЭО, обоснования инвестиций рассматриваемого проекта;
- экспертные оценки влияния реализации инвестиционного проекта на параметры социально-экономического развития Российской Федерации, региона, интересующих отраслей и предприятий с учетом значимости рассматриваемого проекта.

В расчетах социально-экономической эффективности следует учитывать целевое назначение проектов строительства новых скоростных линий, их общественную значимость и экономическое окружение.

Реализация проектов строительства новых скоростных линий обеспечивает достижение ряда целей, генерацию эффектов (включая отрицательные), различающихся по степени их социально-экономической значимости для страны в целом, отдельных регионов, отраслей, участников проекта. Состав целей, эффектов в значительной степени обуславливается отношением рассматриваемой новой железнодорожной линии к той или иной категории в соответствии со стратегией. Отдельные цели, эффекты могут достигаться, генерироваться только при строительстве и последующей эксплуатации железнодорожных линий определенных категорий, например, существенного сокращения времени в пути для пассажиров, перевозимых по железной дороге, можно добиться только при строительстве железных дорог, специализированных для высокоскоростного движения.

Экономическое окружение проекта определяется границами его влияния на экономическую, социальную, экологическую сферы жизнедеятельности общества и обусловлено следующими факторами:

- общественной значимостью железнодорожной линии;
- категорией линии;
- потребностью в ресурсах для строительства линии;
- составом «получателей» эффектов.

Нынешние методические подходы к оценке социально-экономической эффективности все внешние эффекты проекта делят на те, которые можно и которые нельзя выразить в денежных единицах. В свою очередь, последние разделяются на имеющие количественное выражение и описываемые только на качественном уровне. Внешние эффекты, которые можно оценить в денежном выражении, непосредственно включаются в расчеты социально-экономической эффективности проекта в виде дополнительных притоков и оттоков денежных средств.

Концептуальной основой оценки социально-экономической эффективности новых скоростных линий является всесторонний учет всех внешних эффектов от реализации инвестиционного проекта (экономических и неэкономических), которые не отражаются на стоимостных показателях деятельности участников проекта. Внешние эффекты должны учитываться в стоимостной форме и рассчитываться с использованием соответствующих нормативных и удельных характеристик. В отсутствие на современном этапе расчетных методов стоимостной оценки ряда внешних эффектов и общепринятых подходов к их учету при оценке социально-экономической эффективности инвестиционных проектов строительства новых железнодорожных линий одной из задач является систематизация и развитие подходов к учету внешних эффектов, генерируемых в социально-экономической сфере деятельности общества при реализации проектов строительства новых железнодорожных линий общего пользования.

Методика оценки социально-экономической эффективности новой скоростной линии построена исходя из следующей классификации внешних эффектов:

- экономические;
- социальные;
- экологические.

Из-за специфики инновационной транспортной технологии система показателей оценки социально-экономической эффективности стратегии дополнена и уточнена. В таблице предложены показатели для оценки социально-экономической эффективности стратегии развития скоростного городского транспорта.

Особое значение приобретает разработка данной системы показателей для МЛТ, отличающегося такими преимуществами, как невозможность схода с рельсов, большая маршрутная скорость, следовательно, меньшие затраты времени в пути, меньший уровень шума и вибрации, чем у ЛРТ и метро, полное отсутствие пыли [2]. Для оценки стратегии развития скоростного городского пассажирского транспорта предложены три группы показателей.

Развитие системы магнитолевитационного транспорта (МЛТ) сдерживают устаревшие и не обновлявшиеся много десятилетий нормы их проектирования, не учитывающие характеристик современного подвижного состава. Кроме того, созданию современных интегрированных систем легкорельсового транспорта препятствует отсутствие отечественного подвижного состава [3]. Учитывая преимущества МЛТ, приоритетной для Санкт-Петербурга является задача разработки и внедрения систем легкого рельсового транспорта по направлениям концентрации мощных пассажиропотоков, не обслуживаемых метрополитеном [4, 5].

Есть две категории магнитолевитационного транспорта в соответствии с назначением и техническими параметрами:

- внутригородской – надземный и подземный, а также транспорт для пригородных сообщений, который характеризуется скоростями движения до 200 км/ч;
- магистральный, может быть с высокими и сверхвысокими скоростями движения вплоть до 1000 км/ч, если использовать вакуумную трубу.

Городской предназначен для связи центра города с микрорайонами, крупными транспортно-пересадочными узлами – железнодорожными и автобусными вокзалами, станциями метрополитена, воздушными, морскими и речными портами [6–12]. Магистральный предназначен для скоростного до 400 км/ч и сверхвысокоскоростного до 1000 км/ч междугородного и трансконтинентального сообщения.

Система показателей разработана с учетом специфики инновационных транспортных проектов, а именно проекта создания МЛТ [13].



**Показатели для оценки социально-экономической  
эффективности стратегии развития скоростного городского транспорта**

Показатель	Значения
Изменение затрат времени пассажиров в пути, тыс. руб.	$\sum ESTT_t^i = \sum (P_{ij}^E \times \text{Vot}_{ik}^E \times TC_{ij}^E) - \sum (P_{ik}^{HSR} \times \text{Vot}_k^E \times TC_i^{HSR}),$ <p>где <math>i</math> – связь;  <math>j</math> – вид городского транспорта;  <math>k</math> – цель поездки;  <math>ESTT_t^i</math> – эффект от экономии времени в пути пользователей всех видов городского транспорта при реализации проекта МЛТ в году <math>t</math>;  <math>P_{ij}^E</math> – объём пассажиропотока на <math>i</math>-й связи на <math>j</math>-м виде транспорта с <math>k</math> целью поездки в году <math>t</math> в «нулевом варианте»;  <math>\text{Vot}_{ik}^E</math> – стоимость времени пассажира на <math>i</math>-й связи с <math>k</math> целью поездки в году <math>t</math>;  <math>TC_{ij}^E</math> – затраты времени пассажира в пути на <math>i</math>-й связи на <math>j</math>-м виде городского транспорта в году <math>t</math>;  <math>P_{ik}^{HSR}</math> – объём пассажиропотока на <math>i</math>-й связи с <math>k</math> целью поездки в году <math>t</math> при реализации проекта МЛТ;  <math>TC_i^{HSR}</math> – затраты времени пассажира в пути на <math>i</math>-й связи на <math>j</math>-м виде городского транспорта в году <math>t</math> при реализации проекта МЛТ</p>
Эффект от снижения вредного воздействия на окружающую среду при реализации проекта МЛТ, тыс. руб.	$EED = VED^0 - VED^{HSR},$ <p>где <math>VED^0</math> – стоимостная оценка экологического ущерба в «нулевом» варианте;  <math>VED^{HSR}</math> – стоимостная оценка экологического ущерба при реализации проекта МЛТ.          При рассматриваемом подходе ущерб окружающей среде формируется из трёх компонентов:  <math display="block">VED = VE_{miz} + VCH + VN,</math> <p>где <math>VE_{miz}</math> – стоимостная оценка выбросов загрязняющих веществ в атмосферу;  <math>VCH</math> – стоимостная оценка вредного воздействия на климат;  <math>VN</math> – стоимостная оценка шумового воздействия на окружающую среду</p> </p>
Эффект от повышения безопасности при реализации проекта МЛТ, тыс. руб.	$\sum ES_t = \sum (Pkm_{ij} \times r_j^S) - \sum (Pkm_t^{HSR} \times r_t^{S, HSR}),$ <p>где <math>i</math> – связь;  <math>j</math> – вид городского транспорта;  <math>ES</math> – эффект от повышения безопасности при поездках пользователей всех видов транспорта при реализации проекта МЛТ;  <math>Pkm_{ij}</math> – пассажирооборот на <math>i</math>-й связи на <math>j</math>-м виде городского транспорта в «нулевом варианте»;  <math>r_j^S</math> – стоимостная оценка аварийных затрат на <math>j</math>-м виде городского транспорта;  <math>Pkm_t^{HSR}</math> – пассажирооборот на <math>i</math>-й связи с <math>k</math> целью поездки в году <math>t</math> при реализации проекта МЛТ;  <math>r_t^{S, HSR}</math> – стоимостная оценка аварийных затрат при реализации проекта МЛТ</p>

**Изменение затрат времени пассажиров в пути**

Развитие скоростного пассажирского транспорта способствует росту культурного уровня людей, эффективному использованию свободного времени и повышению экономической эффективности общественного производства. В реальных условиях конкретный результат деятельности

пассажирского транспорта может иметь одновременно и социальный, и экономический эффект. Повышение скорости сообщения способствует высвобождению времени, которое может быть использовано для удовлетворения культурных запросов граждан или для отдыха и вместе с тем – для повышения профессиональной квалификации, что в конечном итоге скажется на росте производительности труда.

Экономия времени как важнейший показатель качества транспортного обслуживания населения является одной из составляющих социально-экономической эффективности организации высокоскоростного движения транспорта. Экономический смысл ускорения доставки пассажира заключается в том, что сокращается время его отвлечения из сферы материального производства, создаются возможности для производства некоторой части общественного продукта, выраженного определенной стоимостью. Или же экономится личное время пассажира, которое он мог бы использовать для повышения своего культурно-образовательного или профессионального уровня. Чем больше экономия времени на поездку, тем выше вероятность создания дополнительного общественного продукта, если пассажир сэкономленное время посвятит производительному труду. Стоимость этого дополнительного продукта, составляющего часть национального дохода, характеризует соответствующий эффект от сокращения времени пребывания на транспорте. Следует отметить, что в последние годы само сокращенное время поездки является стимулом использования современной техники для производительного, в первую очередь, управленческого и предпринимательского труда. При этом сокращенное до 2–3 ч время поездки дает возможность не только решить ряд производственных задач, подготовиться к деловым встречам и без паузы включиться в производственный процесс, но и сама поездка в высокоскоростном режиме позволяет 70–80 % времени использовать для выполнения профессиональных функций [14].

Экономия затрат времени в пути рассчитывается для пассажиров, переклывшихся на МЛТ с других видов транспорта. Стоимостная оценка экономии времени дается с использованием стоимости времени в зависимости от цели поездки [15].

$$\sum ESTT_i^t = \sum (P_{ijk}^{t0} \times Vol_{ik}^t \times TC_{ij}^t) - \sum (P_{ik}^{tHSR} \times Vol_k^t \times TC_i^{tHSR}),$$

где  $i$  – связь;

$j$  – вид транспорта;

$k$  – цель поездки;

$ESTT_i^t$  – эффект от экономии времени в пути пользователей всех видов транспорта при реализации проекта МЛТ в году  $t$ ;

$P_{ijk}^{t0}$  – объем пассажиропотока на  $i$ -й связи на  $j$ -м виде транспорта с  $k$  целью поездки в году  $t$  в «нулевом варианте»;

$VoT_{ik}^t$  – стоимость времени пассажира на  $i$ -й связи с  $k$  целью поездки в году  $t$ ;

$TC_{ij}^t$  – затраты времени пассажира в пути на  $i$ -й связи на  $j$ -м виде транспорта в году  $t$ ;

$P_{ik}^{tHSR}$  – объем пассажиропотока на  $i$ -й связи с  $k$  целью поездки в году  $t$  при реализации проекта МЛТ;

$TC_i^{tHSR}$  – затраты времени пассажира в пути на  $i$ -й связи на  $j$ -м виде транспорта в году  $t$  при реализации проекта МЛТ.

Основой оценки стоимости времени выступает средневзвешенная *почасовая ставка оплаты труда* в рассматриваемых городах. Различия стоимости времени в зависимости от целей поездки задавались на основании мировых разработок в данной области, результатов социологического опроса и экспертных оценок.

Расчет стоимости времени строился следующим образом:

$$VoT_{ij}^{проч} = \frac{dw_i + (1-d)w_j}{21 \cdot 8},$$

где  $VoT_{ij}^{проч}$  – стоимость времени для поездок с неделовыми целями (культурно-бытовых, туристических, рабочих и т. д.) между  $i$ -м и  $j$ -м городами;

$d$  – весовой коэффициент, учитывающий в общем случае неодинаковую долю жителей рассматриваемых городов в суммарных корреспонденциях между ними (предполагается, что при наличии заметной разницы в численности населения городов доля жителей меньшего города будет выше);

$w_i$  – среднемесячная номинальная заработная плата в  $i$ -м городе;

$21 \cdot 8$  – множители для перевода к часовой ставке.

$$VoT_{ij}^{дел} = 3,5VoT_{ij}^{проч},$$

где  $VoT_{ij}^{дел}$  – стоимость времени для поездок с деловыми целями между  $i$ -м и  $j$ -м городами;

$3,5$  – множитель, отражающий более высокую стоимость времени при совершении деловых поездок (принят с учетом зарубежного опыта и результатов социологического опроса, показавшего, что пассажиры, совершающие поездки с деловыми целями, имеют уровень дохода выше среднего).

Прогноз стоимости времени строился на основе прогноза заработной платы:

$$VoT_{ij}^{t+n} = VoT_{ij}^t \left( 1 + 0,7 \left( d\tau_i + (1-d)\tau_j \right) \right)^n,$$

где  $VoT_{ij}^{t+n}$  – стоимость времени в  $t + n$  год (применяется общий подход к расчету стоимости времени независимо от цели поездки);

$\tau_i$  – среднегодовой темп прироста средней заработной платы для  $i$ -го города;

0,7 – коэффициент, учитывающий отставание стоимости времени от роста заработной платы (принят с учетом зарубежного опыта).

Эффект от снижения вредного воздействия на окружающую среду при реализации проекта ВСМ рассчитывался следующим образом:

$$EED = VED^0 - VED^{HSR},$$

где  $VED^0$  – стоимостная оценка экологического ущерба в «нулевом варианте»;

$VED^{HSR}$  – стоимостная оценка экологического ущерба при реализации проекта ВСМ.

При рассматриваемом подходе ущерб окружающей среде формируется из трех компонентов:

$$VED = VEmis + VCIi + VN,$$

где  $VEmis$  – стоимостная оценка выбросов загрязняющих веществ в атмосферу;

$VCIi$  – стоимостная оценка вредного воздействия на климат;

$VN$  – стоимостная оценка шумового воздействия на окружающую среду.

Стоимостная оценка шумового воздействия на окружающую среду имеет особое значение, так как МЛТ имеет более низкий уровень шума – 65 Дб, тогда как другие виды транспорта – обычно больше 70 Дб.

Стоимостная оценка шумового воздействия на окружающую среду определяется по формуле

$$\sum VN_i = Pkm_{ij} \times r_j^N,$$

где  $Pkm_{ij}$  – пассажирооборот на  $i$ -й связи на  $j$ -м виде транспорта;

$r_j^n$  – стоимостная оценка шумового воздействия на окружающую среду на 1 пассажиро-километр.

Стоимостные оценки выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и вредного воздействия на климат определяются аналогично.

Перераспределение пассажиропотоков по видам транспорта в результате создания МЛТ приведет к изменению экологической нагрузки на окружающую среду вследствие изменения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и изменения шумовой нагрузки.

Экологический ущерб оценивается на основании удельных показателей экологического ущерба на пассажиро-километр по видам транспорта. Использование зарубежных исследований обусловлено отсутствием аналогичных российских разработок. Экологический ущерб, наносимый во время строительства МЛТ, учитывается в составе капитальных затрат. Эффект от снижения экологического ущерба определяется как разница между оценкой экологического ущерба для «нулевого варианта» и при реализации проекта МЛТ.

Эффект от повышения безопасности при реализации проекта МЛТ рассчитывался следующим образом:

$$\sum ES_i = \sum (Pkm_{ij}^0 \times r_j^S) - \sum (Pkm_i^{HSR} \times r_i^{SHSR}),$$

где  $i$  – связь;

$j$  – вид транспорта;

$ES$  – эффект от повышения безопасности при поездках пользователей всех видов транспорта при реализации проекта МЛТ;

$Pkm_{ij}^0$  – пассажирооборот на  $i$ -й связи на  $j$ -м виде транспорта в «нулевом варианте»;

$r_j^S$  – стоимостная оценка аварийных затрат на  $j$ -м виде транспорта;

$Pkm_i^{HSR}$  – пассажирооборот на  $i$ -й связи с  $k$  целью поездки в году  $t$  при реализации проекта МЛТ;

$r_j^S$  – стоимостная оценка аварийных затрат при реализации проекта МЛТ.

Оценка эффекта от повышения безопасности пассажирских перевозок определяется на основании удельных показателей ущерба от аварий на пассажиро-километр по видам транспорта и распределения пассажиропотоков по видам транспорта в «нулевом варианте» и при реализации проекта создания МЛТ.

Удельные показатели ущерба для МЛТ оцениваются по зарубежным аналогам.

## Заключение

Предлагаемая система показателей для оценки социально-экономической эффективности стратегии развития скоростного городского

транспорта учитывает все преимущества магнитолевитационной технологии и делает ее приоритетной при выборе скоростного городского транспорта.

### Библиографический список

1. Белозеров В.Л. Экономика транспорта / В.Л. Белозеров, А.Н. Ефанов, А.А. Зайцев. – СПб.: Наука, 2014. – 204 с.
2. Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны: моногр. / А.А. Зайцев, Е.И. Морозова, Г.Н. Талашкин. – СПб.: НП-Принт, 2015. – 140 с.
3. Зайцев А.А. Транспорт на магнитном подвесе / А.А. Зайцев, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова. – СПб.: Изд-во ПГУПС, 2010. – 160 с.
4. Федорова М.В. Городской пассажирский транспорт на магнитном подвесе: технико-экономический анализ / М.В. Федорова // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии: труды 2-й междунар. научн. конф., 29–31 окт. 2013. – СПб.: Пудра, 2013. – С. 116–117.
5. Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев; под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
6. Website Future of Rail-2050 (The Site of Future of Rail-2050). – URL: <http://www.arup.com> (дата обращения 07.10.2017).
7. Rodd D. Technical and economic comparison of high-speed-rail and maglev systems // Railway Tech. Rev. – 2006. – №1.
8. Frederic P. Miller. JR–Maglev. – 2011. 124 p.
9. Shanghai maglev – all you need to know maglev.net. – URL: <http://www.maglev.net/shanghai-maglev> (дата обращения 12.09.2017).
10. Sunduck D. SUH Effects of Korean Train Express operation on the national transportation system / D. Sunduck // Eastern Asia Soc. Transp. Studies. – 2005. – № 5. – P. 175–189.
11. Vuchic V.R. An evaluation of Maglev technology and its comparison with high speed rail Transportation Quarterly / V.R. Vuchic, J.M. Casello. – URL: <http://www.thetransitcoalition.us/LargePDFfiles/maglevEvalandComparisonHSR.pdf> (дата обращения 23.08.2017).
12. FTA Low-Speed Urban Maglev Research Program. – URL: <http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/FTALowSpeedLessonsLearned.pdf> (дата обращения 13.09.2017).
13. Журавлева Н.А. Экономическая оценка повышения временной и пространственной эффективности железнодорожного транспорта / Н.А. Журавлева // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии: труды 2-й Междунар. научн. конф., Санкт-Петербург, 17–20 июня 2014. – СПб., 2014. – С. 378–390.

14. Шнейдер М.А. Рынок пригородных железнодорожных перевозок: управление и экономика: моногр. / М.А. Шнейдер, Е.А. Проскуракова. – СПб.: НП-Принт, 2012. – 288 с.

15. Essen H. van. External transport costs in Europe / H. van Essen, A. Shroten, M. Otten // Extended study for 2008. – CE Delft, Infrac, Fraunhofer ISI, Delft, CE Delft. – 2011. – № 9.

**Сведения об авторе:**

ФЕДОРОВА Мария Владимировна, ассистент

E-mail: [tale19quale@mail.ru](mailto:tale19quale@mail.ru)

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

© Федорова М. В., 2017

UDK 338.47-656

**M. V. Fiodorova**

## **JUSTIFICATION OF INDICATOR SYSTEM OF SOCIAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF HIGH-SPEED URBAN TRANSPORT DEVELOPMENT STRATEGY**

Date of receipt 01.11.2017

Decision on publication 11.01.2017

**Introduction.** At the present stage of developing methodological approaches to assessment of social and economic efficiency, all the external effects of the project are divided into effects that can be estimated in value terms, and effects that cannot be expressed in monetary units. In turn, the latter are divided into effects that have a quantitative expression and effects, described only on a qualitative level. External effects, which can be estimated in monetary terms, are directly included in the calculation of the social and economic efficiency of the project in the form of additional inflows and outflows of money.

**Problem.** The conceptual basis for assessing the social and economic efficiency of new high-speed lines is the comprehensive consideration of all external effects from the implementation of the investment project (economic and non-economic) that do not affect the cost parameters of the project participants.

**Objective.** The aim of the work is to develop a system of indicators for assessing the social and economic efficiency of the strategy of the development of high-speed urban transport.

**Methods.** Study of existing methods of assessing social and economic efficiency, searching for disadvantages and advantages, exploring the advantages of magnetic levitation technology.

**Results.** The development of this system of indicators for magnetic levitation transport, which is distinguished by such advantages as the impossibility of derailment, greater route speed, hence less time travel, less noise and vibration than light-rail transport and metro, complete absence of dust, is especially important.

**Conclusion.** The proposed system of indicators for assessing the social and economic efficiency of the strategy of the development of high-speed urban transport takes into account all the advantages of magnetic levitation technology and makes it a priority when choosing high-speed urban transport.

Social and economic efficiency, external effects, high-speed urban transport, magnetic levitation.

### **Introduction**

Evaluation of the economic efficiency of the strategy of high-speed urban transport is the final stage in the formation of the strategy. When developing the strategy, it is necessary to develop criteria for evaluating its implementation and evaluating the company's final state.



To be efficient, financial information should be optimal in terms of volume, timely, reliable, meaningful, should be related to the priority goals and objectives of the strategy.

In foreign practice, existing methods for evaluating the strategy: service life analysis, portfolio analysis, GE-McKinsey, benchmarking. Essentially, they are all related to the correspondence of specific strategies to the organisation's position in the market and its relative strategic capabilities.

But these methods have descriptive character and do not us allow to carry out a quantitative assessment of the social and economic efficiency of the strategy of high-speed urban transport. Therefore, in the thesis, a system of indicators for assessing the social and economic efficiency of the strategy for the development of high-speed urban transport is justified.

The paper analyses the existing methods for assessing social and economic efficiency and makes conclusions on that.

Calculations of commercial, budgetary, economic and social and economic efficiency of investment projects in railway transport are carried out mainly in accordance with the following methodological materials:

- methodological recommendations on assessment of investment projects (second edition) approved by the Ministry of Economic Development of the Russian Federation, the Ministry of Finance, State Committee for Construction, Architecture and Housing Policy № VK 477 of June 21<sup>st</sup>, (hereinafter referred to as the Set of Methods);

- methodological recommendations on assessment of investment projects on railway transport (annex to the Directive of the Ministry of Communications (today's Ministry of Transport of the Russian Federation) of August 31<sup>st</sup>, 1998, № V-1024u) hereinafter referred to as the Set of Methods № V-1024u;

- methods of calculation of indexes and application of criteria of efficiency of regional investment project, approved by the Ministry of Regional Development of the Russian Federation order of August 31<sup>st</sup>, 2008 № 117 (hereinafter referred to as the Set of Methods № 117);

- methods of index calculation and criteria application to investment projects efficiency claiming for state support at the expense of the Russian Federation Investment Fund, approved by the Order of May 23<sup>rd</sup>, 2006 № 139/82n (hereinafter referred to as the Set of Methods № 139/82n of May 23<sup>rd</sup>, 2006) of the Ministry of Economic Development and the Ministry of Finance of the Russian Federation;

- methods of assessment of social and economic efficiency of construction of new railways, approved by Senior Vice-President of JSC "RZD" B. Lapidus of August 29<sup>th</sup>, 2009 (hereinafter referred to as the Set of Methods of JSC "RZD" of August 29<sup>th</sup>, 2009).

Indicators of public efficiency take into account the social and economic consequences of implementation of an investment project for society as a whole, including both the immediate results and costs of the project, and "external": costs and results in related sectors of the economy, environmental, social and other noneconomic effects.

The current general scheme for assessing the social and economic efficiency of investment projects (given below) allows us to identify and define social efficiency as an economic category [1].

Some of the activities in the sphere of production and consumption stipulate direct costs or benefits for consumers and firms that are not directly involved in these activities. Accordingly, such results cannot be taken into account in the economic indicators of the producer of goods and services: costs, revenues, profits, etc. Underestimation of the costs and benefits of third parties leads to an overestimation, or to an underestimation of the volume of output of goods in comparison with the effective output from the public point of view. It is about the existence of so-called external effects (externalities).

The external effect is the costs and results of the project that have not been adequately reflected in the indicators of economic activity of economic entities participating in the project.

In the most general form, external effects can be divided into environmental (sometimes called technological), social, economic and public goods that do not have a price.

The ecological (technological) externalities are:

- pollution of soils, hazardous emission into the atmosphere and water reservoirs;
- non-efficient exploitation of natural resources deposits and agricultural lands;
- violation of the ecological (biological) balance of the territory;
- cutdown (increment) of forests, green plantations in urban settlements;
- explosions, fires dangers, etc;

External effects of a social nature include externalities directly related to the standard of living of the population (as opposed to technological ones, whose influence can be considered mediated). These may include:

- changes of population salaries, employment rate, service and commodities prices, consumer goods quality, quality and price of accommodation, accommodation provision, provision of housing and utilities services, culture, sports institutions, transport service, education and health care levels, labour conditions, number of work with hard and dangerous conditions, profession-related diseases and production injures, and crimes;
- economy or additional expenses of spare time of population at the expense of various factors.

External effects of economic nature are reflected in expenses and incomes of organisations and enterprises, that do not participate in the project. These may include:

- change in the value of land and real estate objects that are not related to the project, as a result of its implementation, costs for enterprises not participating in the project;
- creation and development of new productions (at the expense of providing transport, raw materials, innovative developments);
- compromising on transportation costs of health care enterprises, culture at the expense of the construction of a new road, etc.

One of the main ways to take into account externalities in investment design is to include them in the prices of manufactured goods and services and consumed resources. The process of adjusting market prices to calculate the efficiency of projects from a social standpoint (social and economic efficiency) is called the conversion of market prices. New, adjusted prices are also called economic prices, in the Western literature – shadow prices.

As sources of information for developing an assessment of the social and economic efficiency of the investment project for the construction of a new high-speed line the following sources have been considered:

- project materials in the scope of the feasibility study, justification of the investment of the project being considered;
- expert assessments of the degree of influence of the implementation of the investment project on the parameters of the social and economic development of the Russian Federation, the region, the industries and enterprises of interest, taking into account the significance of the project under consideration.

In calculations of social and economic efficiency, the target of new high-speed lines, their social significance and economic environment should be taken into account.

Realisation of construction projects of high-speed lines ensures achievement of a range of targets, generation of effects (including disadvantageous ones), which differ in the degree of their social and economic significance of the entire country, some regions, branches, participants of the project. The composition of goals, effects is stipulated by, to a large extent, ascribing the new railway line under consideration to this or that category, in accordance with the strategy. Separate goals, effects can be achieved, generated only during the construction and subsequent operation of certain categories of railway lines, for example, a significant reduction in the travel time for passengers carried by rail can only be achieved with the construction of railways specialised for high-speed traffic.

The economic environment of the project is determined by the boundaries of its influence on the economic, social, environmental spheres of society and is determined by the following factors:

- public importance of the railway line;

- line category;
- resource requirements for the construction of the line;
- the composition of the «recipients» of effects.

At the present stage of development of methodological approaches to assessment of social and economic efficiency, all the external effects of the project are divided into effects that can be estimated in value terms and effects that cannot be expressed in monetary units. In their turn, the latter are divided into effects that have a quantitative expression and effects, described only on a qualitative level. External effects, which can be estimated in monetary terms, are directly included in the calculation of the social and economic efficiency of the project in the form of additional inflows and outflows of cash.

The concept basis for assessment of the social and economic efficiency of new high-speed lines is the comprehensive consideration of all external effects from the implementation of the investment project (economic and non-economic) that do not affect the cost parameters of the project participants. External effects should be taken into account in value form and calculated using appropriate regulatory and specific characteristics. In the absence at the present stage of computational methods for the valuation of a number of external effects and generally accepted approaches to their accounting in the implementation of assessments of the social and economic efficiency of investment projects for the construction of new railway lines, one of the tasks is the systematisation and development of approaches to accounting externalities generated in the social and economic sphere of life of the Company in the implementation of projects for the construction of new public railway lines.

The set of methods of assessment of social and economic efficiency of new high-speed line is based on the following classification of external factors:

- economic;
- social;
- ecological.

Due to specifics of the innovative transport technology, the system of indicators of social and economic efficiency of the strategy has been supplemented and specified. The table suggests indicators for assessment of social and economic efficiency of high-speed urban transport development strategy.

The particular importance is the development of this system of indicators for magnetic levitation transport, which has advantages such as the impossibility of derailment, a greater route speed, therefore, less travel time, less noise and vibration than LRT and metro, complete absence of dust [2]. To assess the strategy for the development of high-speed urban passenger transport, three groups of indicators are proposed.

**Indicators for assessment of social and economic efficiency of high-speed urban transport development strategy**

Indicator	Indicators
Changes in time spent by passengers on their way, thousand rubles	$\sum ESTT_i^t = \sum (P_{ijk}^t \times Vol_{ik}^t \times TC_{ij}^t) - \sum (P_{ik}^{HSR} \times Vol_k^t \times TC_i^{HSR}),$ <p>where <math>i</math> – connection;  <math>j</math> – urban transport type;  <math>k</math> – purpose of travelling;  <math>ESTT_i^t</math> – the effect of saving time on the way by passengers of all types of urban transport in the implementation of the MLT project in the year <math>t</math>;  <math>P_{ijk}^t</math> – amount of passenger traffic on <math>i</math>-th connection on <math>j</math>-th type of transport with <math>k</math> purpose of travelling in the year <math>t</math> in “zero option”;  <math>Vol_{ik}^t</math> – cost of time of passenger on <math>i</math>-th connection with <math>k</math> purpose of travelling in the year <math>t</math>;  <math>TC_{ij}^t</math> – costs of passenger for time of travelling on <math>i</math>-th connection on <math>j</math>-th type of urban transport in the year <math>t</math>;  <math>P_{ik}^{HSR}</math> – amount of passenger traffic on <math>i</math>-th connection with <math>k</math> purpose of travelling the year <math>t</math> during realisation of MLT project;  <math>TC_i^{HSR}</math> – time costs of passenger for travelling on <math>i</math>-th connection on <math>j</math>-th type of urban transport in the year <math>t</math> during realisation of MLT project</p>
The effect from reducing the harmful impact on the environment during the implementation of the MLT project, thousand rubles	$EED = VED^0 - VED^{HSR},$ <p>where <math>VED^0</math> – cost assessment of environmental damage in the "zero" option;  <math>VED^{HSR}</math> – cost assessment of environmental damage during the implementation of the MLT project.  With this approach being considered, the damage to the environment is formed from three components:  <math>VED = VEmis + VCli + VN,</math>  where <math>VEmis</math> – cost assessment of emissions into the atmosphere;  <math>VCli</math> – cost assessment of hazardous impact on the climate;  <math>VN</math> – cost assessment of noise pollution on the environment</p>
Effect from increasing safety during realisation of MLT project, thousand rubles	$\sum ES_i = \sum (Pkm_{ij} \times r_j^s) - \sum (Pkm_i^{HSR} \times r_i^{sHSR}),$ <p>where <math>i</math> – connection;  <math>j</math> – urban transport type;  <math>ES</math> – effect from increasing traffic safety during passengers travelling all types of transport during realisation of MLT project;  <math>Pkm_{ij}</math> – amount of passenger traffic on <math>i</math>-th connection on <math>j</math>-th type of urban transport in the “zero option”;  <math>r_j^s</math> – cost assessment of failure expenses on <math>j</math>-th type of urban transport;  <math>Pkm_i^{HSR}</math> – amount of passenger traffic on <math>i</math>-th connection with <math>k</math> purpose of travelling in the year <math>t</math> during the realisation of MLT project;  <math>r_j^s</math> – cost assessment of failure expenses during realisation of MLT project</p>

The development of maglev transport systems are restrained by obsolete norms of their design which have not been renewed for many decades. These norms do not take into account today's rolling stock properties. Besides, creation of cutting-edge integrated light-rail systems is hindered by lack of national rolling stock [3]. Considering advantages of maglev transport (MLT), the priority task for Saint Petersburg is design and implementation of light-rail transport to be deployed on sections with heavy passenger traffic without access to metro transport [4, 5].

There are two categories of maglev transport defined by purpose and technical parameters:

- urban ground and underground as well as intercity transport with speeds up to 200 km/h;
- mainline transport with high and superhigh speeds up to 1000 km/h, if vacuum tube is deployed.

Urban maglev transport is aimed at connecting the city centre with suburbs, city districts and large transport hubs – railway, bus and metro stations, sea and river ports [6–12].

Mainline transport is intended for intercity travelling with speeds up to 400 km/h and for transcontinental travelling with speeds up to 1000 km/h.

The system of indicators is developed taking into account the specifics of innovative transport projects, namely the project of creating a magnetic levitation transport [13].

### **Change of the time spent by passengers on the way**

The development of high-speed passenger transport contributes to the growth of the cultural level of people, the efficient use of free time and the economic efficiency of social production. In real conditions, the determined result of the activity of passenger transport can have both a social and economic effect. Increasing the speed of communication promotes the release of free time, which can be used to meet the cultural needs of citizens or recreation and at the same time to enhance professional qualifications, which will ultimately affect the growth of labour productivity.

Saving time as the most important indicator of the quality of transport services for the population is one of the components of the social and economic efficiency of the organisation of high-speed traffic. The economic sense of accelerating carrying a passenger is that it saves the time of his distraction from the sphere of material production, with the opportunities being created for the production of some part of the social product expressed by a certain value. Or, the passenger's personal time can be saved, which he could use to improve his cultural, educational or professional level. The more time is saved for a trip, the higher the probability of creating an additional social product, if the passenger spends his time saving productive la-

bour. The cost of this additional product, which is a part of the national income and characterises the corresponding effect of reducing the time spent on transport. It should be noted that in recent years, the very shortened travel time is an incentive to use modern technology for productive, primarily managerial and entrepreneurial work. At the same time, the travel time reduced to 2-3 hours makes it possible not only to solve a number of production tasks, to prepare for business meetings and to enter the production process without pause. Therefore, not only saving time on business trips, but also a trip in high-speed mode allows 70–80 % of the time to use for professional functions [14].

The calculation of saving time spent on the way is carried out for passengers who switched to MLT from other modes of transport. The cost assessment of saving time is carried out using the cost of time depending on the purpose of travelling [15].

$$\sum ESTT_t^t = \sum (P_{ijk}^{t0} \times Vol_{ik}^t \times TC_{ij}^t) - \sum (P_{ik}^{tHSR} \times Vol_k^t \times TC_i^{tHSR}),$$

where  $i$  – connection;

$j$  – transport mode;

$k$  – purpose of travelling;

$ESTT_t^t$  – the effect of saving time on the way by passengers of all types of urban transport in the implementation of the MLT project in the year  $t$ ;

$P_{ijk}^{t0}$  – amount of passenger traffic on  $i$ -th connection on  $j$ -th type of transport with  $k$  purpose of travelling in the year  $t$  in the “zero option”;

$Vol_{ik}^t$  – time cost of passenger on  $i$ -th connection with  $k$  purpose of travelling the year  $t$ ;

$TC_{ij}^t$  – passenger’s time expenses on the way on  $i$ -th connection on  $j$ -th type of transport in the year  $t$ ;

$P_{ik}^{tHSR}$  – amount of passenger traffic on  $i$ -th connection with  $k$  purpose of travelling in the year  $t$  during realisation of MLT project;

$TC_i^{tHSR}$  – passenger time expenses on the way on  $i$ -th connection on  $j$ -th type of transport in the year  $t$  during MLT project realisation.

The basis for estimation of the cost of time is the weighted average hourly wage rate in the cities considered. Differences in the cost of time depending on the purpose of travelling were set on the basis of world developments in this field, the results of a sociological survey and expert assessments.

The calculation of the cost of time was carried out as follows:

$$VO T_{ij}^{other} = \frac{dw_i + (1-d)w_j}{21 \cdot 8},$$

where  $VO T_{ij}^{other}$  – the cost of time for trips with non-business purposes (cultural, tourist, etc.) between  $i$ -th and  $j$ -th cities;

$d$  – the weight coefficient, which takes into account, in the general case, an unequal share of the inhabitants of the cities in question in the total correspondence between them (it is assumed that if there is a noticeable difference in the population of cities, the proportion of the inhabitants of a smaller city will be higher);

$w_i$  – average monthly nominal wage in  $i$ -th city;

21·8 – multipliers for conversion to hourly rate.

$$VO T_{ij}^{business} = 3,5 VO T_{ij}^{other},$$

где  $VO T_{ij}^{business}$  – the cost of time for trips with business purposes between  $i$ -th and  $j$ -th cities;

3,5 – multiplier that reflects a higher cost of time when making business trips (adopted taking into account foreign experience and the results of a sociological survey that showed that passengers travelling with business purposes have an income level which is above the average one).

The forecast of the cost of time was based on the forecast of wages:

$$VO T_{ij}^{t+n} = VO T_{ij}^t \left( 1 + 0,7 \left( d\tau_i + (1-d)\tau_j \right) \right)^n,$$

where  $VO T_{ij}^{t+n}$  – the cost of time in  $t + n$  year (the general approach to the calculation of the cost of time regardless of the purpose of the trip is applied);

$\tau_i$  – average speed of wage growth for  $i$ -th city;

0,7 – coefficient that takes into account the lag of the cost of time from the growth of wages (adopted taking into account foreign experience).

The effect of reducing the harmful impact on the environment during the implementation of the high-speed mainline project was calculated as follows:

$$EED = VED^0 - VED^{HSR},$$

where  $VED^0$  – cost assessment of ecological impact in the “zero option”;

$VED^{HSR}$  – cost assessment of ecological impact during realisation of high-speed mainline project.



In this approach, the damage to the environment is formed by three components:

$$VED = VEmis + VCIi + VN,$$

where  $VEmis$  – valuation of emissions into the atmosphere;

$VCIi$ – evaluation of hazardous impact on climate;

$VN$ – evaluation of noise pollution of the environment.

The evaluation of the noise pollution of the environment is of particular importance, since the magnetic levitation transport has a lower noise level, namely 65 dB, in contrast to other modes of transport, usually greater than 70 dB.

Evaluation of noise pollution is determined as:

$$\sum VN_i = Pkm_{ij} \times r_j^N,$$

where  $Pkm_{ij}$  – amount of passenger traffic on  $i$ -th connection on  $j$ -th transport mode;

$r_j^n$  – evaluation of noise pollution per one passenger-kilometre.

The evaluations of emissions of pollutants into the atmosphere and the harmful effects on climate are determined similarly.

The redistribution of passenger traffic by mode of transport as a result of the creation of MLT will lead to a change in the load on the environment due to changes in emissions of pollutants into the atmosphere and changes in noise pollution.

Ecological damage is estimated on the basis of specific indicators of environmental damage per passenger-kilometer by mode of transport. The use of foreign studies is explained by the lack of similar Russian developments. Environmental damage caused during the construction of the MLT is included in the capital costs. The effect of reducing environmental damage is defined as the difference between the assessment of environmental damage for the “zero” option and the implementation of the MLT project.

The effect of improving safety during the implementation of the MLT project was calculated as follows:

$$\sum ES_i = \sum (Pkm_{ij}^0 \times r_j^S) - \sum (Pkm_i^{HSR} \times r_i^{SHSR}),$$

where  $i$  – connection;

$j$  – transport mode;

$ES$  – effect from enhancing safety during passengers travelling all types of transport during MLT project realisation;

$Pkm_{ij}^0$  – amount of passenger traffic on  $i$ -th connection on  $j$ -th type of transport in the “zero option”;

$r_j^S$  – evaluation of failure expenses on  $j$ -th type of transport;

$Pkm_i^{HSR}$  – amount of passenger traffic on  $i$ -th connection with  $k$  purpose of travelling in the year  $t$  during MLT project realisation;

$r_j^S$  – evaluation of failure expenses during MLT realisation.

The evaluation of the effect of improvement of the safety of passenger traffic is determined on the basis of the specific indicators of damage from accidents per passenger-kilometer by mode of transport and the distribution of passenger traffic by mode of transport in the “zero” option and in the implementation of the MLT project.

Specific indexes of damage for MLT are estimated by foreign counterparts.

## Conclusion

The proposed system of indicators for assessment of social and economic efficiency of the high-speed urban transport strategy development takes into account all the advantages of magnetic levitation technology and makes it a priority when choosing high-speed urban transport.

## References

1. Beloziorov V.L., Efanov A.N., Zaitsev A.A. Economics of Transport [Ekonomika transporta]. St. Petersburg, 2014. 204 p.
2. Zaitsev A.A., Morozova E.I., Talashkin G.N. Magnetic Levitation Transport in the Entire Single Transport System of the Country [Magnitolevitatsionnyi transport v edinoi transportnoi sisteme strany]: monogr. St. Petersburg, 2015. 140 p.
3. Zaitsev A.A., Talashkin G.N., Sokolova Ya.V. Transport with Magnetic Suspension [Transport na magnitnom podvese]. St. Petersburg, 2010. 160 p.
4. Fiodorova M.V. Urban Passenger Transport with Magnetic Suspension: Feasibility Study [Gorodskoi passazhirskiy transport na magnitnom podvese: tekhniko-ekonomicheskii analiz]. *Proc. of the 1st Intern. Scientific. Conf. “Maglev Transport Systems and Technologies”* [Trudy 1 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Magnitolevitatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii”]. St. Petersburg, 2013, pp. 116–117.
5. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A. Magnetic Levitation Transport Technology [Magnitolevitatsionnaya transportnaia tekhnologiya]. Moscow, 2014. 476 p.
6. Website Future of Rail-2050 [The Site of Future of Rail-2050]. Available at: <http://www.arup.com>. (accessed 07.10.2017).

7. Rodd D. Technical and economic comparison of high-speed-rail and maglev systems *Railway Tech. Rev.*, 2006, no. 1.
8. Miller Fr. P. JR–Maglev. 2011. 124 p.
9. Shanghai maglev – all you need to know maglev.net. Available at: <http://www.maglev.net/shanghai-maglev> (accessed 12.09.2017).
10. Sunduck D. SUH Effects of Korean Train Express operation on the national transportation system. *Proc. Eastern Asia Soc. Transp. Studies*, 2005, no. 5, pp. 175–189.
11. Vuchic V.R., Casello J.M. An evaluation of Maglev technology and its comparison with high speed rail Transportation Quarterly. Available at: <http://www.thetransitcoalition.us/LargePDFfiles/maglevEvalandComparisonHSR.pdf> (accessed 23.08.2017).
12. FTA Low-Speed Urban Maglev Research Program. Available at: <http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/FTALowSpeedLessonsLearned.pdf> (accessed 13.09.2017).
13. Zhuravleva N.A. Economic Evaluation of Increasing Temporal and Spatial Efficiency of Rail Transport [Economiceskaiia otsenka povysheniia vremennoi i prostranstvennoi effektivnosti zheleznodorozhnogo transporta]. *Proc. 2nd Int. Sci. Conf. “Maglev Transport Systems and Technologies” [Trudy 2 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Magnitolevitatsionnyie transportnyie sistemy i tekhnologii”]*. St. Petersburg, 2014, pp. 378–390.
14. Schneider M.A., Proskuryakova E.A. Market of Suburban Rail Transportation: Management and Economics [Rynok prigorodnykh zheleznodorozhnykh perevozok: upravlenie i ekonomika]. St. Petersburg, 2012. 288 p.
15. Van Essen H., Shroten A., Otten M. External Transport Costs in Europe // Extended study for 2008. CE Delft, Infrac, Fraunhofer ISI, Delft, CE Delft, 2011, no. 9.

**Information about the author:**

Maria V. FIODOROVA, Assistant.

E-mail: [tale19quale@mail.ru](mailto:tale19quale@mail.ru)

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

© Fiodorova M. V., 2017

С. А. Смирнов, О. Ю. Смирнова

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИДОВ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА ДЛЯ МАССОВЫХ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК

Дата поступления 07.09.2017

Решение о публикации 30.11.2017

Рассматриваются различные виды наземного транспорта для регулярных массовых грузовых перевозок. Оценивается их эффективность на основе стоимостных, эксплуатационных и экологических характеристик.

**Введение.** Чтобы обеспечить регулярные массовые грузовые перевозки между Юго-Восточной Азией и Европой, необходимо эффективно использовать различные виды наземного транспорта, новейшие достижения в технике и технологиях, повышать скорость грузовых перевозок на дальние расстояния и увеличивать их экологичность и безопасность.

**Анализ.** Стоимостные характеристики различных видов транспорта для массовых грузовых перевозок показывают, что самая низкая стоимость инфраструктуры – у традиционного железнодорожного транспорта; наименьшая себестоимость перевозок обеспечивается магнитолевитационным транспортом на постоянных магнитах по технологии «РосМаглев»; наименьшую коммерческую выгоду на современном уровне развития техники и технологии предлагает вакуумный транспорт.

По эксплуатационным характеристикам лидирует проект «РосМаглев», наименьшая эффективность достигается при использовании вакуумного транспорта.

С точки зрения экологичности и безопасности перевозок железнодорожный транспорт за последние десятилетия добился существенного прогресса. Однако более экологичными оказываются магнитолевитационный и вакуумный виды транспорта, что обусловлено отсутствием от них выбросов и иных видов загрязнения, в том числе шумовых.

В области безопасности магнитолевитационный транспорт является самым конкурентоспособным, вакуумный – наиболее опасным.

**Результаты.** Для массовых грузовых перевозок транспортом будущего, по мнению авторов, является магнитолевитационный на постоянных магнитах по российской технологии «РосМаглев», позволяющей существенно оптимизировать затраты на строительство инфраструктуры. Второе место можно отдать традиционному железнодорожному транспорту. Однако при невысоком объеме спроса на перевозки и при внедрении энергоэффективного тягового подвижного состава высокоскоростной грузовой железнодорожный транспорт может составить конкуренцию, особенно в странах с развитой сетью высокоскоростных магистралей. Последнее место уверенно занимает вакуумный транспорт.

**Выводы.** Целесообразность внедрения магнитолевитационного транспорта для массовых грузовых перевозок очевидна. Используемые в настоящее время в различных странах мира технологии для перемещения пассажиров, базирующиеся на магнитной левитации, уже зарекомендовали себя как выгодные, безопасные и удобные. Техническая «зрелость» таких технологий позволяет учесть все достижения при возведении магнитолевитационных линий для грузового движения, что весьма перспективно в свете острой необходимости поиска альтернативных морским способом перевозок.

Железнодорожный транспорт, высокоскоростная магистраль, магнитолевитационный транспорт, вакуумный транспорт, струнный транспорт, регулярные грузовые перевозки, стоимость, эксплуатационные характеристики, экологичность, безопасность, перспективы внедрения, технология «РосМаглев».

## Введение

В современном мире прочно устоялись географические центры производства и потребления. Первый расположен в Юго-Восточной Азии и включает Китай, но не ограничивается им, второй – в Европе, преимущественно в ее западной части. На протяжении многих лет наблюдается устойчивый товарооборот между этими регионами, в последние годы показывающий рост. В связи с необходимостью обеспечить регулярные массовые грузовые перевозки между Юго-Восточной Азией и Европой актуален вопрос эффективности использования различных видов наземного транспорта.

Несмотря на значительно более интенсивный поток грузов из стран Юго-Восточной Азии в Европу, их перемещение в обратном направлении также имеет место (рис. 1). Снижение объемов товарооборота в результате мирового экономического кризиса, наблюдающегося с 2008 г., не смогло переломить общую тенденцию, что косвенно подтверждается активной проработкой проектов Шелкового пути, Шелкового ветра и им подобных со стороны Китая.

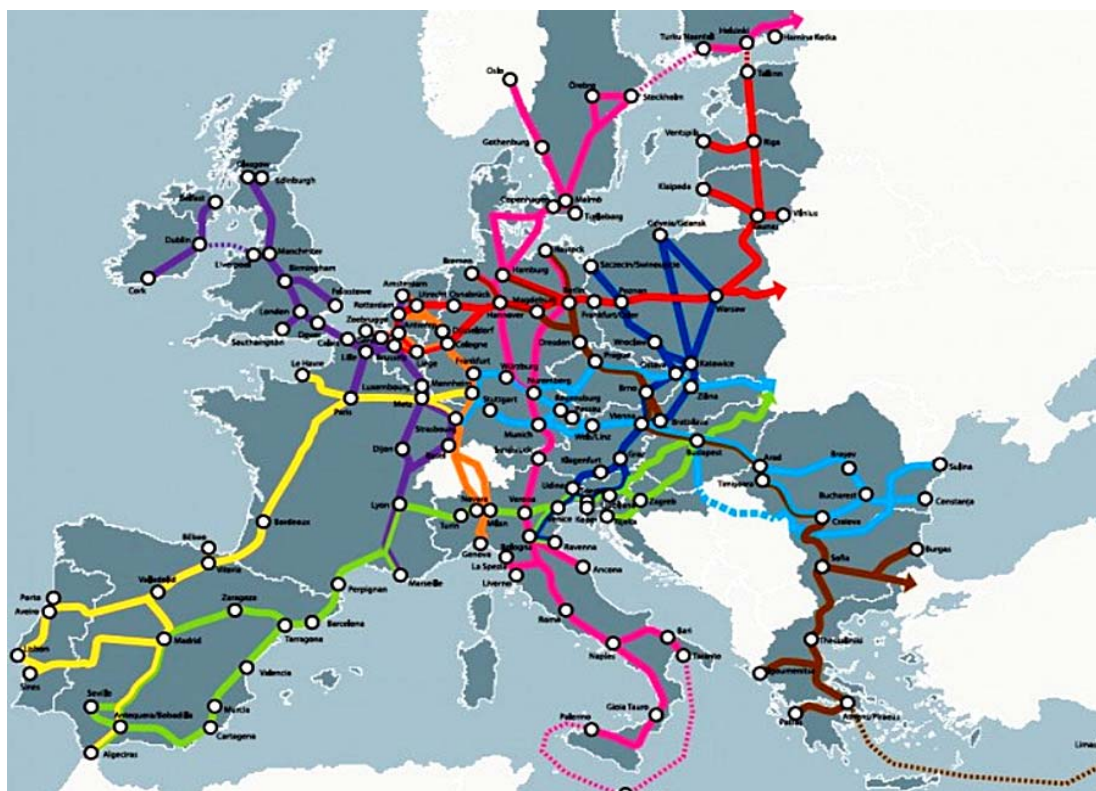


Рис. 1. Мировые транспортные потоки

Наиболее емкий по грузообороту маршрут – Deep Sea (Южный морской путь), проходящий через Суэцкий канал, – не отвечает условиям ускорения движения товарно-денежной массы (рис. 2). Это открывает возможности для разработки новых видов транспорта и новых способов транспортировки [1].



Рис. 2. Маршруты Северного и Южного морского пути

В европейских странах, несмотря на относительно низкую протяженность маршрутов грузовых перевозок, также возникла потребность в прорывных технологиях грузоперевозок. С одной стороны, она объясняется экологическими мотивами. С другой стороны, ряд стран, в том числе Швейцария, нуждаются в повышении эффективности транзита через собственную территорию. Со стороны стран Южной Европы, в свою очередь, возникает запрос на повышение скорости грузовых перевозок на дальние расстояния – в страны Северной и Восточной Европы, в Россию.

## Анализ

Исходя из нынешнего уровня развития техники и технологий, а также перспектив их развития для сравнения эффективности использования для массовых грузовых перевозок, определены следующие виды транспорта:

- традиционный железнодорожный;
- высокоскоростной железнодорожный (ВСМ);

- магнитолевитационный (на электромагнитном подвесе, электродинамическом подвесе, на основе постоянных магнитов);
- вакуумный;
- струнный.

Эффективность видов транспорта оценивали по следующим параметрам:

- 1) стоимостные характеристики (детализация стоимости строительства инфраструктуры, себестоимость перевозок);
- 2) эксплуатационные характеристики;
- 3) экологические характеристики и безопасность.

Стоимость строительства инфраструктуры железнодорожного транспорта зависит от условий строительства и местных условий. Так, в России стоимость строительства новой неэлектрифицированной линии начинается от 500–600 млн руб. за 1 км пути. Электрификация линии добавляет более 30 % к указанной стоимости.

Себестоимость грузовых перевозок традиционным железнодорожным транспортом на российских железных дорогах в действующих ценах не превышает 600 коп. за 10 ткм [2].

Затраты на сооружение пассажирских ВСМ существенно выше. Так, стоимость строительства магистрали между Москвой и Петербургом ВСЖМ-1 по каждому из двух вариантов финансирования составляет более 1 трлн руб., или 1,52 млрд руб. за 1 км пути (на 2012 г.) [3], магистрали Москва – Казань ВСМ-2 – 1,26 трлн руб., или 1,64 млрд руб. за 1 км пути (на 2017 г.) [4].

Затраты на ВСМ, предназначенные для регулярных грузовых перевозок, превышают указанные значения, однако точных цифр нет, поскольку реальные проекты находятся в стадии разработки. Наибольший интерес к данному виду перевозок проявляет Открытое акционерное общество «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»), а также Итальянская железнодорожная ассоциация инженеров [2, 5]. Проведя параллели с пассажирским движением, можно утверждать, что проект грузовой ВСМ будет иметь более высокую себестоимость перевозок по сравнению с традиционной железной дорогой [6].

Стоимость строительства магнитолевитационной магистрали для разных проектов имеет разброс от 500 млн руб. до 1,4 млрд руб. за 1 км пути. Более дорогими являются линии, в которых для левитации применяются постоянные магниты, в силу значительной стоимости последних как несущего элемента инфраструктуры. Наиболее дешевыми здесь выступают проекты легкого пассажирского транспорта на электромагнитном или электродинамическом подвесе.

Особенностью линий, основанных на магнитной левитации, является возможность их эстакадного исполнения, в результате их инфраструктура

может быть разделена на активную и пассивную. Пассивная часть инфраструктуры является аналогом неэлектрифицированной железнодорожной линии [7, 8]. Так, Научно-образовательный инженерный кластер «Российский Маглев» («РосМаглев») стоимость 1 км пассивной инфраструктуры для магнитолевитационных магистралей оценивает менее чем в 450 млн руб., что сопоставимо со стоимостью 1 км пути по «Проекту “Белкомур”» [9, 10]. Общая же стоимость 1 км пути проекта «РосМаглев» соответствует 1 млрд руб. за счет применения инновационных решений в области постоянных магнитов [11].

В отношении проектов магнитной левитации следует рассмотреть отдельно технологию на постоянных магнитах и остальные технологии.

Подвесы электродинамический (Maglev, Япония) и электромагнитный (Transrapid, Китай) не применяются в грузовых перевозках. Более того, серьезных разработок в данной области не проводилось, так как укрупненные расчеты показали, что энергозатраты на создание и поддержание левитации будут неоправданно высокими. В противоположность упомянутым технологиям, постоянные магниты обеспечивают перманентную левитацию, что компенсируется излишне высокой стоимостью инфраструктуры. Решение данной проблемы в российских условиях позволило выйти на расчетную величину эксплуатационных расходов на 24 % ниже традиционной железной дороги [11–13].

Стоимость строительства вакуумной магистрали включает в себя затраты на строительство магнитолевитационной линии и на возведение устройств для создания и поддержания технического вакуума. К таким устройствам относятся форвакуумные насосы, геттеры или высоковакуумные насосы. Экономическая оценка создания и поддержания вакуума отсутствует, при этом, по мнению специалистов, для протяженной трубы высокого диаметра такие затраты будут очень высокими.

Строительство 1 км трассы струнного транспорта оценивается на уровне 800 млн руб. без учета проектных работ под один путь в условиях опытного полигона. Себестоимость перевозок струнным транспортом не определена. Задекларировано снижение эксплуатационных расходов в 2 раза по сравнению с традиционным железнодорожным транспортом, однако информации об эксплуатационных расходах для грузовой линии нет. Учитывая конструктивные особенности струнного транспорта, можно прогнозировать высокие затраты на инспекцию и техническое обслуживание линии [14].

Резюмируя стоимостные характеристики использования различных видов транспорта для массовых грузовых перевозок, можно сделать следующие выводы:

- самая низкая стоимость инфраструктуры характерна для традиционного железнодорожного транспорта;



- наименьшая себестоимость перевозок обеспечивается магнитолевитационным транспортом на постоянных магнитах по технологии «РосМаглев»;

- наименьшую коммерческую выгоду на современном уровне развития техники и технологии предлагает вакуумный транспорт.

Вопрос эксплуатационных характеристик железнодорожного транспорта глубоко проработан. В США и Канаде курсируют составы длиной свыше 100 вагонов, каждый из которых несет по 2 контейнера. Инфраструктура и сами вагоны рассчитаны на скорости 140 и выше км/ч. Однако суточная скорость доставки грузов по-прежнему невысока. Например, в проекте «Транссиб за семь суток» ставится амбициозная цель – проходить 1400 км за 1 сутки [15].

Итальянский проект грузовой ВСМ предполагает достижение скорости 250 км/ч. Однако при этом длина состава не превышает 16 вагонов с 2 контейнерами на каждом [5].

В эксплуатационные характеристики проекта «РосМаглев» заложена длина состава 71 условный вагон, что соответствует максимальной длине состава на российских железных дорогах. Каждая транспортная единица способна нести морской контейнер. При этом рациональная длина поезда зависит от тормозного пути состава. При планируемой по проекту «РосМаглев» скорости 250 км/ч эта величина превышает 3 км. Технологически скорость может быть увеличена до 500 км/ч, однако используемая сегодня тара (контейнеры) не способна выдерживать действия возникающих сил.

Проекты вакуумного транспорта, в частности, Hyperloop, предполагают движение единичных транспортных средств, что технологически неэффективно. Кроме того, на заявленных скоростях (до 1000 км/ч) возникает обозначенная проблема целостности контейнеров. Эксплуатация же на скорости 250 и ниже км/ч не требует создания вакуумного пространства, что ставит под сомнение целесообразность проектов вакуумного транспорта в целом [16].

По эксплуатационным характеристикам на лидирующих позициях оказывается проект «РосМаглев», наименьшая эффективность достигается при использовании вакуумного транспорта.

С точки зрения экологичности и безопасности перевозок железнодорожный транспорт за последние десятилетия добился существенного прогресса. Однако более экологичными оказываются магнитолевитационный и вакуумный виды транспорта, что обусловлено отсутствием от них выбросов и иных видов загрязнения, в том числе шумовых.

В области безопасности магнитолевитационный транспорт является самым конкурентоспособным, особенно по сравнению с вакуумным. Это связано с тем, что в искусственной вакуумной среде существуют повы-

шенные риски из-за скачка плотности среды. При малейшем нарушении концентрации частиц газа перед транспортной единицей возникает своеобразная стена, с которой происходит столкновение. При существующем уровне развития техники и технологий вакуумный транспорт становится наиболее опасным из всех рассмотренных видов наземного транспорта.

## Результаты

Сравнительная характеристика эффективности видов наземного транспорта для массовых грузовых перевозок представлена на рис. 3.

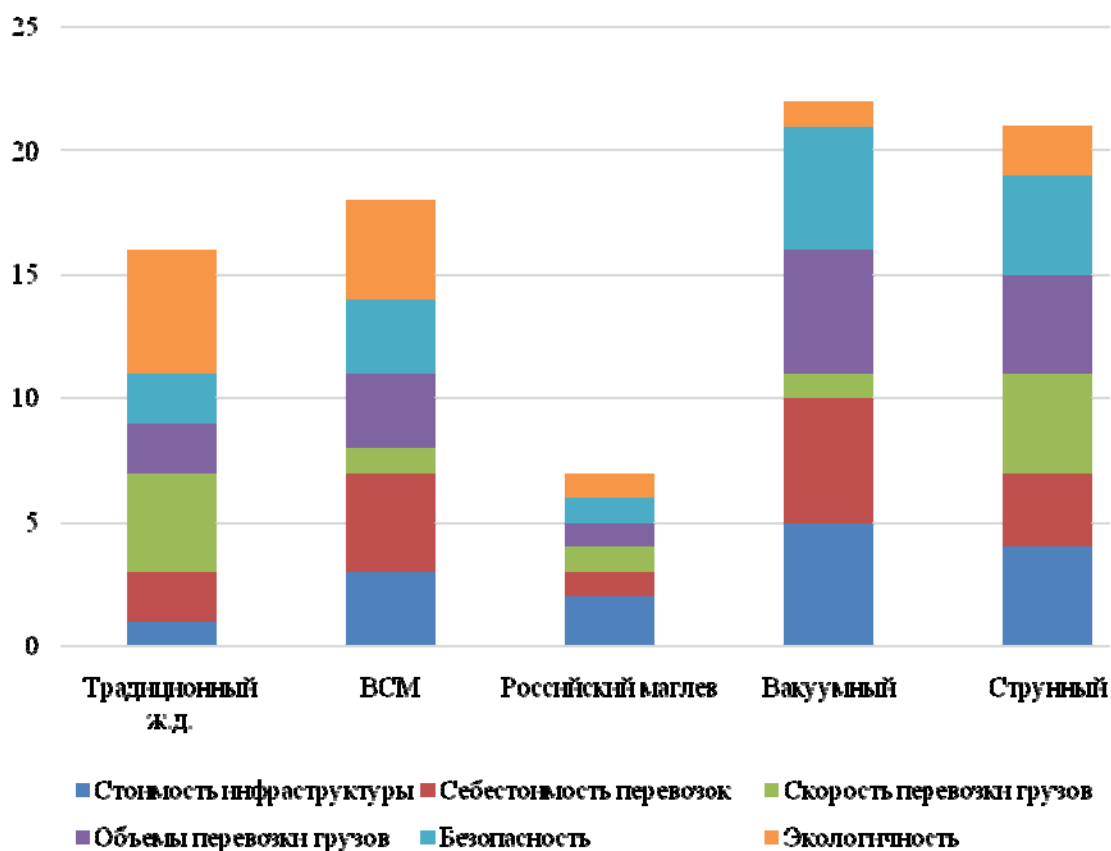


Рис. 3. Итоговая таблица эффективности видов наземного транспорта для массовых грузовых перевозок

Для массовых грузовых перевозок транспортом будущего, по мнению авторов, является магнитолевитационный на постоянных магнитах по российской технологии «РосМаглев», позволяющей существенно оптимизировать затраты на строительство инфраструктуры.

Второе место можно отдать традиционному железнодорожному транспорту. Однако при невысоком объеме спроса на перевозки и при внедрении энергоэффективного тягового подвижного состава высокоско-

ростной грузовой железнодорожный транспорт может составить конкуренцию, особенно в странах с развитой сетью ВСМ.

Последнее место уверенно занимает вакуумный транспорт. На сегодня технологии вакуумного транспорта еще сырые, и трудно спрогнозировать, осуществим ли проект, подобный Hyperloop. По оценкам специалистов, с учетом нынешнего уровня научно-технического прогресса и динамики его изменения для доведения транспортной технологии до стадии внедрения требуется от 30 до 50 лет. Поэтому можно говорить о том, что время магнитолевитационного транспорта как следующей ступени развития железнодорожного транспорта уже пришло. Это уже доказано как технологически, так и экономически. Придет ли время вакуумных технологий как следующей ступени развития магнитолевитационного транспорта – станет ясно через 20–25 лет.

## **Выводы**

Целесообразность внедрения магнитолевитационного транспорта для массовых грузовых перевозок очевидна. Используемые в настоящее время в разных странах технологии для перемещения пассажиров, базирующиеся на магнитной левитации, уже зарекомендовали себя как выгодные, безопасные и удобные. Техническая зрелость таких технологий позволяет учесть все достижения при возведении магнитолевитационных линий для грузового движения, что весьма перспективно в свете острой необходимости поиска альтернативных морским способом перевозок.

Несмотря на текущий уровень разработок по проектам, связанным с вакуумным и струнным транспортом, их практическая реализация – задача отдаленного будущего, требующая значительных вложений на этапах тестирования и временных затрат, а также глубокой оценки безопасности.

## **Библиографический список**

1. Следующий мировой нефтетранспортный коридор пройдет через Северный Ледовитый океан. – URL: <http://politikus.ru/articles/24148-sleduyuschiy-mirovoy-neftetransportnyy-koridor-proydet-cherez-severnyy-ledovityy-ocean.html> (дата обращения 27.11.2017).

2. Официальный сайт ОАО «РЖД». – URL: <http://www.rzd.ru> (дата обращения 27.11.2017).

3. Панченко А. Скоростные магистрали тянут из бюджета. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/1887630> (дата обращения 27.11.2017).

4. РЖД завершили проектирование высокоскоростной магистрали Москва – Казань. – URL: [https://lenta.ru/news/2017/09/07/misharin\\_vsm/](https://lenta.ru/news/2017/09/07/misharin_vsm/) (дата обращения 27.11.2017).

5. Официальный сайт EXPO Ferroviaria. – URL: <http://www.expoferroviaria.com/eng/welcome> (дата обращения 27.11.2017).
6. Распоряжение правительства Российской Федерации № 1734-р от 22.11.2008 г. «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года».
7. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев; под ред. В. А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
8. Зайцев А. А. Грузовая транспортная платформа на магнитолевитационной основе: опыт создания / А. А. Зайцев // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Вып. 2 (2). – С. 5–15. – URL: <http://www.transstyst.ru/2razdel-1-1-zaitsev.html.html>.
9. «Белкомур» перенесли на следующее. – URL: <http://komionline.ru/node/77454> (дата обращения 27.11.2017).
10. Официальный сайт «Проект Белкомур». – URL: <http://belkomur.com> (дата обращения 27.11.2017).
11. Официальный сайт Научно-образовательного инженерного кластера «Российский Маглев». – URL: <http://rusmaglev.com> (дата обращения 27.11.2017).
12. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта / А.А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 52–55.
13. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта и подходах к выбору специализации и физической основы высокоскоростного движения на направлении Москва – Санкт-Петербург / А.А. Зайцев // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». – 2016. – № 4. – С. 26–33.
14. Официальный сайт Группы компаний SkyWay. – URL: <http://skyway.org> (дата обращения 27.11.2017).
15. Восточный полигон – Транссиб и БАМ. Проект «Транссиб за семь суток». – URL: [http://cargo.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=5128&layer\\_id=3290&id=2084](http://cargo.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5128&layer_id=3290&id=2084) (дата обращения 27.11.2017).
16. Официальный сайт Hyperloop One. – URL: <https://hyperlooptech.com> (дата обращения 27.11.2017).

**Сведения об авторах:**

СМИРНОВ Сергей Александрович, старший научный сотрудник.

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

СМИРНОВА Ольга Юрьевна, научный сотрудник.

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

Научно-образовательный центр инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок ФГБОУ ВО ПГУПС.

S. A. Smirnov, O. Yu. Smirnova

## EVALUATION OF EFFECTIVENESS OF DIFFERENT TRANSPORT MODES FOR REGULAR MASS FREIGHT TRANSPORTATION

Date of receipt: 07.09. 2016

Decision of publication: 30.11. 2016

The article deals with different transport modes for regular mass freight transportation, their efficiency evaluation is conducted on the bases of cost, operational and environmental properties.

**Introduction.** Due to demand in ensuring mass transportations between Southeastern Asia and Europe, there is a topical issue of efficient application of different types of ground transport. There is a request rising, to use cutting edge achievements in technology, to increase speeds of freight transportation for long distance and their safety and environmental friendliness enhancement.

**Analysis.** Consideration of cost properties of application of different transport modes for mass freight transportation allows revealing that the lowest infrastructure cost is typical for conventional railway transport; the lowest prime cost of transportation is ensured by maglev transport with permanent magnets of the “RosMaglev” technology; the lowest commercially profitable mode of transport for today’s level of science and technology is vacuum transport.

Operationally, the leading project is “RosMaglev”, with the vacuum transport having the lowest operational efficiency.

From environmental and carrying safety points of view, railway transport has gone pretty far in the recent two decades. However, a more sustainable and safe one is the maglev and vacuum modes of transport, which is explained by lack of emissions and other types of pollution, including noise pollution.

In terms of safety, maglev transport is the most competitive mode of transport. Whereas, vacuum transport is the most dangerous one.

**Results.** For mass freight transportation, the most promising mode of transport is the “RosMaglev” permanent magnets maglev transport, according to the authors. The technology allows significant increase of infrastructure construction costs. The second most promising mode is conventional railway transport. However, if the demand in transportation is low and the energy efficient traction rolling stock is implemented, the high-speed freight railway transport may be highly competitive, especially in countries with developed high-speed railway network. The vacuum transport holds firmly the third place.

**Conclusion.** The relevance of maglev transport implementation for mass freight transportations is obvious. The maglev technologies now in use in many countries for carrying passengers have proved profitable, safe and convenient. Technical “maturity” of these technologies allows considering all points and factors when constructing maglev freight lines which is very topical due to increasing need in searching transport routes alternative to sea routes.

Railway transport, high-speed mainlines, maglev transport, vacuum transport, string transport, regular freight transportation, cost, operational properties, sustainability (environmental friendliness), safety, prospect of implementation, technology “RosMaglev”.

## Introduction

In the today's world, there are firmly established geographical centres of production and consumption, with the first one located in Southeast Asia including, but not limited by China, and the second one – in Europe, predominantly its western part. There is a steady goods turnover between these two centres, showing dynamical growth in recent years. Due to demand in ensuring regular mass freight transportations between these centres, there arises a topical issue of consideration of application efficiency of various ground transport modes.

Despite a more dense goods flow from Southeast Asian countries to European ones, their reverse transportation also takes place (fig. 1). Decrease in amount of turnover caused by global economic down turn lasting from 2008, could not break the common tendency, which is indirectly confirmed by active elaboration of projects of the New Silk Road, the Silk Wind and other projects by China.

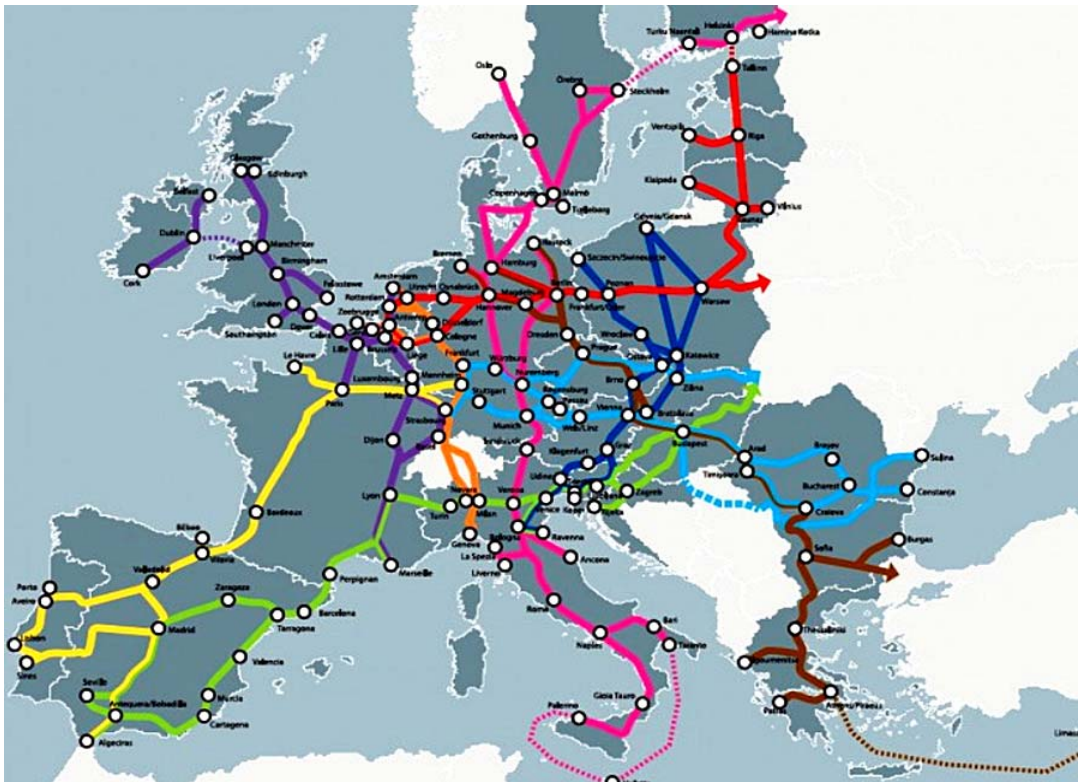


Fig. 1. World transport flows

The most capacious cargo route, the Deep Sea route, also known as the South Sea Route which passes through the Suez Canal, does not meet the conditions for acceleration of the movement of the commodity and money supply (fig. 2). This provides opportunities for the development of new modes of transport and new modes of transportation [1].



Fig. 2. The Northern Sea and the Suez Canal Routes

In European countries, despite a relatively low length of freight transportation routes, there also arose a demand in breakthrough technologies of freight transportation. This demand, on the one hand, is driven by environment protection ideas and policies. From the other hand, a number of states, including Switzerland, are in need of transit efficiency enhancement. On the part of Southern Europe states, in their turn, there is a demand to increase the speed of freight transportation over long distances - to the countries of Northern and Eastern Europe, and to Russia.

## Analysis

Based on the existing level of technologies and prospects of their further development for comparison of their application efficiency for mass freight transportation, the following types of transport are determined:

- conventional railway transport;
- HSR, high-speed railway transport;
- maglev transport (EMS, EDS, permanent magnet suspension);
- vacuum transport;
- string transport.

Assessment of efficiency of transport modes has been carried out in accordance with the following parameters:

- cost parameters (more precisely, in cost of infrastructure construction, prime cost of transportation);

- operational properties;
- environmental properties and safety.

Railway infrastructure construction costs are highly dependent on construction and local conditions. Thus, in Russian conditions the cost of new non-electrified line starts from 500-600 million (approximately 8.5-10.3 million USD) rubles per one kilometre of track. The electrification of this line will increase the initial cost by more than 30 %.

Prime cost of freight transportation by conventional railway transport in Russia does not exceed 600 kopeck (approximately 0.11 USD) per 10 tonnes per kilometre [2].

Expenditures for construction of passenger HSR are much higher. Thus, the cost of construction of the HSR-1 between Moscow and Saint Petersburg at each of two options of financing makes more than 1 trillion (17.2 billion USD) rubles or 1.52 billion (17.2 million USD) rubles per one kilometre (as of 2012) [3], HSR Moscow – Kazan (HSR-2) – 1.26 trillion (21.6 billion USD) rubles or 1.64 billion rubles (28.1 million USD) per one kilometre (as of 2017) [4].

Cost of regular freight traffic designed HSR is higher than the cost above, but there is no precise data, since the real projects are being developed. JSC “RZD” (Russian Railways) and the Italian Railway Engineers Association express their utmost interest in this type of transportation [2, 5]. Drawing parallels with passenger transportation, we are sure that freight HSR will demand higher costs compared to conventional railways’ ones [6].

The cost of construction of maglev mainline for different projects varies from 500 million rubles (8.6 million USD) to 1.4 billion rubles (24 million USD) for one kilometre of track. Infrastructure deploying permanent magnetics has a higher cost. The cheapest mode in this case is light-rail metro on electro-magnetic or electrodynamic suspensions.

The peculiar feature of maglev lines is that they can be installed in the form of flyovers, giving the possibility to divide the infrastructure into active and passive. The passive part is similar to non-electrified railway line [7, 8]. Thus, the Scientific and Engineering Cluster “Russian Maglev” (“RosMaglev”) estimates one kilometre of passive infrastructure for maglev lines less than 450 million rubles (7.4 million USD) which is comparable to the cost of one kilometre of the Project “Belkomur” [9, 10]. The overall cost of one kilometre of “RosMaglev” is estimated 1 billion rubles (17.1 million USD) which became possible with the help of cutting edge solutions in permanent magnets technologies [11].

In terms of maglev projects, it is advisable to separately consider permanent magnets technology and other technologies.

Electrodynamic (Maglev technology, Japan) and electromagnetic (Transrapid technology, China) suspensions have no application in freight transportation. Moreover, serious developments in this area have not been carried out, as enlarged calculations have shown that the energy costs for creation and



maintenance of levitation will be unreasonably high. In contrast to these technologies, permanent magnets provide permanent levitation, which is compensated by the excessively high cost of infrastructure. Solution of this problem in Russian conditions allowed us to reach the estimated value of operating costs by 24 % lower than that of the conventional railway [11–13].

The cost of construction of vacuum mainline includes expenditures for maglev line construction and installation of equipment for preservation of vacuum. These are forevacuum pumps, getters or high-vacuum pumps. There is no economic assessment of creation and maintenance of vacuum. At the same time, according to experts, to lay a long tube with large diameter will be very costly.

Construction of 1 km of string transport route is estimated 800 million rubles (13.7 million USD) without considering the design work for one track in the conditions of an experimental test site. The prime cost of transportation by string transport is not defined. A reduction in operating costs by 2 times compared to traditional rail transport has been declared, but there is no information about operating costs for the freight line. Taking into account the structural features of string transport, it is more possible to forecast high costs for inspection and maintenance of the line [14].

Summing up the cost properties of application of various modes of transport for mass freight transportation, we can make the following conclusions:

- the lowest price of infrastructure is the feature of conventional railway transport;
- the lowest prime cost of transportation is ensured by maglev transport with permanent magnets “RosMaglev”;
- the lowest commercial profit can be gained from the vacuum transport.

The operational properties of railway transport are a deeply studied issue. In the USA and Canada, trains run with over 100 wagons, each one carrying 2 containers. The infrastructure and the wagons themselves are designed for speeds of 140 km/h and over. However, the daily speed of delivery of goods is still low. For example, the project «Transsib for seven days» (Transsib za sem' sutok-in Russian) sets an ambitious goal, which consists in the passage of a distance of 1.400 km per day [15].

The Italian project of freight HSR suggests reaching a speed of 250 km/h. However, the length of the train does not exceed 16 wagons, each carrying 2 containers [5].

The operational properties of “RosMaglev” project include the length of the train with 71 wagons, which corresponds to the maximum length of the train on Russian railways. Each transport unit is capable of carrying a sea container. In this case, the rational length of the train depends on the stopping distance of the train. With the speed of 250 km/h planned for the “RosMaglev” project, this value exceeds 3 km. Technologically, the speed can be increased to 500 km/h,

but the containers that exist today are not capable to withstand the impacts of the arising forces.

Vacuum transport projects, in particular Hyperloop, suggest the motion of single vehicles, which is a technologically inefficient solution. In addition, at the declared speeds (up to 1000 km/h), the above mentioned problem of container integrity arises. Operation at a speed of 250 km/h or lower does not require the creation of a vacuum space, which puts under question the feasibility of vacuum transport projects as a whole [16].

According to the operational properties, the “RosMaglev” project is at the leading position, the lowest efficiency is achieved with the use of vacuum transport.

From the environmental and safety points of view, railway transport has made significant progress in recent decades. However, the maglev and vacuum modes of transport are more environmentally friendly, which is due to the absence of emissions and other types of pollution, including noise.

In terms of safety, maglev transport is the most competitive, especially in comparison with vacuum transport. This is due to the fact that in an artificially created vacuum environment, there is an increased risk associated with a jump in the density of the medium. The slightest violation of the concentration of gas particles, a “wall” springs up before the vehicle, causing collision. With the current level of development of technology, vacuum transport becomes the most dangerous of all types of ground transport considered.

## Results

Efficiency comparison of ground transport modes is given in the fig. 3.

As to the authors, for mass freight transportation by future transport the maglev transport with permanent magnets based on “RosMaglev” technologies is the future. It enables significant optimising infrastructure costs.

The second place would go to conventional railway transport. However, if the demand in transportation is low and the energy efficient traction rolling stock is implemented, the high-speed freight railway transport may be highly competitive, especially in countries with developed high-speed railway network. The vacuum transport holds firmly the third place.

As of today, vacuum transport technologies are still “raw” making it hard to forecast whether or not the Hyperloop, for example, will practically feasible. According to experts, taking into account the current level of scientific and technological progress and the dynamics of its change, to bring the transport technology to the stage of implementation requires from 30 to 50 years. Therefore, it can be said that the time for maglev transport, as the next stage in the development of railway transport, has already come. This has already been proved both technologically and economically. Whether the time for vacuum technolo-

gies will come, as the next stage in the development of maglev transport, will become clear in 20-25 years.

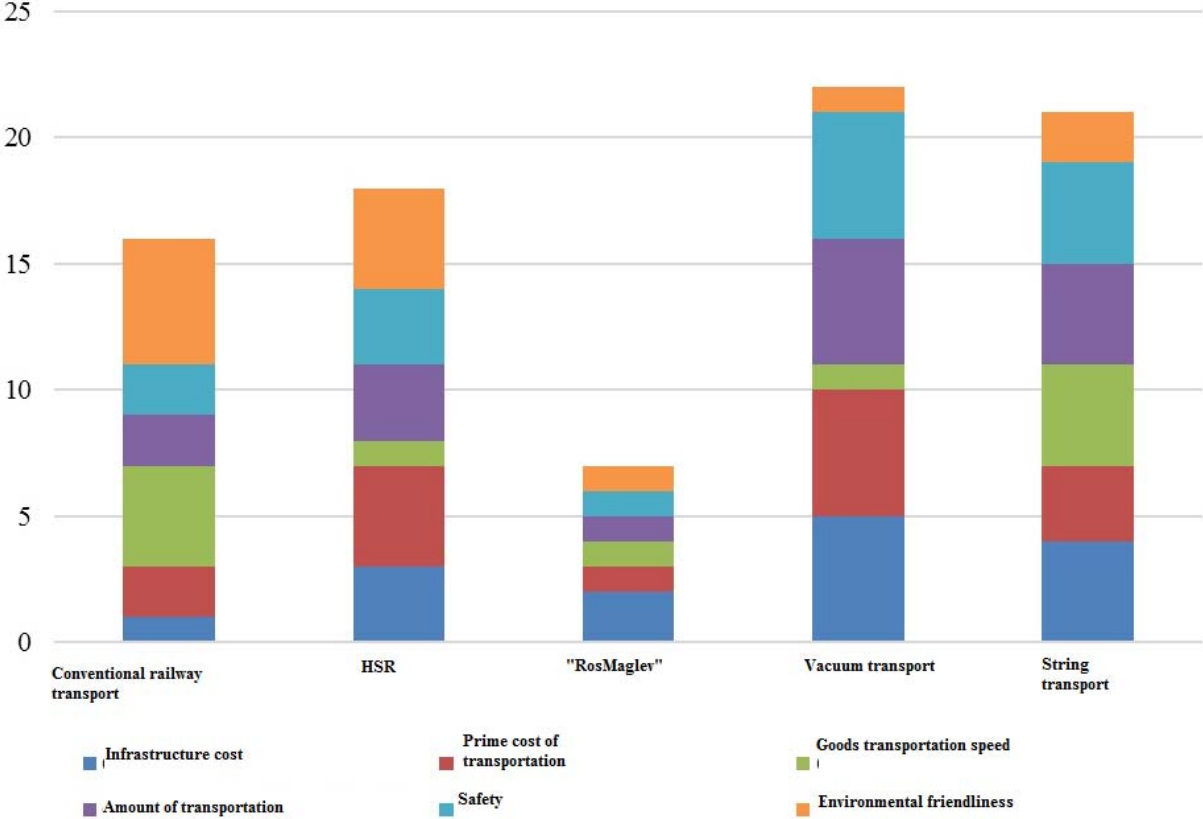


Fig. 3. Table showing efficiency of ground transport modes for mass freight transportation

### Conclusion

The relevance of maglev transport implementation for mass freight transportations is obvious. The maglev technologies now in use in many countries for carrying passengers have proved profitable, safe and convenient. Technical “maturity” of these technologies allows considering all points and factors when constructing maglev freight lines which is very topical due to increasing need in searching transport routes alternative to sea routes.

Despite the today’s level of vacuum and string projects related technologies, their practical feasibility is a long-term perspective requiring large investments at testing stages and thorough safety analysis.

### References

1. <http://politikus.ru/articles/24148-sleduyuschiy-mirovoy-neftetransportnyy-koridor-proydet-cherez-severnyy-ledovityy-okean.html> (accessed 27.11.2017).

2. Official Website of JSC “RZD” [Ofitsyal’nyi sait OAO “RZD”]. Available at: <http://www.rzd.ru> (accessed 27.11.2017).
3. Panchenko A. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/1887630> (accessed 27.11.2017).
4. [https://lenta.ru/news/2017/09/07/misharin\\_vsm](https://lenta.ru/news/2017/09/07/misharin_vsm) (accessed 27.11.2017).
5. Official Website of EXPO Ferroviaria. – Available at: <http://www.expoferroviaria.com/eng/welcome> (accessed 27.11.2017).
6. The Russian Federation Government Statement of 22.11.2008 № 1734-p “The Russian Federation Transport Strategy up to 2030” [Rasporiazhenie Pravitel’sstva Rossiiskoi Federatsyi № 1734-p ot 22.11. 2008 “Transportnaia strategiiia Rossiiskoi Federatsyi do 2030 goda”].
7. Antonov Yu., Zaitsev A. Magnetic Levitation Transport Technology [Magnitolevitatsionnaya transportnaya techno-logiya]. Moscow, 2014. 476 p.
8. Zaitsev A. *Transp. Syst. Technol. [Transportnye sistemy i tekhnologii]*. 2015, no. 2 (2). pp. 5–15. Available at: <http://www.transstest.ru/2razdel-1-1-zaitsev.html.html>.
9. <http://komionline.ru/node/77454> (accessed 27.11.2017).
10. Official Website of the Project “Belkomur” [Ofitsyal’nyi sait proekta “Belkomur”]. Available at: <http://belkomur.com> (accessed 27.11.2017).
11. Official Website of The Scientific and Engineering Cluster “Russian Maglev” [Ofitsyal’nyi sait nauchno-inzhenernogo klastera “Rossiiskii Maglev”]. Available at: <http://rusmaglev.com> (accessed 27.11.2017).
12. Zaitsev A. *Railway Transp. [Zheleznodorozhnyi transport]*. 2016, vol. 12, pp. 52–55.
13. Zaitsev A. *JSC “RZhD” Bulletin [Biulleten’ OUS OAO “RZhD”]*. 2016, vol. 4, pp. 26–33.
14. Official Website of SkyWay Group of Companies. Available at: <http://sky-way.org> (accessed 27.11.2017).
15. Freight Transportation of JSC “RZhD” [Gruzovye perevozki RZhD]. Available at: [http://cargo.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=5128&layer\\_id=3290&id=2084](http://cargo.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5128&layer_id=3290&id=2084) (accessed 27.11.2017).
16. Official Website of Hyperloop One. Available at: <https://hyperlooptech.com> (accessed 27.11.2017).

**Information about the authors:**

Sergei A. SMIRNOV, Senior Researcher.

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

Olga Yu. SMIRNOVA, Researcher.

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

Scientific and Educational Centre for Innovative Development of Railway Passenger Transportation