

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

MODERN
TRANSPORTATION
SYSTEMS AND
TECHNOLOGIES
peer-review journal

transsyst.ru

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

«ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

Электронный рецензируемый научный журнал
Выходит ежеквартально – 4 раза в год
Основан в 2013 году

ИНДЕКСАЦИЯ

РИНЦ (Российский индекс научного цитирования)
ВАК (Высшая аттестационная комиссия)
Google Scholar
WorldCat
Crossref
CyberLeninka

КОНТАКТЫ

Адрес: 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 115, ауд. 9/11-5
E-mail: transysst@mail.ru
WEB: www.transysst.ru
Телефон: +7 (911) 2384445

Научный редактор В.В. Никитин, доктор технических наук, профессор
Перевод на английский язык А.Ю. Гнатенко
Выпускающий редактор Т.С. Антонова
Редактор сайта А.Ю. Дитрихс
Литературный редактор Е.В. Васильева
Верстка А.А. Стуканова

СВИДЕТЕЛЬСТВО о регистрации средства массовой информации

Эл № ФС77-81789 от 31.08.2021 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

ОПИСАНИЕ ЖУРНАЛА

Сетевой электронный журнал "Транспортные системы и технологии" публикует статьи фундаментального характера и прикладного направления, а также обзорные статьи, относящиеся ко всем видам транспортной технологии

ПУБЛИКАЦИЯ В ЖУРНАЛЕ

Журнал отбирает материал для публикации из числа присланных для рассмотрения рукописей. В ходе отбора проводится независимое двойное слепое рецензирование членами редакционной коллегии и внешними экспертами. Для публикации рукопись, а также все сопроводительные и дополнительные файлы следует направить в редакцию через личный кабинет на сайте журнала по URL: <http://transysst.ru/>
Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://transysst.ru/transysst/about/submissions>

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 8, № 1

2022

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

И.О. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Смирнов Сергей Александрович,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР
Никитин Виктор Валерьевич,
д.т.н., профессор ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Богданов Александр Владимирович, д.физ.-мат.н., профессор Санкт-Петербургского Государственного университета, Санкт-Петербург, Россия;

Верескун Владимир Дмитриевич, д.т.н., профессор, ректор Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия;

Ганиев Ривнер Фазылович, академик РАН, д.т.н., профессор, Директор Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия;

Клюшпис Йоханнес, доктор наук 2-й степени, полный профессор Дегендорфской высшей технической школы, Мюнхен, Германия;

Колесников Владимир Иванович, академик РАН, д.т.н., профессор, президент Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов, Россия;

Кручинина Ирина Юрьевна, д.т.н., ВРИО директора Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

Линь Гобинь, PhD, профессор, директор Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;

Ли Вэйли, PhD, профессор Пекинского транспортного университета, Пекин, КНР;

Ма Чжисюнь, PhD, старший научный сотрудник Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;

Мулюков Радик Рафикович, член-кор. РАН, д.физ.-мат.н., директор Института проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия;

Мыльников Сергей Владимирович, к.биологич.н., доцент, ученый секретарь ООО «Эко-Вектор», Санкт-Петербург, Россия;

Никитенко Владимир Александрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика» Российского университета транспорта, Москва, Россия;

Ни Фэй, PhD, младший научный сотрудник, Национальный транспортно-инженерный центр Маглев, Университет Тунцзи, Шанхай, КНР

Панычев Александр Юрьевич, к.э.н., доцент, ректор Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия;

Подсорин Виктор Александрович, д.э.н., профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия;

Повадол Сирирангси, Dr., Заместитель декана Факультета логистики и управления транспортом Паньяпаватского института управления, Паккред, Таиланд;

Соломин Владимир Александрович, д.т.н., профессор Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия;

Стэфан Ричард, д.т.н., полный профессор Факультета электротехники, заведующий Лабораторией электрических машин Федерального университета Рио-де-Жанейро, Рио-де-Жанейро, Бразилия;

Терешина Наталья Петровна, д.э.н., профессор, Заведующая кафедрой «Экономика и управление на транспорте» Российского университета транспорта, Москва, Россия;

Титова Тамара Семёновна, д.т.н., Первый проректор – Проректор по науке Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия;

Хан Хён-Сук, PhD, начальник Департамента Маглев и линейных двигателей, старший научный сотрудник Корейского института машиностроения и материаловедения, Тэджон, Республика Корея.

FOUNDER AND PUBLISHER

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

"MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"

Electronic peer-reviewed research journal
Issued 4 times a year (quarterly)
Established in 2013

INDEXING

eLibrary (Russian Science Citation Index)
Higher Attestation Commission of Russia's Ministry of Education and Science (VAK)
Google Scholar
WorldCat
Crossref
CyberLeninka

CONTACTS

Address: 190031, St. Petersburg, 115 Moskovskiy Ave., room 9/11-5
E-mail: transsyst@mail.ru
Website: www.transsyst.ru
Phone: +7 (911) 2384445

Science Editor V.V. Nikitin, Doctor of Technical Science, Professor
Translation into English A.Yu. Gnatenko
The Executive Editor T.S. Antonova
WEB- Editor A.Yu. Dietrichs
Literary Editor E.V. Vasileva
Layout Editor A.A. Stukanova

AIMS & SCOPE

Network electronic journal "Modern Transportation Systems and Technologies" publishes articles of a fundamental nature and application areas, as well as review articles pertaining to all types of transport technology

JOURNAL CONTENT SELECTION

The journal selects material based on the double-blind peer-review conducted by members of the editorial board and external experts.

To be published, the manuscript and all accompanying files should be sent to the editorial team through a personal account on the journal's website at: <http://transsyst.ru/>

The manuscript and additional materials should be prepared and arranged in accordance with the author guidelines (see in detail at: <https://transsyst.ru/transsyst/about/submissions>)

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY

Vol. 8, Issue 1

2022

PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL**EDITOR-IN-CHIEF****Smirnov Sergey**

PGUPS, St. Petersburg, Russia

THE SCIENTIFIC EDITOR**Viktor Nikitin**

Dr.Sc., Professor, PGUPS, St. Petersburg, Russia

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Aleksandr Bogdanov, Dr. Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

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

Rivner Ganiev, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc..., Professor, Director Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Johannes Kluehspies, 2nd Dr.'s Degree, Full Professor at Deggendorf Institute of Technology, Munich, Germany;

Vladimir Kolesnikov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc..., Professor, the President Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;

Irina Kruchinina, Dr.Sc., Acting Director of Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia;

Guobin Lin, PhD, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Director, Professor, Tongji University, Shanghai, China;

Weili Li, Ph.D., Professor, Beijing Jiaotong University, Beijing, China;

Zhixun Ma, PhD, Associate Professor, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Tongji University, Shanghai, China;

Radik Mulyukov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Physics and Mathematics, Director of Superplasticity Metals Institute for Metals Superplasticity Problems at RAS, Ufa, Russia;

Sergey Mylnikov, PhD, Associate professor, Scientific secretary LCC "Eco-Vector", St. Petersburg, Russia;

Vladimir Nikitenko, Dr. Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics Russian University of Transport, Moscow, Russia;

Fei Ni, PhD, Assistant Researcher, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center, Tongji University, Shanghai, China;

Aleksandr Panychev, PhD, Associate professor, rector Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;

Viktor Podgorin, Doctor of Economics Science, Professor Russian Transport University, Moscow, Russia;

Sirirangsi Poovadol, Dr.Sc., MBA, Deputy Dean Faculty of Logistics and Transportation Management Panyapiwat Institute of Management, Pakkred, Thailand;

Vladimir Solomin, Dr. Sc., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;

Richard Magdalena Stephan, Dr.Sc., Full Professor, Department of Electrical Engineering, Head of Electric Machines Laboratory, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil;

Natalya Tereshina, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Economics and Transport Management Russian University of Transport, Moscow, Russia;

Tamila Titova, Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Vice-Rector for Research at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;

Han Hyung-Suk, PhD, Head of the Department of Maglev and Linear Drives, Principle Researcher, Korea Institute of Machinery & Material (KIMM), Daejeon, the Republic of Korea.

СОДЕРЖАНИЕ		TABLE OF CONTENTS
ОБЗОРЫ		REVIEWS
Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Петрушенко И.А., Аверченко Г.А. Использование бистальных элементов в пролетных строениях мостов	5	Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels Petrushenko I.A., Averchenko G.A. The use of bystal elements in bridge spans
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Боева П.А, Богданов М.В. Метод перераспределения маршрутной сети обслуживаемой СПб ГУП «Пассажиравтотранс» при открытии нового автобусного парка	16	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Boeva P.A., Bogdanov M.V. Method of redistribution of route network served by SPb GUP "Passazhiravtotrans" due to launch of new bus park
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ		ORIGINAL STUDIES
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Белов А.А., Васильев В.Н., Деомидов В.В., Зайцев А.А., Капаркова М.В., Кухтин В.П., Лабусов А.Н., Ламзин Е.А., Ларионов М.С., Маханьков Н.А., Неженцев А.Н., Овсянников Д.А., Овсянников Д.А. (мл.), Родин И.Ю., Сычевский С.Е., Фирсов А.А., Фирсова Т.А., Шатиль Н.А., Натурные испытания и верификация математической модели гибридного электромагнита подвеса для больших величин левитационных зазоров	28	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Engineering Amoskov V.M., Arslanova D.N., Belov A.A., Vasiliev V.N., Deomidov V.V., Zaytzev A.A., Kaparkova M.V., Kukhtin V.P., Labusov A.N., Lamzin E.A., Larionov M.S., Makhankov N.A., Nezhentzev A.N., Ovsyannikov D.A., Ovsyannikov D.A.(Jr), Rodin I.Yu., Sytchevsky S.E., Firsov A.A., Firsova T.A., Shatil N.A. Verification of numerical model of hybrid EMS using test bench measurements at large air gap
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнические комплексы и системы Ющенко В.В., Храпов В.Е. Модель сопряжения контейнера и фитинговой платформы	38	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Complexes and Systems Yushchenko V.V., Khrapov V.E. Container and fitting platform design model

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Соломин В.А., Соломин А.В., Замшина Л.Л., Трубицина Н.А. Определение осевого усилия цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента	50	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Engineering Solomin V.A., Solomin A.V., Zamshina L.L., Trubitsina N.A. Determination of the axial force of a cylindrical linear induction motor with rotational-translational movement of the secondary element
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Транспортные системы Фионов А.Н., Костенко А.С. Динамическая модель Московской монорельсовой транспортной системы с применением магнитолевитационной технологии	67	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Transport systems Fironov A.N., Kostenko A.C. Dynamic model of the Moscow monorail transport system using magnetolevitation technology
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Луцкий С.Я., Лычковский А.А., Ландсман А.Я. Технологическое регулирование и мониторинг сооружения дорожного земляного полотна	86	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels Lutskiy S.Y., Lychkovskiy A.A., Landsman A.Y. Technological regulation and monitoring of roadbed construction
Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Транспортные системы Филиппов А.Г., Смирнов С.С., Полиэктов Д.А., Васильев Г.Л. Установление зависимости потребного количества устройств досмотра от их пропускной способности и пассажиропотока	99	Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Transport systems Filippov A.G., Smirnov S.S., Poliektov D.A., Vasiliev G.L. The correlation between the number of security scanning devices, their capacity and passenger traffic
Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Транспортные системы Сугоровский А.В. Обоснование развития железнодорожной инфраструктуры путей необщего пользования с применением метода имитационного моделирования	115	Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Transport systems Sugorovsky A.V. Justification of the development of the railway infrastructure of non-public tracks using the method of simulation modeling
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Волкова Е.М. Проблемы интеграции каршеринга в городские транспортные системы российских мегаполисов технологий	124	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Volkova E.M. Problems of Carsharing Integration in Urban Transport Systems of Russian Megacities

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК [UDC] 624.075

DOI 10.17816/transsyst2022815-15

© И.А. Петрушенко, Г.А. Аверченко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИСТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЯХ МОСТОВ

Объектом исследования являются пролетных строений из двух марок стали различной прочности. В статье исследуется эффективность применения бистальной компоновки сечений балок мостовых сооружений на основании технико-экономического анализа, заключающегося в определении величины строительных и конструктивных коэффициентов в пересчете на бистальные сечения для балок таких же пролетов с целью выявления экономии металла. В ходе исследования была подтверждена эффективность применения в наборе сталей различной прочности. Изложенные в статье материалы могут быть положены в основу практического применения бистальных пролетных строений.

Ключевые слова: бистальные пролетные строение, бистальные и бисталежелезобетонные балки, строительные и конструктивные коэффициенты, уменьшение расхода стали, автодорожные мостовые сооружения.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© I.A. Petrushenko, G.A. Averchenko

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

THE USE OF BYSTAL ELEMENTS IN BRIDGE SPANS

The object of the research is the structures of spans made of two types of steel of different strengths. The article examines the effectiveness of the use of the bisteel beams of bridge structures based on a technical and economic analysis, which consists of determining the value of construction and structural coefficients for beams of the same spans in order to identify metal savings. In the course of the study, the effectiveness of using steels of various strengths in a set was confirmed. The material described in the article can be used as the basis for the practical application of bisteel spans.

Key words: *bisteel structures of spans, bisteel beams, construction and structural coefficients, metal saving, road bridges.*

ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс в области эффективного использования материалов стимулирует уменьшение стоимости мостовых сооружений посредством применения бистальных несущих элементов, эффект от использования которых достигается посредством рационального сочетания различных по прочности сталей, распределенных по высоте сечения в зависимости от напряженно-деформированного состояния пролетного строения [1].

В настоящее время на базе проведенных научных исследований СПбПУ ИСИ, а также накопленного практического опыта имеется возможность уменьшения расхода стали для металлических автодорожных пролетных строений средних и больших пролетов за счет применения бистальной компоновки сечений, эффективность использования которых исследуется в данной статье.

РЕЗУЛЬТАТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье предлагается осуществить совершенствование автодорожных сталежелезобетонных и цельнометаллических пролетных строений параллельно с их унификацией, для чего требуется определить величину строительных и конструктивных коэффициентов в пересчете на бистальные сечения для балок таких же пролетов с целью выявления экономии металла и возможного снижения веса. Строительный коэффициент представляет собой отношение действительного веса элемента к конструктивному весу, полученному как произведение подобранной площади сечения элемента на его теоретическую длину l и удельный вес γ , т. е.

$$G = \psi F^{\text{теор}} l \gamma, \quad (1)$$

где

$$\psi = \frac{F^{\text{пр}}}{F^{\text{теор}}} \eta; \quad \eta = \frac{G_m}{F^{\text{пр}} \gamma l}.$$

В свою очередь, конструктивный коэффициент представляет собой отношение действительного веса элемента к теоретическому, полученному как произведение теоретически необходимой площади элемента на его теоретическую длину l и γ . В целях более полного представления о величине

строительных и конструктивных коэффициентов для пролетных строений различных статических схем на в программном комплексе MATLAB была реализована программа применительно как к разрезным, так и неразрезным системам пролетных строений. Причем произведен подсчет строительных и конструктивных коэффициентов для ряда реальных, ранее построенных мостов с бистальными балками для практического сопоставления их с коэффициентами в предлагаемых вариантах унифицированных бистальных пролетных строений.

Строительные и конструктивные коэффициенты подсчитывались для систем пролетных строений: 42+63+42 м (серии 3,503 – 59); 63+84+63 м (серии 3,503 – 50); 48+60+48 м (серии 5776KM); $l=63$ м (серии 42006KM) с компоновками сечений, указанными на рис. 1, 2, и для сравнения вышеуказанные коэффициенты определялись для пролетных строений в моностальном исполнении. Бистальные балки компоновались из следующих марок сталей:

1. Сталь стенки и верхнего пояса 15ХСНД; сталь нижнего пояса 12ГН2МФАЮ.
2. Сталь стенки поясов 15ХСНД.
3. Сталь стенки и верхнего пояса 16Д (М16С), для пролетного строения с пролетом 63 м для нижнего пояса использовалась сталь 10ХСНД.
4. Сталь стенки и верхнего пояса 14Г2, а сталь нижнего пояса марки 12Г2СМФ и 14Х2РМР (48+60+48 м).

В первом приближении эффективность предполагаемых решений с различной компоновкой сечений оценивалась величиной экономии металла по отношению к качеству затраченной стали повышенной или высокой прочности. Такая оценка представлена в Таблице.

Для уточнения экономического эффекта с помощью строительных и конструктивных коэффициентов авторами составлен расчет с помощью программы MATLAB указанных схем и типов компоновок поперечных сечений.

Входными данными программы являются: значения моментов, марки используемой стали, варианты схем. В теле программы организовано несколько вложенных друг в друга циклов по моментам и по сечениям пролетного строения моста.

После того, как будут произведены расчеты деформаций и прочностных характеристик, они проверяются на соответствие заданным значениям, и в случае совпадения происходит запоминание размеров поперечного сечения балок.

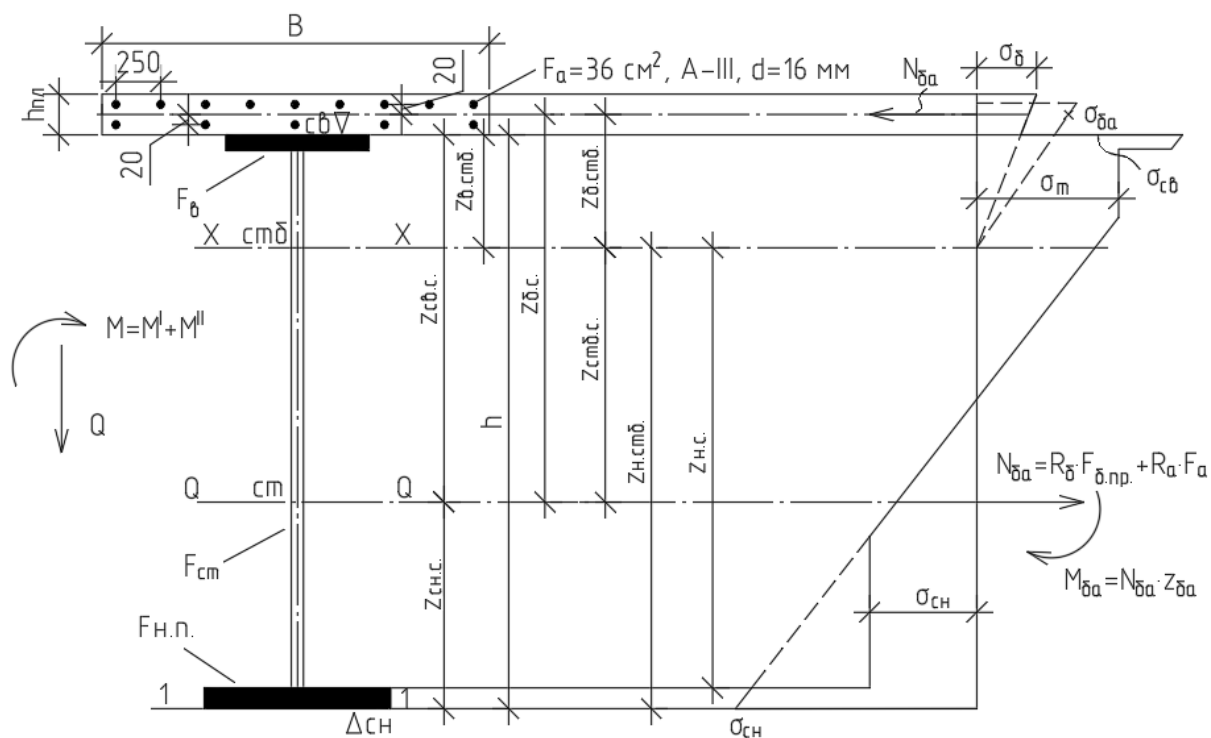


Рис. 1. Расчётная схема и эпюра предельных напряжений
бисталежелезобетонного сечения

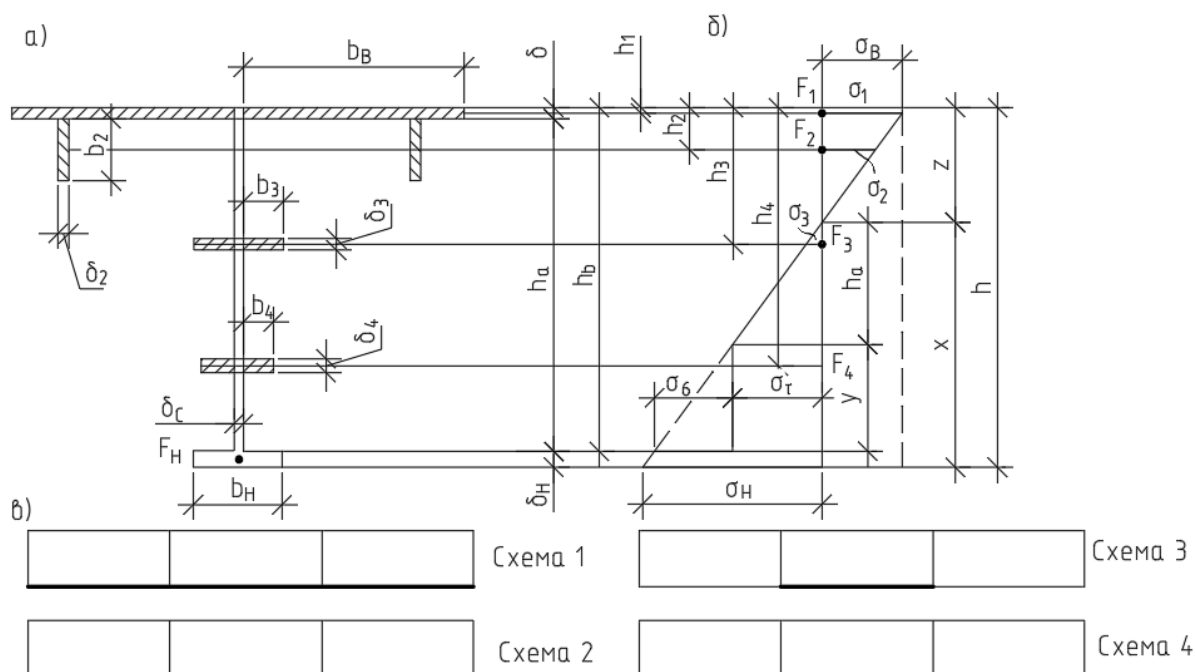


Рис. 2. Расчётная схема, эпюра предельных напряжений и схемы пролётных строений:
a – расчетная схема; *б* – эпюра пред. напряжений; *в* – схемы пролётных строений

Таблица. Экономическая эффективность балок с различным набором сталей

Компоновка сечений из сталей	Тип балки	Общая затрата стали, %	Затраты стали повышенной и высокой прочности, %	Экономия стали, %	Экономия стали, отнесенная к затраченной стали повышенной или высокой прочности, %
(М16С), 15Д, 14Г2	Моно-сталь	100	0	0	—
15ХСНД	Моно-сталь	81,6	81,6	18,4	22,6
16Д – высокопрочная сталь	Би-сталь	91	28,7	9,0	31,8
16Д – повышенной прочности	Би-сталь	81,6	46,0	18,4	28,3
14Г2, 15ХСНД – высокопрочная сталь	Би-сталь	81,6	32	16	27,2

В конце работы программа распечатывает накопленные значения, а также номера вариантных схем и моментов.

Согласно полученным на этом этапе работы данным построены графические зависимости, характеризующие многосторонность зависимости конструктивных и строительных коэффициентов для бистальных и бисталежелезобетонных пролетных строений, причем полученные в окончательном виде значения коэффициентов основывались на использовании при расчете «метода характеристик веса», согласно которому величина отношения веса бистальных балок к моностальной находится по формуле:

$$\Delta G = \frac{gL^2\gamma\chi'h'_c}{\sigma_{м,ст}} (1 - \chi_m \cdot m \cdot \Delta h), \quad (2)$$

где h'_c – коэффициент учета влияния собственного веса балок; Δh – коэффициент, учитывающий влияние отношения собственного веса бистальной балки к моностальной; χ_m – коэффициент, характеризующий соотношение фактических характеристик веса.

Как показали предварительные выводы, строительный коэффициент для бистальных пролетных строений находится в пределах 1,12...1,22, для бисталежелезобетонных – 1,12...1,28, то есть выше, чем для бистальных с ортотропной плитой проезжей части.

Конструктивный коэффициент для бистальных и бисталежелезобетонных балок в среднем одинаковый и находится в пределах 1,12...1,35, для схемы 1 пролета с $l = 63$ м значение 1,46. Это свидетельствует об эффективности применения в наборе сталей различной прочности, в том числе высокопрочных (Рис. 3). В среднем отличие от моностальных унифицированных пролетных строений по коэффициентам составило: строительному – 7...10 %, конструктивному – 7...12 % (15 %). Влияние конструктивной формы поперечных сечений на формирование величины строительных и конструктивных коэффициентов говорит о том, что в двутавровых сечениях влияние прочности сталей на изменение размеров элементов сечения сказывается в большей степени, нежели в коробчатых (Рис. 4).

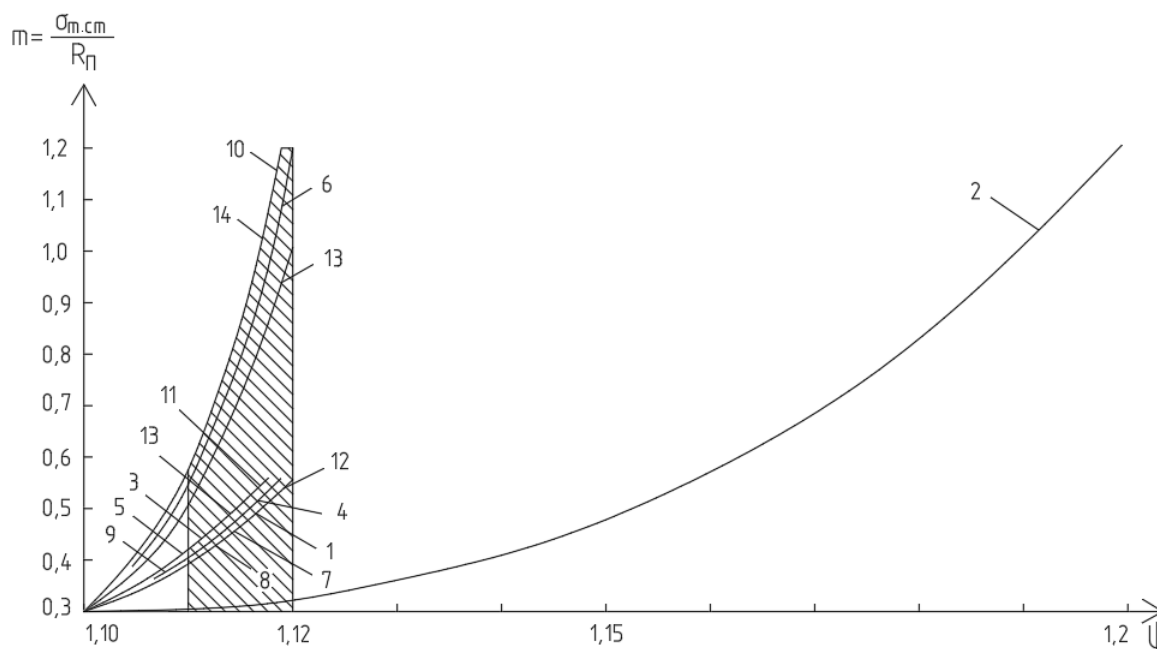


Рис. 3. График зависимости строительного коэффициента от типа пролетного строения:

42+63+42 м	63+84+63 м	48+60+48 м	$l = 63$ м
1 – схема № 1	5 – схема № 1	9 – схема № 1	13 – схема № 1
2 – схема № 2	6 – схема № 2	10 – схема № 2	14 – схема № 2
3 – схема № 3	7 – схема № 3	11 – схема № 3	
4 – схема № 4	8 – схема № 4	12 – схема № 4	

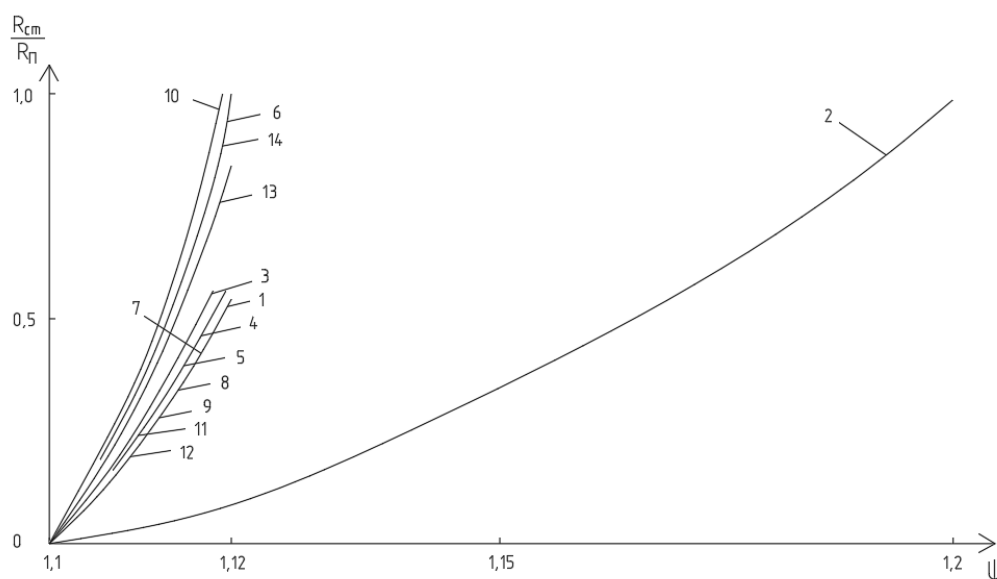


Рис. 4. График зависимости строительного коэффициента от отношения пределов прочности стали стенки к стали пояса для пролетных строений:

Доказательством тому может служить эффект работы коробчатого сечения за пределом упругости, в большей мере проявляющийся при пролетах 120...200 м и выше, тогда как в пролетных строениях с бистальными балками двутаврового сечения эффект упругопластической работы проявляется уже при пролетах 40 м и выше (Рис. 5).

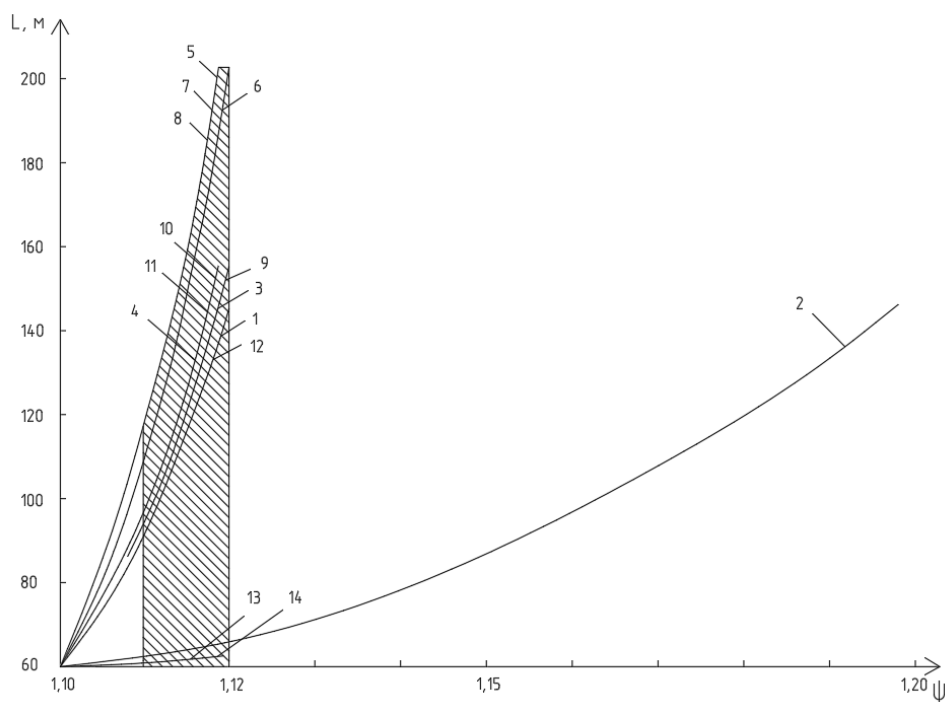


Рис. 5. График зависимости строительного коэффициента от длины пролетного строения

ВЫВОД

Рассчитанные конструктивные и строительные коэффициенты для различных сочетаний металлов в пролетных строениях демонстрируют преимущества применения бистальных и бисталежелезобетонных балок в мостовых сооружениях. При этом анализ программы расчета и полученных результатов указал на необходимость расширения границ упругопластической работы стенки двутавровых и коробчатых бистальных балок с целью получения дополнительной экономии металла и совершенствования критерия предельных состояний.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов.
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Картопольцев В.М. Применение бистальных балок в пролетных строениях автодорожных мостов: специальность 05.23.15: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Картопольцев Владимир Михайлович. – Ленинград, 1991. – С. 5–11. [Kartopol'cev VM. Primenenie bistal'nyh balok v proletnyh stroenijah avtodorozhnyh mostov : special'nost' 05.23.15 : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk. Kartopol'cev Vladimir Mihajlovich. 1991;5-11. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.12.2021. Доступно по: <https://dlib.rsl.ru/01000298430>
2. Ермошин Н.А., Лазарев Ю.Г., Егосин А.М., Змеев А.Т. Планирование развития дорожной сети с учетом принципов многокритериальной оптимизации // Путь навигатор. – 2019. – №38(64). – С. 24–31. [Ermoshin NA, Lazarev YuG, Egoshin AM, Zmeev AT. Planirovanie razvitiya dorozhnoi seti s uchetom printsipov mnogokriterial'noi optimizatsii. Path navigator. 2019;(38(64)):24-31. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.12.2021. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37285708>
3. Аверченко Г.А., Огурцов Г.Л. Перспективы использования композитного материала в мостостроении // IV Международная научно-практическая конференция: «Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития»; Апрель 3, 2019; Петрозаводск. [Averchenko GA, Ogurtsov GL. Composite material in bridge construction - the way to perfection. (Conference proceedigs) IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: "Fundamental'naya i prikladnaya nauka: sostoyanie i tendentsii razvitiya"; 2019 Apr 3; Petrozavodsk (In Russ.)]. Ссылка активна на: 23.12.2020. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41475166>
4. Русаков М.Н., Исмаилов А.М. Стирол-бутадиен-стирольные полимеры для автодорожного строительства в Российской Федерации // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2020. – № 2 (87). – С. 23–40. [Rusakov MN, Ismailov AM. Styrene-butadiene-styrene polymers for road construction in the Russian

- Federation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020;(2(87)):23-40. (In Russ.)). Ссылка активна на: 09.12.2021. Доступно по <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44507829>
5. Урчева Ю.А., Холоднов В.А., Сыроежко А.М. и др. Компромиссная оценка предпочтительности полимеров типа стирол-бутадиен-стирол, используемых при производстве полимерно-битумного вяжущего, с использованием нечетких множеств // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2020. – № 55. – С. 97–102. [Urcheva JA, Holodnov VA, Syroezhko AM, et al. Compromise assessment of the preference of styrene-butadiene-styrene copolymers, used in the production of polymer-modified bitumen, using fuzzy sets. *Bulletin of the St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2020;(55):97-102. (In Russ.)). doi 10.36807/1998-9849-2020-55-81-97-102
 6. Аверченко Г.А., Борисов В.А., Гуга Н.А., и др. Феноменологический метод прогнозирования оценки механических свойств полимерных композиционных материалов / В сборнике: региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия. Материалы Международной научно-практической конференции / Под ред. Сыроева О.Е. – 2020. – С. 158–160. [Averchenko GA, Borisov VA, Guga NA, et al. Phenomenological method for forecasting the estimation of the mechanical properties of polymeric composite materials. In: *Regional'nye aspekty razvitiya nauki i obrazovaniya v oblasti arhitektury, stroitel'stva, zemleustrojstva i kadaстров v nachale III tysjacheletija. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Editor Sysoev OE. 2020:158–160. (In Russ.)). Ссылка активна на: 07.12.2021. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44864573>
 7. Пискун А.С., Ганец Г.В., Аверченко Г.А. Методы натурного обследования железобетонного моста на примере моста через реку Косопаха // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. – № 7. – С. 957–967. [Piskun AS, Ganec GV, Averchenko GA. Methods of on-site inspection of a reinforced concrete bridge exemplified by the bridge over the river Kosopasha. *Vestnik MGSU*. 2020;15(7):957-967. (In Russ.)). Ссылка активна на: 07.12.2021. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44349001>
 8. Аверченко Г.А., Павленко А.Д., Зорина Е.А., Наборщикова Д.Н. Строительство водопропускных труб методом продавливания готовых звеньев в насыпь // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 45–60. [Averchenko GA, Pavlenko AD, Zorina EA, Naborshnikova DN. Construction of culverts by pushing the finished links into the embankment. *Transportation systems and technology*. 2020;6(4):45-60. (In Russ.)). doi: 10.17816/transsyst20206445-60
 9. Аверченко Г.А., Огурцов Г.Л. Перспективы использования композитного материала в мостостроении / В сборнике: Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития. Сборник статей II Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 229–231. [Averchenko GA, Ogurcov GL. Composite material in bridge construction – the way to perfection. V sbornike: *Fundamental'naja i prikladnaja nauka: sostojanie i tendencii razvitiya. sbornik statej II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. 2019:229-231. (In Russ.)). Ссылка активна на 07.12.2021. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41475166>
 10. Alekseytsev AV, Al Ali M. Optimization of hybrid I-beams using modified particle swarm method. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;7(83):175-185. [cited 09 Dec 2021]

Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37319133>

11. Абаев А.С. Техничко-экономическое сравнение вариантов моностальной и бистальной стропильных ферм // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 2(11). – С. 2–4. [Abaev AS. Techno-economic comparison of options of monosteel and bisteel roof trusses. *Molodoj issledovatel' Dona*. 2018;(2(11)):2-4. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.12.2021. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34971629>
12. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Разработка перспективных (гибридных) конструкций пролетных строений мостов из сталей различной прочности // Вестник ТГАСУ. – 2017. – № 3. – 67 с. [Kartopol'cev VM, Kartopol'cev AV. Hybrid design of bridge span structures made of different strength steel. *Vestnik TGASU*. 2017;(3):67. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.12.2021. Доступно по <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29345496>
13. Федотова Е.А., Акопьян К.А., Леонова А.Н. Специальные типы составных балок // Глобус: технические науки. – 2019. – № 6. – 30 с. [Fedotova EA, Akop'jan KA, Leonova AN. Special'nye tipy sostavnyh balok. *Globus: tehicheskie nauki*. 2019;(6):30. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.12.2021. Доступно по <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44306230>
14. Зорина Е.А., Ким Д.У., Аверченко Г.А., Уколов С.А. Устойчивость конструкций автодорожных и железнодорожных мостов при вынужденных колебаниях стержневых систем // Путевой навигатор. – 2021. – № 47(73). – С. 39–47. [Zorina EA, Kim DU, Averchenko GA, Ukolov SA. Ustojchivost' konstrukcij avtodorozhnyh i zheleznodorozhnyh mostov pri vynuzhdennyh kolebanijah sterzhnevyyh sistem. *Path Navigator*. 2021;(47(73)):39-47. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.12.2021. Доступно по <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46208591>
15. Аверченко Г.А., Баланин А.П., Борисов В.А., и др. Использование жесткой нити в качестве несущего элемента покрытий больших пролетов / В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. – 2021. – С. 227–229. [Averchenko GA, Balanin AP, Borisov VA, et al. Ispol'zovanie zhestkoj niti v kachestve nesushhego jelementa pokrytij bol'shih proletov. V sbornike: Nedelja nauki ISI. Materialy vserossijskoj konferencii v 3-h chastjah. Inzhenerno-stroitel'nyj institut Sankt-Peterburgskogo politehnicheskogo universiteta Petra Velikogo. 2021:227-229. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.12.2021. Доступно по <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46294823>
16. Алексеев С.В., Шевченко С.М., Трифонова А.А. Выявление наиболее надежных конструкций деформационных швов // Путевой навигатор. – 2021. – № 46(72). – С. 36–43. [Alekseev SV, Shevchenko SM, Trifonova AA. Vyjavlenie naibolee nadezhnyh konstrukcij deformacionnyh shvov. *Path Navigator*. 2021;(46(72)):36-43. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.12.2021. Доступно по <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45154681>

Сведения об авторах:

Петрушенко Игорь Анатольевич, студент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 8891-7878; ORCID: 0000-0002-1236-0260; Scopus ID: 57216628688;
E-mail: petrushenko.ia@edu.spbstu.ru

Аверченко Глеб Александрович, ассистент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;
E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Information about the authors:

Igor A. Petrushenko, student, Civil Engineering Institute;
eLibrary SPIN: 8891-7878; ORCID: 0000-0002-1236-0260;
E-mail: petrushenko.ia@edu.spbstu.ru

Gleb A. Averchenko, assistant, Civil Engineering Institute;
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X; Scopus ID: 57216628688;
E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Цитировать:

Петрушенко И.А., Аверченко Г.А. Использование бистальных элементов в пролетных строениях мостов // Инновационные транспортные системы и технологии – 2020. – Т. 8. – № 1. – С. 5–15. doi: 10.17816/transsyst2022815-15

To cite this article:

Petrushenko IA, Averchenko GA. The use of bystal elements in bridge spans. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2020;8(1):5-15. doi: 10.17816/transsyst2022815-15

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.02

DOI 10.17816/transsyst20228116-27

© П.А. Боева, М.В. Богданов

Санкт-Петербургский Горный университет
(Санкт-Петербург, Россия)**МЕТОД ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАРШРУТНОЙ СЕТИ
ОБСЛУЖИВАЕМОЙ СПБ ГУП «ПАССАЖИРАВТОТРАНС»
ПРИ ОТКРЫТИИ НОВОГО АВТОБУСНОГО ПАРКА**

В статье проведен литературный обзор по теме перераспределения маршрутных сетей, а также показаны возможности применения разных подходов к перераспределению маршрутных сетей СПБ ГУП «Пассажиравтотранс» с точки зрения открытия нового автобусного парка. Отмечено, что появление нового автопарка повлияет на появление новых маршрутов и поскольку любые изменения маршрута затрагивают все соседние – следует пересматривать и их – как коммерческие, так и городские, т. е. появляется необходимость решения задачи перераспределения существующей маршрутной сети. Автором обосновывается важность применения для этой цели математического моделирования в целом и моделирования на базе концепции машинного обучения и «цифрового двойника», в частности.

Ключевые слова: СПБ ГУП Пассажиравтотранс, маршрутная сеть, перераспределение, моделирование, цифровой двойник.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© P.A. Boeva, M.V. Bogdanov

St. Petersburg Mining University
(St. Petersburg, Russia)**METHOD OF REDISTRIBUTION OF ROUTE NETWORK SERVED
BY SPB GUP "PASSAZHIRAVTOTRANS"
DUE TO LAUNCH OF NEW BUS PARK**

The article provides a literary review on the redistribution of route networks, and also shows the possibilities of applying different approaches to the redistribution of route networks of SPB GUP "Passazhiravtotrans" from the point of view of opening a new bus fleet. The author substantiates the importance of using mathematical modeling in general for this purpose and modeling based on the concept of machine learning and the "digital twin", in particular, as perspective.

Key words: SPB GUP Passazhiravtotrans, route network, redistribution, modelling, digital twin.

ВВЕДЕНИЕ

Санкт-Петербургское государственное унитарное предприятие пассажирского автомобильного транспорта (СПб ГУП «Пассажиравтотранс») является одним из крупнейших пассажирских перевозчиков автобусным транспортом Северо-Западного региона России.

Предприятие осуществляет в установленном порядке перевозки пассажиров автобусами и обслуживает 143 городских и пригородных маршрута. На линию выходят 1600 автобусов большого и особо большого класса. Ежегодно автобусы перевозят более 300 млн пассажиров. В структуру предприятия входят шесть автобусных парков, автобусный вокзал, учебный комбинат, медико-санитарная часть № 70 [1].

Несмотря на то, что внедрение новой модели транспортного обслуживания населения в рамках Транспортной реформы в Санкт-Петербурге перенесено на 2022 год, некоторые мероприятия проводятся раньше этого срока [2]. В текущем году СПб ГУП «Пассажиравтотранс» планирует запустить новый специализированный автобусный парк, в связи с чем уже сейчас возникает потребность в выработке эффективных подходов для перераспределения маршрутной сети, обслуживаемой СПб ГУП «Пассажиравтотранс» при открытии нового автобусного парка.

ТЕКУЩАЯ СИТУАЦИЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ ГУП «ПАССАЖИРАВТОТРАНС»

В соответствии с информацией на официальном сайте Администрации Санкт-Петербурге, подписано постановление Правительства о внесении изменений в Документ планирования регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом [3]. Данным документом утверждена новая маршрутная сеть, которая начнёт работать с 15 июля 2022 года в рамках внедрения Новой модели транспортного обслуживания населения. В соответствии с ней с 15 июля 2022 года петербуржцев будут обслуживать 459 автобусных маршрутов: 110 «социальных» маршрутов продолжит обслуживать ГУП «Пассажиравтотранс». 349 «социальных» маршрутов будут выставлены на конкурс, из них: 254 ныне действующих маршрута и 95 новых маршрутов [3].

Проблеме организации транспортного обслуживания и взаимодействия между государством и негосударственными операторами посвящен ряд работ отечественных ученых, таких как: И.В. Спирин, А.А. Сериков, А. Г. Чурилов, С.А. Свиридов, А.В. Гринченко, А.Л. Кирьянов, Е.А. Василенко. В работах И.В. Спирина, А.Г. Чурилова [4]. В данных исследования отмечено, что распределение маршрутной сети города происходит по принципу равного

долевого участия государственного и частного перевозчиков, предварительно категоризируя маршруты по признаку социальной значимости и доходности.

Так, например на 2014 г. опыт регулирования рынка пассажирских перевозок в Санкт-Петербурге имеет долю участия частного и государственного секторов (ГУП «Пассажиравтотранс») 40% и 60% соответственно. При этом на основании динамики за 2005–2014 гг. данный показатель колебался и составлял 50% на 50% – частного и государственного секторов.

В 2022 году ГУП «Пассажиравтотранс» планирует запустить крупный инвестиционный проект, вложив 3,4–4,5 млрд рублей в специализированный автопарк для электробусов в Красногвардейском районе [5]. Рядом с площадкой расположена подстанция ФСК ЕЭС, которая может обеспечить около 40 МВт для ночной зарядки электробусов. Кроме этого, комплекс находится относительно недалеко от КАД, что позволит запустить электробусы на маршруты не только Красногвардейского района, но и на север города: утром это не займет больше 15–20 минут. Автопарк будет рассчитан на 420 единиц техники, а в ближайшей перспективе у ГУП «Пассажиравтотранс» есть намерение закупить дополнительно 50 электробусов [5].

Глава агентства «Infoline-Аналитика» Михаил Бурмистров напоминает, что в 2019 году, когда город купил первые электробусы, не потребовалось создавать специальную инфраструктуру за счет увеличенного запаса хода машин и возможности ночной зарядки [5].

Однако на данный момент назрела необходимость в открытии нового автобусного парка.

Появление нового автопарка повлияет на появление новых маршрутов и поскольку любые изменения маршрута затрагивают все соседние – следует пересматривать и их – как коммерческие, так и городские, т. е. появляется необходимость решения задачи перераспределения существующей маршрутной сети.

Обзор литературы по теме исследования показал, что одно из направлений решения состоит в совершенствовании организации регулярных перевозок на основе рационального дублирования маршрутов [6]. Организация рационального дублирования маршрутов регулярных перевозок сводится к поиску оптимального сочетания регулярных маршрутов городского транспорта.

Для достижения оптимальных параметров были разработаны методики, позволяющие перераспределять маршрутные сети. Одна из таких методик перераспределения маршрутной сети перевозок приведена в статье Н. М. Грязнова [7]. Согласно предложенному автором алгоритму можно увеличить маршрутную скорость движения автобусов, что позволит обеспечить заданный интервал движения меньшим количеством автобусов в период загрузки улично-дорожной сети и исключить необходимость увеличения их числа на линии.

Так же существует метод группировки, по которому проводится градация маршрутов на группы [4].

I группа – маршруты, которые стали рентабельными;

II группа – маршруты, которые стали нерентабельными;

III группа – маршруты, которые остались нерентабельными, но сократили отрицательное значение рентабельности;

IV группа – маршруты, которые ухудшили показатель рентабельности;

V группа – те, что сохранили положительное значение рентабельности.

В этом случае рентабельность основной деятельности) [8, с. 81] определяется по формуле 1:

$$R_M = \frac{ПР}{З_M} 100 \% \quad (1)$$

где ПР – прибыль (убыток) на маршруте; $З_M$ – расходы на осуществление перевозки пассажиров.

Принцип конкурсного распределения маршрутной сети города имеет широкую практику применения во многих городах России (в частности, в Санкт-Петербурге), как и модель комбинированного портфеля, в состав которого входят рентабельные и нерентабельные маршруты [4].

Существует ряд готовых решений – программ, которые используются как инструмент в задачах перераспределения маршрутной сети. Например, программа, предлагаемая М.Е. Корягиным, предназначена для расчета матрицы корреспонденций по данным натурного обследования пассажиропотока и визуализации маршрутной сети, включающей: представление любого набора маршрутов на карте города, составление новых маршрутов городского пассажирского транспорта по остановочным пунктам. Она обеспечивает выполнение следующих функций [9]:

- расчет матрицы корреспонденций по данным натурного обследования пассажиропотока;
- сравнение маршрутных схем в рамках существующих правил перевозок пассажиров;
- обоснование корректировки маршрутов;
- синхронизация маршрутов;
- сокращение количества маршрутов при текущих условиях перевозок;
- оптимизация единой маршрутной сети общественного транспорта;
- оптимизация маршрутной сети за счёт перераспределения маршрутов между перевозчиками.

К сожалению, подобные программы имеют узкое применение, поэтому в данной статье предлагается применить современные концепции моделирования, чтобы разработать метод перераспределения маршрутной сети. Следует отметить, что математическое моделирование является популярным инструментом для решения задач оптимизации маршрутной сети для автомобильного транспорта [10].

Как известно, математическое моделирование – метод исследования процессов путем построения системы математических соотношений, описывающих их. При математическом моделировании используют специальные законы конкретных наук, результаты наблюдений и экспериментов. Результаты математического моделирования дают возможность предвидеть развитие процесса, рассчитать его характеристики, управлять этим процессом, проектировать системы с желательными характеристиками и т. д.

Для получения математической модели (математизации) используют:

1. математическую обработку эмпирических и экспериментальных данных (для выявления взаимосвязи выходного значения системы от входного);
2. моделирование (попытка теоретического воспроизведения некоторого интересующего объекта-оригинала в форме другого объекта – математической модели);
3. относительно полную математическую теорию (данного уровня организации материи в данной или рассматриваемой предметной области).

В данной статье рассматривается именно попытка теоретического воспроизведения интересующего объекта (перераспределенной маршрутной сети) – оригинала в форме другого объекта – математической модели на базе концепций machinelearning (машинного обучения) и digitaltwin (цифрового двойника).

Согласно проведенному исследованию по проблемам загруженности транспортных сетей перед нами возникает цель в виде поиска новых методов перераспределения маршрутной сети и их последующего внедрения в нынешнюю транспортную систему. Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать и рассмотреть известные методы, а также выявить наиболее перспективный способ для достижения поставленной задачи.

МЕТОДЫ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАРШРУТНОЙ СЕТИ

Существует несколько методик перераспределения маршрутной сети, например, расчет матрицы корреспонденций. В данном методе исследуем данные пассажиропотока и визуализируем на маршрутной сети: выявляем необходимое количество остановочных пунктов [9]. Для этого сравниваются маршрутные схемы, оптимизируются, рассчитываются матрицы корреспонденций по данным натурного обследования пассажиропотока. Минус этой программы заключается в том, что она содержит устаревшие методы концепции, которые будут уступать современным технологиям.

Метод динамического программирования включает в себя корректировку на основе анализа данных, добавляя или изменяя маршруты. Для этого выявляются такие параметры, как: прямолинейность поездок,

количество пересадок, время поездки т.д. Недостаток данного метода состоит в том, что для городов с населением свыше 1 млн, появляется неточность из-за большой размерности и неточности исходных данных. Необходимо сочетать компьютерные технологии с экспертными оценками.

Применение имитационного моделирования «цифровой двойник» главная задача – отображение статистики работы: наполняемость подвижного состава, количество пассажиров на автобусных остановках, моделирование транспортного пути, диаграммы распределения пассажиров. Все данные записываются в файл, который можно будет проанализировать и выявить недостатки данной маршрутной сети. Данная система позволит выявить источники потенциальных рисков, анализировать процесс эксплуатации транспорта, оптимизировать маршрутную сеть. Технология обеспечивает высокую эффективность и точность оценки технического состояния. Недостаток данного метода – дороговизна.

Согласно проведенному исследованию по известным методам перераспределения маршрутной сети, наиболее перспективным является принцип машинного обучения и концепции «цифрового двойника», особенности которого более подробно будут рассмотрены ниже.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И КОНЦЕПЦИИ «ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК»

Все модели machinelearning делятся на контролируемые и неконтролируемые. Если модель является контролируемой, она затем подразделяется на регрессионную или классификационную модель. Мы рассмотрим, что означают эти термины, и соответствующие модели, которые попадают в каждую категорию ниже.

Контролируемое обучение включает в себя изучение функции, которая сопоставляет входные данные с выходными на основе примеров пар вход-выход [12].

В контролируемом обучении есть две подкатегории: регрессия и классификация.

В регрессионных моделях вывод непрерывен. Ниже приведены некоторые из наиболее распространенных типов регрессионных моделей.

Идея линейной регрессии (Рис. 1) состоит в том, чтобы просто найти линию, которая лучше всего соответствует данным. Расширения линейной регрессии включают множественную линейную регрессию (например, поиск плоскости наилучшего соответствия) и полиномиальную регрессию (например, поиск кривой наилучшего соответствия).

Модель «дерево решений», как разновидность упомянутой ранее графовой модели – это популярная модель, используемая в исследованиях операций, стратегическом планировании и машинном обучении. Каждый квадрат (Рис. 2) называется узлом, и чем больше у вас узлов, тем точнее будет ваше дерево решений (как правило). Узлы дерева решений, где

принимается решение, называются листьями дерева. Дерево решений интуитивно понятно и просто в построении, но не обладает достаточной точностью.

Модель «случайный лес» – это метод ансамблевого обучения, основанный на деревьях решений.

Случайные леса включают создание нескольких деревьев решений с использованием само настраиваемых наборов исходных данных и случайный выбор подмножества переменных на каждом шаге дерева решений (Рис. 3).

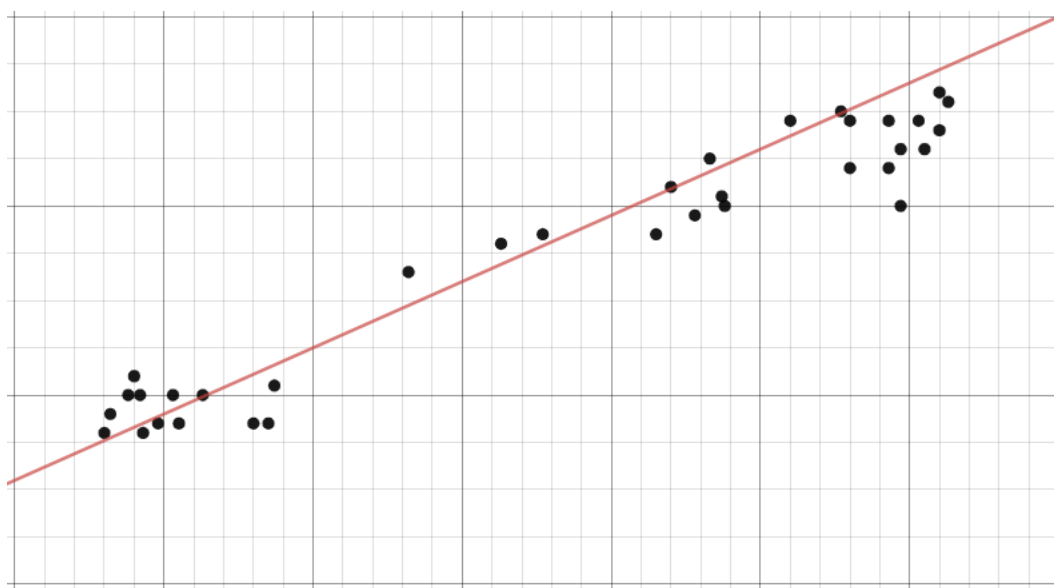


Рис. 1. Пример линейной регрессии

Затем модель выбирает режим всех прогнозов каждого дерева решений.

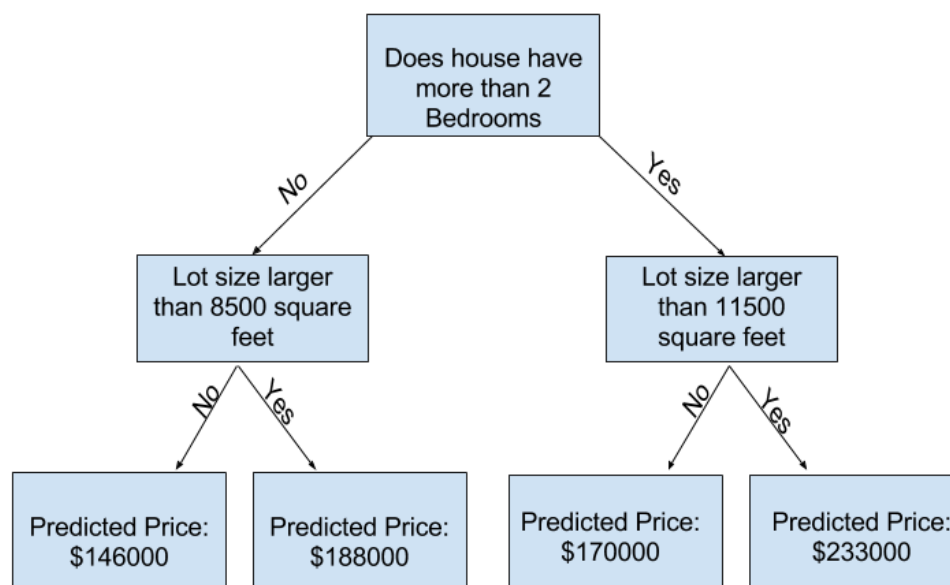


Рис. 2. Пример модели «дерево решений»

Опираясь на модель «большинство выигрывает», он снижает риск ошибки в отдельном дереве.

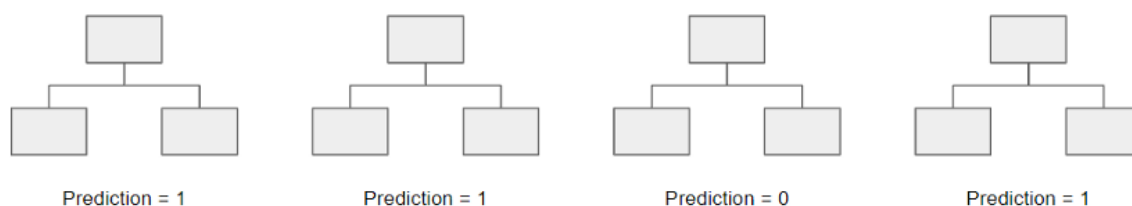


Рис. 3. Пример модели «случайный лес»

Например, если мы создали бы только одно дерево решений, как показано на Рис. 3, то ответ был бы 0. Но, если бы мы полагались на режим всех четырех деревьев решений, предсказанное значение было бы 1.

Нейронная сеть (Рис. 4) – это, по сути, сеть математических уравнений. Он принимает одну или несколько входных переменных и, просматривая сеть уравнений, дает одну или несколько выходных переменных. Вы также можете сказать, что нейронная сеть принимает вектор входных данных и возвращает вектор выходных данных, но в этой статье я не буду углубляться в матрицы.

Синие кружки представляют входной слой, черные кружки представляют скрытые слои, а зеленые кружки представляют выходной слой. Каждый узел в скрытых слоях представляет как линейную функцию, так и функцию активации, которую проходят узлы в предыдущем слое, что, в итоге, приводит к выходу в зеленых кружках.

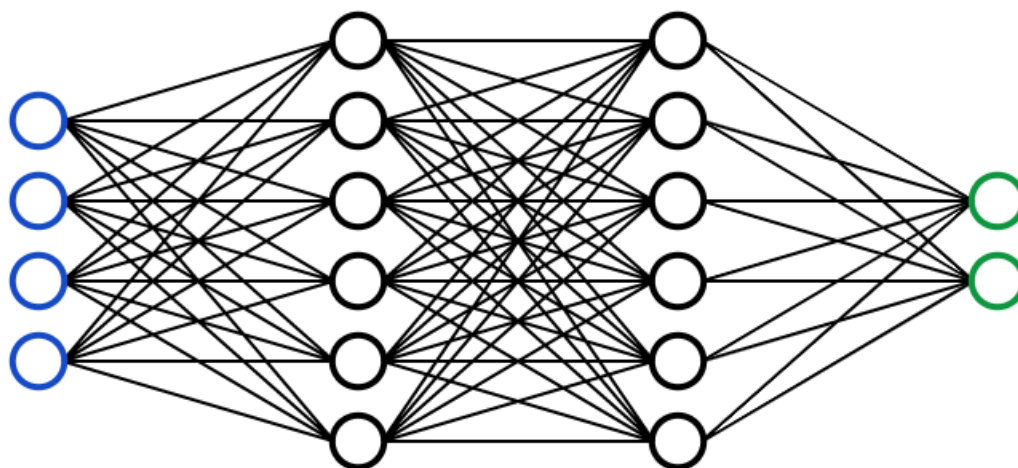


Рис. 4. Нейронная сеть

Существует и ряд других моделей машинного обучения, но, отметим, что нейронные сети на данный момент являются наиболее перспективными [13]. Цифровые двойники формируют условия для оптимизации цифровой связи между ресурсами, услугами, техническими и природными системами, а

также организационными структурами для повышения адаптивности и эффективности бизнес-операций.

Хотя концепция цифрового двойника существует с 2002 года, только благодаря так называемому «интернету вещей» / Internet of Things (IoT) ее внедрение стало рентабельным.

Проще говоря, цифровой двойник – это виртуальная модель процесса, продукта или услуги. Такое сочетание виртуального и физического миров позволяет анализировать данные и контролировать системы, чтобы предотвратить проблемы еще до того, как они возникнут, предотвратить простои, разработать новые возможности и даже спланировать будущее с помощью моделирования.

Томас Кайзер, старший вице-президент SAP по IoT, сказал об этом так: «Цифровые двойники становятся императивом бизнеса, охватывая весь жизненный цикл актива или процесса и формируя основу для подключенных продуктов и услуг. Компании, которые не знакомы с концепцией цифрового двойника, будут отставать» [14].

Цифровой двойник – это своеобразный мост между физическим и цифровым миром. Во-первых, интеллектуальные компоненты, которые используют датчики для сбора данных о статусе, рабочем состоянии или положении в реальном времени, интегрируются с физическим элементом. Компоненты подключены к облачной системе, которая получает и обрабатывает все данные, которые отслеживают датчики. Эти входные данные сравниваются с бизнес-данными и другими контекстными данными.

В виртуальной среде открываются возможности, которые можно применить в физическом мире – в итоге для преобразования бизнес-процесса.

Цифровые двойники являются вдохновителями инноваций и повышения производительности. По информации IDC, в 2018 году компании, инвестирующие в технологию цифровых двойников, получили 30-процентное сокращение времени цикла критических процессов.

В ближайшие годы цифровые двойники будут представлены в самых разных областях и не только бизнес-процессов. Они откроют новые возможности для сотрудничества между экспертами по продуктам физического мира и специалистами по обработке данных, задача которых – понять, что данные говорят об операциях.

Технология цифровых двойников помогает компаниям улучшить качество обслуживания клиентов за счет лучшего понимания потребностей клиентов, разработки усовершенствований существующих продуктов, операций и услуг.

В условиях растущей конкуренции, масштабных технологических изменений, а также внедрения принципов цифровой экономики задача трансформации транспортных компаний становится вопросом выживания в новых условиях. По словам Президента «Сименс» в России Дитриха Мёллера, сегодня внедрение передовых цифровых технологий – это непереносимое условие для полноценного и эффективного развития любого

предприятия [15]. Действительно, «цифровые двойники» являются вдохновителями инноваций и повышения производительности. По информации IDC, в 2018 году компании, инвестирующие в технологию цифровых двойников, получили тридцатипроцентное сокращение времени цикла критических процессов [16].

Применительно к задаче перераспределения маршрутной сети обслуживаемой СПб ГУП «Пассажиравтотранс» при открытии нового автобусного парка применение метода основанного на концепции «машинного обучения» и «цифрового двойника» позволит повысить прозрачность и эффективность планирования развития маршрутной сети пассажирского транспорта. А также:

- снизить расходы из регионального бюджета, направленные на оплату транспортной работы перевозчиков;
- автоматизировать деятельность по маршрутно-транспортному планированию;
- обеспечить контроль выполнения государственных контрактов в части осуществления перевозок и проводить оценку качества транспортной работы по множеству параметров;
- обеспечивать управление нарушениями и инцидентами в рамках исполнения перевозчиками государственных контрактов на перевозку;
- предоставить информацию для населения и надзорных органов о перевозках и существующей маршрутно-транспортной сети в автоматизированном виде (умные остановки, существующие информационные сервисы, мобильные приложения);
- осуществлять в автоматическом режиме расчет стоимости, выполняемых работ и штрафов, за нарушение государственных контрактов;
- формировать в автоматическом режиме отчеты в соответствии с действующими нормативными правовыми актами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Загруженность транспортных сетей является актуальной проблемой современных городов и требует оптимизации и поиска новых решений. В данной статье рассмотрены основные методы перераспределения маршрутной сети, существующие на текущий момент. Проведя анализ каждого из них, концепция «цифрового двойника» была выявлена, как наиболее эффективная, и рекомендована к внедрению при открытии нового автобусного парка СПб ГУП «Пассажиравтотранс». Для подтверждения сделанного заключения о перспективности данной концепции будут проведены дальнейшие практические работы с последующим внедрением метода в новый автобусный парк.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. СПб ГУП «Пассажиравтотранс». [St. Petersburg State Unitary Enterprise "Passagiravtotrans" [Internet] (In Russ.)]. Ссылка активна на 10.08.2021. Доступно по: <https://www.avtobus.spb.ru/about/>
2. Интернет – сайт «Питертранспорт». [The website of "Petertransport" [Internet] (In Russ.)]. Ссылка активна на 10.08.2021. Доступно по: <https://pitertransport.com/2020/>
3. Официальный сайт администрации Санкт-Петербурга. [Official website of the administration of St. Petersburg [Internet] (In Russ.)]. Ссылка активна на 9.08.2021. Доступно по: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/news/215277/
4. Шлиппе Н.И., Оганесян Т.С. Анализ условий формирования и развития рынка пассажирских перевозок городским автобусным транспортом // Вестник Московского университета. – Серия 6. – Экономика. – 2017. – № 1. – С. 86–100. [Shlippe NI, Oganessian TS. Analysis of the conditions for the formation and development of the passenger transportation market by urban bus transport. *Bulletin of Moscow University Series 6 Economics*. 2017;(1):86-100 [Internet] (In Russ.)]. doi: 10.38050/01300105201715
5. Батарея «Пассажиравтотранса» // Российская газета. Спецвыпуск «Коммерсантъ С-Петербург». – 29.05.2020. – №94 – С.8 [Battery "Pasazhiravtotrans". *Russian newspaper. Special issue "Kommersant St. Petersburg"*. 2020 May 29(94). (In Russ.)]. Ссылка активна: 10.08.2021. Доступно по: <https://www.kommersant.ru/doc/4358556>
6. Гудков В.А., Миротин Л.Б. Технология, организация и управление пассажирскими автоперевозками. – М.: Транспорт, 1997. – 254 с. [Gudkov VA, Mirotin LB. *Technology, organization and management of passenger road transport*. Moscow: Transport, 1997. 254 p. (In Russ.)]. doi: 10.1016/b978-0-08-022449-7.50015-6
7. Грязнов М.В., Давыдов К.А. Методика организации регулярных перевозок пассажиров в городах с градообразующими предприятиями. [Gryaznov MV, Davydov KA. *Methods of organizing regular passenger transportation in cities with city-forming enterprises* [Internet] (In Russ.)]. doi: 10.20858/sjsutst.2020.108.10
8. Ефимова М.Р. Статистические методы в управлении производством. – М.: ИНФРА-М, 2002. – 81 с. [Efimova MR. *Statistical methods in production management*. Moscow: INFRA-M; 2002. 81 p. (In Russ.)]. doi: 10.3403/30265649u
9. Корягин М.Е., Декина А.И. Программный комплекс для расчета матрицы корреспонденций по данным натурного обследования пассажиропотока с визуализацией маршрутной сети. [Koryagin ME, Deikina AI. *Software package for calculating the correspondence matrix based on the data of a full-scale survey of passenger traffic with visualization of the route network* [Internet] (In Russ.)]. Ссылка активна на 10.08.2021. Доступно по: https://elibrary.ru/download/elibrary_44762899_52855965.PDF
10. Васильев А.Г. Повышение эффективности управления пригородными и междугородными перевозками на базе АСУ. Дисс.... на соискание уч. ст. канд. техн. наук. Защищена 22.06.2012. [Vasiliev AG. *Improving the efficiency of suburban and intercity transportation management on the basis of automated control systems. Diss.... for the competition of the uch. art. candidate of technical sciences*. Protected on 22.06.2012. (In Russ.)].

11. Сай В.М., Сизый С.В. О моделировании взаимодействия автомобильного, авиационного (малая авиация) и железнодорожного транспорта в области пассажирских перевозок // Вестник УрГУПС. – 2012. – № 3. – С. 31–39. [Sai VM, Sizy SV. On modeling the interaction of automobile, aviation (small aviation) and railway transport in the field of passenger transportation. *Vestnik USUPS*. 2012;3:31-39. (In Russ.)].
12. Stuart J. Russell, Peter Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach (2010), Prentice Hall. doi: 10.1017/s0269888900007724
13. Галушкина А.И. Нейроматематика: учеб. пособие для вузов. – М.: ИПРЖР. – 2002. – Кн. 6. – 448 с. [Galushkin AI. *Neuromathematics: studies handbook for universities*. Moscow: IPRZHR; 2002. Book 6. 448 p. (In Russ.)]. doi: 10.1109/rnns.1992.268514
14. What Is Digital Twin Technology - And Why Is It So Important? [Internet]. [cited 2017 March 6]. Available from: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twin-technology-and-why-is-it-so-important/?sh=b6dbead2e2a7> doi: 10.31988/scitrends.4717
15. Многие российские предприятия вполне достигли цифровой зрелости // Российская газета. Спецвыпуск «Коммерсантъ С-Петербург». – № 115 от 06.07.2021. [Many Russian enterprises have fully reached digital maturity. *Rossiyskaya Gazeta. Special issue "Kommersant St. Petersburg"*. 2021 July 06 (115) (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.08.2021. Доступно по: <https://www.kommersant.ru/doc/4879620>
16. IDC FutureScape: Worldwide IoT 2018 Predictions [cited 2017 October]. Available from: <https://www.idc.com/research/viewtoc.jsp?containerId=US43161517>

Сведения об авторах:

Боева Полина Александровна, магистр;

eLibrary SPIN: 2397-6056; ORCID: 0000-0002-8180-9631;

E-mail: boeva.polina2703@yandex.ru

Богданов Михаил Валентинович, доцент, кандидат педагогических наук;

eLibrary SPIN: 2969-1685; ORCID: 0000-0001-6068-7244;

E-mail: bogdanov78@list.ru

Information about the authors:

Polina A. Boeva, master's student;

eLibrary SPIN: 2397-6056; ORCID: 0000-0002-8180-9631;

E-mail: boeva.polina2703@yandex.ru

Michael V. Bogdanov, associate professor, candidate of pedagogical sciences;

eLibrary SPIN: 2969-1685; ORCID: 0000-0001-6068-7244;

E-mail: bogdanov78@list.ru

Цитировать:

Боева П.А., Богданов М.В. Метод перераспределения маршрутной сети обслуживаемой СПб ГУП «Пассажиравтотранс» при открытии нового автобусного парка // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 16–27. doi: 10.17816/transsyst20228116-27

To cite this article:

Boeva PA, Bogdanov MV. Method of redistribution of route network served by SPb GUP "Passazhiravtotrans" due to launch of new bus park. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(1):16-27. doi: 10.17816/transsyst20228116-27

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электрофизика, электрофизические установки

УДК [UDK] 629.439:621.313.282:621.318.1/.3

DOI 10.17816/transsyst20228128-37

© В.М. Амосков¹, Д.Н. Арсланова¹, А.А. Белов¹, В.Н. Васильев¹,
В.В. Деомидов¹, А.А. Зайцев², М.В. Капаркова¹, В.П. Кухтин¹,
А.Н. Лабусов¹, Е.А. Ламзин¹, М.С. Ларионов¹, А.Н. Неженцев¹,
Д.А. Овсянников⁴, Д.А. Овсянников (мл.)^{3,1}, И.Ю. Родин¹,
С.Е. Сычевский^{4,1}, А.А. Фирсов¹, Т.А. Фирсова¹, Н.А. Шатиль¹

¹ АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова»

² Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

³ Санкт-Петербургский Государственный Университет промышленных технологий и дизайна

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет
(Санкт-Петербург, Россия)

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОДВЕСА ДЛЯ БОЛЬШИХ ВЕЛИЧИН ЛЕВИТАЦИОННЫХ ЗАЗОРОВ

Цель: Измерение подъемной силы ГЭМ левитационного подвеса и сопоставление с результатами вычислительного эксперимента.

Материалы и методы: Измерения проводились на испытательной установке АО ИНЦ «ТЭМП» при больших величинах левитационного зазора (13 мм, 17 мм).

Результаты: Результаты измерений и расчетов совпали с приемлемой точностью.

Заключение: В АО «НИИЭФА» изготовлен и испытан полномасштабный прототип гибридного электромагнита подвеса МЛТС. На основании выполненных работ будут подготовлены рекомендации по методике и программе измерений, организации процедуры выходного контроля серийных гибридных магнитов.

Ключевые слова: магнитная левитация, постоянные магниты, гибридные электромагниты, измерения сил, математическое моделирование сил, физический макет, прототип серийного магнита.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrophysics, electrophysical installations

© V.M. Amoskov¹, D.N. Arslanova¹, A.A. Belov¹, V.N. Vasiliev¹,
V.V. Deomidov¹, A.A. Zaytzev², M.V. Kaparkova¹, V.P. Kukhtin¹,
A.N. Labusov¹, E.A. Lamzin¹, M.S. Larionov¹, A.N. Nezhentzev¹,
D.A. Ovsyannikov⁴, D.A. Ovsyannikov (Jr)^{3,1}, I.Yu. Rodin¹,
S.E. Sytchevsky^{4,1}, A.A. Firsov¹, T.A. Firsova¹, N.A. Shatil¹

¹ Joint Stock Company “NII-EFA”² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University³ St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design⁴ St. Petersburg State University

(St. Petersburg, Russia)

VERIFICATION OF NUMERICAL MODEL OF HYBRID EMS USING TEST BENCH MEASUREMENTS AT LARGE AIR GAP

Aim: The study was focused on measurement of the lifting force of a hybrid EMS (HEMS) prototype. The measured data were used to verify numerical models.

Materials and Methods: Measurements were performed on a certified test bench at a large air gap (13 mm, 17 mm). The measured data were compared with results of numerical experiments.

Results: A comparison of measured and simulated parameters have proved reliability of numerical models.

Conclusions: A prototype of HEMS for maglev transport has been built and bench tested at JSC “NII-EFA”. The results obtained will be used to establish measurement, prototyping, and inspection procedures for series production.

Key words: maglev, permanent magnet, hybrid EMS, levitation force measurement, numerical simulation, test bench, prototype.

ВВЕДЕНИЕ

Для систем активного магнитного подвеса [1] в АО «НИИЭФА» разработаны прототипы серийных гибридных электромагнитов (ГЭМ) [2]. В магнитную цепь этих магнитов в качестве источников поля одновременно включены токовые катушки и высококоэрцитивные постоянные магниты. В ряде работ (см. например, [3–9]) указано, что такие магниты обладают определенными преимуществами перед электромагнитами традиционного исполнения. Их существенным достоинством является, в частности, пониженное энергопотребление.

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА В АО «НИИЭФА»

В АО «НИИЭФА» предложены варианты исполнения ГЭМ [2], защищенные патентами РФ [10, 11].

На Рис. 1, заимствованном из [2], схематически показан возможный вариант применения ГЭМ в реализуемой на практике технологии магнитолевитационных транспортных систем (МЛТС).

Предложенная конструкция обеспечивает практически полное отсутствие магнитных полей рассеяния вне замкнутой магнитной цепи, что обеспечивает высокие экологические характеристики системы и ее электромагнитную совместимость.

Разработанная российская вычислительная технология, которая базируется на зарегистрированном в РОСПАТЕНТе российском комплексе вычислительных программ КОМРОТ [12], позволяет создавать детальные вычислительные модели магнитов любых требуемых грузоподъемности и габаритов, выполнять оптимизацию их конструкции [13, 14].

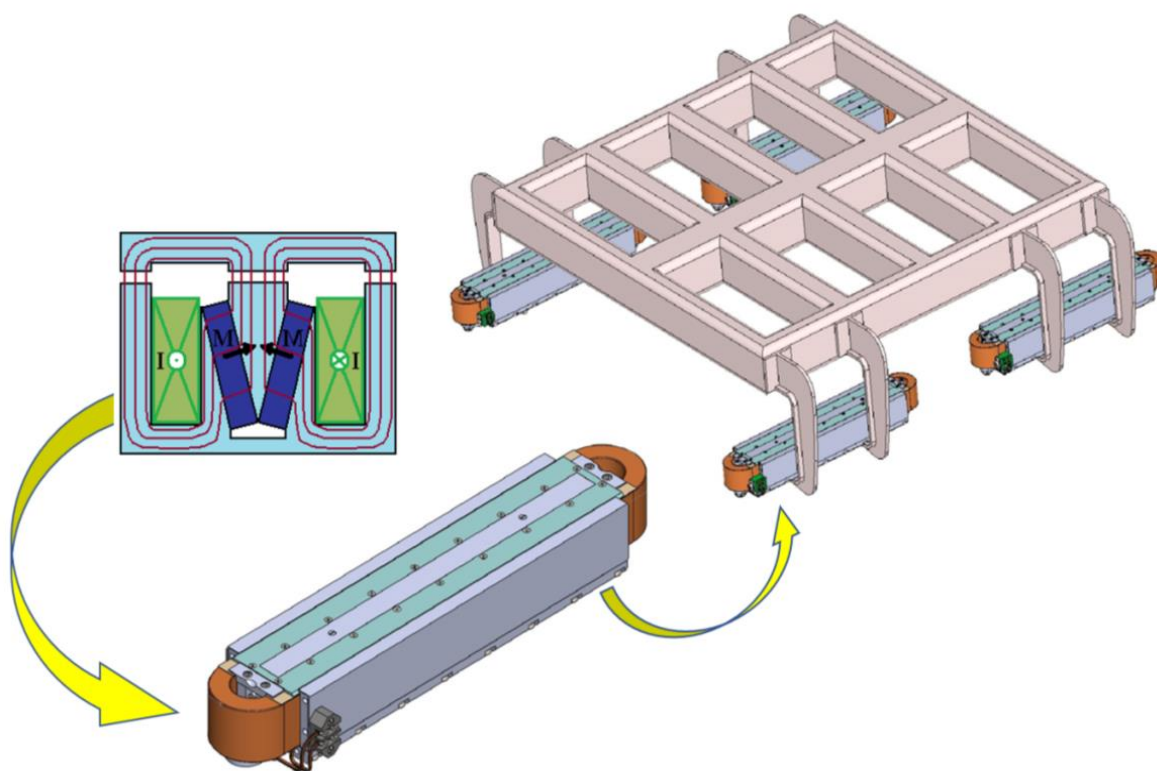


Рис. 1. Вариант российской МЛТС с ЭМП [2]

В подвесе используются ГЭМ; в состав ГЭМ входят: стальной магнитопровод, токовая катушка и постоянные Nd-Fe-B магниты; слева показано сечение ГЭМ, в котором буквой М помечены постоянные магниты, буквой I обозначена токовая катушка, выделены стальной магнитопровод ГЭМ и над ним стальная направляющая, закрепляемая на путевой структуре, показаны линии магнитного поля в магнитопроводе и воздушном левитационном зазоре

В АО «НИИЭФА» разработан прототип серийного гибридного электромагнита. Основные технические параметры изготовленного магнита приведены в Табл. 1 [2].

Таблица 1. Параметры гибридного электромагнита АО «НИИЭФА»

Сечение токовой катушки, мм ²	1450
Коэффициент заполнения проводника медью	0,8
Максимальная рассеиваемая мощность, Вт	240
Проводник марки ПЭЭИП2-155, мм ²	1,12х3,55 (1,28х3,71 в изол.)
Количество витков проводника в катушке	306
Максимальный ток (стационарный), А	10
Максимальный ток (кратковременный), А	15
Индуктивность (при зазоре 5 мм), мГн	150 (I=13 А) и 300 (I=0 А)
Индуктивность (при зазоре ∞), мГн	180 (I=0 А)
Собственная индуктивность катушки, мГн	25
Сопротивление обмотки, Ом	2
Марка постоянных Nd-Fe-B магнитов	N48SH
Размеры Д×Ш×В, мм	650×130×89
Вес, Н	450

В работе [2] подробно описаны результаты измерения силовых характеристик магнита на специализированном сертифицированном стенде АО «НИИЭФА».

Измерения пространственных распределений электромагнитных сил и магнитных полей сопоставлены с данными численного моделирования. Получено совпадение результатов с требуемой на практике точностью, что подтверждает достоверность численного моделирования и позволяет в дальнейшем перейти к созданию электронных моделей подвесов.

Прототип продемонстрировал характерное для ГЭМ пониженное энергопотребление и подтвердил правильность предложенной авторами схемы магнитной системы, отличающейся низким уровнем полей рассеяния.

Полученные данные позволят в дальнейшем выполнить необходимую модернизацию стенда, технологической и измерительной оснастки, а также методик и программ измерений для организации выходного контроля серийных образцов ГЭМ.

ИЗМЕРЕНИЯ ГЭМ НА ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ АО ИНЦ «ТЭМП» И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Для подтверждения достоверности вычислительной модели параметры магнита также были измерены на испытательной установке АО ИНЦ «ТЭМП». Силовые характеристики измерялись при больших величинах левитационного зазора (13 мм, 17 мм).

Стендовая установка И142 предназначена для измерения подъемных сил электромагнитов. Гибридный электромагнит был установлен на горизонтальную балку измерительной установки, см. Рис. 2. Стальная плита, имитирующая путевую структуру, устанавливалась над рабочей поверхностью полюсов ГЭМ с помощью прокладок, толщина которых подбиралась таким образом, чтобы обеспечить необходимые величины зазора между полюсами ГЭМ и плитой.



Рис. 2. Гибридный электромагнит на испытательной установке АО ИНЦ «ТЭМП»

На Рис. 3 приведены результаты сопоставления измеренных и рассчитанных электромагнитных сил.

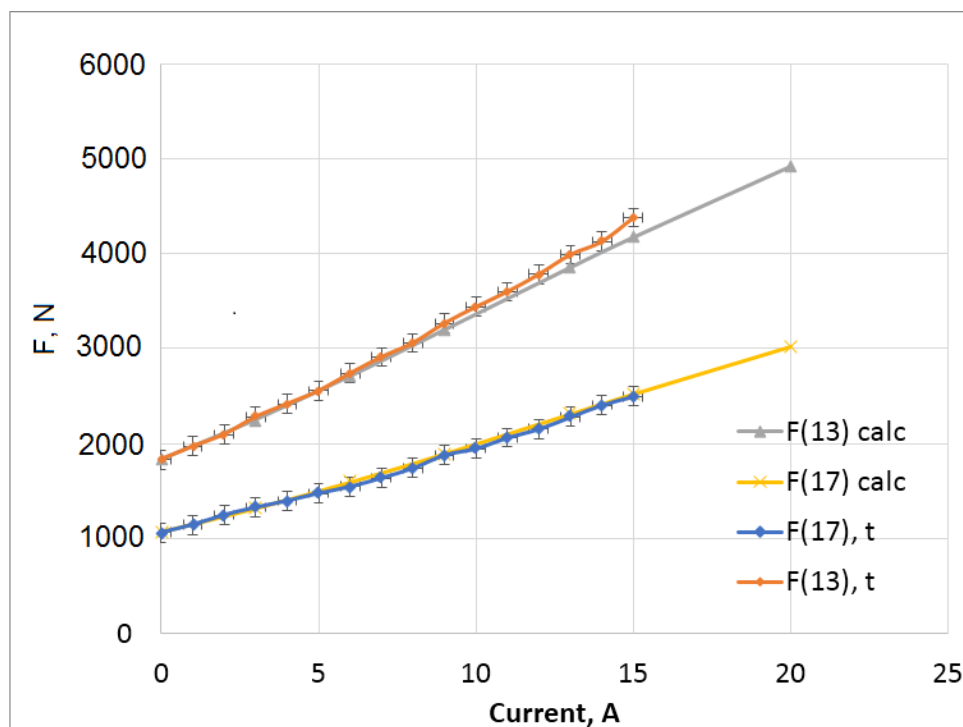


Рис. 3. Результаты сравнения расчетных данных с обработанными результатами измерений

Как и в работе [2] следует отметить влияние прогиба стальной плиты, имитирующей путевую структуру. Для зазора 13 мм при увеличении величины рабочего тока выше 6–7 А наблюдается отклонение результатов измерений силы от расчетных значений в сторону их увеличения. Это объясняется нарастающим прогибом стальной плиты (уменьшающимся зазором) при увеличении подеромоторной силы свыше 3000 Н. Величина прогиба на максимальном токе достигала величины в 1 мм.

ВЫВОДЫ

В АО «НИИЭФА» разработан и изготовлен полномасштабный прототип серийного образца гибридного электромагнита подвеса МЛТС. Прототип исследован при широкой вариации величины магнитолевитационного зазора.

Измерения электромагнитных сил, создаваемых ГЭМ, проведены на сертифицированном специализированном стенде АО «НИИЭФА» для сравнительно малых величин зазоров. Измерения сил для больших величин зазоров проведены на любезно предоставленной испытательной установке АО «ИНЦ «ТЕМП».

В обоих случаях получено совпадение результатов натурного и численного моделирования с требуемой на практике точностью.

На основании выполненных работ будут подготовлены рекомендации по модернизации стенда АО «НИИЭФА», измерительной и технологической оснастки, методике и программе измерений, организации процедуры выходного контроля серийных гибридных магнитов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке Фонда Академика Василия Андреевича Глухих.

Авторы признательны В.П. Занину, А.Т. Горелову и А.А. Голенко за организацию измерений левитационной силы макета гибридного электромагнита на испытательной установке в АО ИНЦ «ТЭМП».

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчет, применение. – СПб: Политехника, 2003. – 206 с. [Zhuravljov JuN. Aktivnye

- magnitnye podshipniki. Teoriya, raschyot, primeneniye. St. Petersburg: Politehnika, 2003. 206 p. (In Russ.)). Ссылка активна на: 27.10.2021. Доступно по: https://www.studmed.ru/zhuravlev-yun-aktivnye-magnitnye-podshipniki-teoriya-raschet-primeneniye-2003_ae0c7437419.html
2. Акулицкий С.Г., Амосков В.М., Арсланова Д.Н. и др. Результаты стендовых испытаний прототипа полномасштабного гибридного электромагнита для систем маглев // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 4. – С. 14–32. [Akulitzky SG, Amoskov VM, Arslanova DN, et al. Bench testing of hybrid EMS prototype. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(4):14-32]. doi: 10.17816/transsyst20217414-32
 3. Tzeng YK, Wang TC. Optimal design of the electromagnetic levitation with permanent and electro magnets. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1994;30(6):4731-733. doi: 10.1109/20.334204
 4. Onuki T, Toda Y. Optimal Design of Hybrid Magnet in Maglev System with Both Permanent and Electro Magnets. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1993;29(2):1783-1786. doi: 10.1109/20.250751
 5. Kim C-H, Cho H-W, Lee J-M, et al. Zero-power control of magnetic levitation vehicles with permanent magnets. *ICCAS 2010: Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems*; 2010 Oct 27-30; Gyeonggi-do, Korea (South). 2010. p. 732-735. doi: 10.1109/ICCAS.2010.5670118
 6. Safaei F, Suratgar AA, Afshar A, et al. Characteristics Optimization of the Maglev Train Hybrid Suspension System Using Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015;30(3):1163-1170. doi: 10.1109/tec.2014.2388155
 7. Erkan K, Okur B, Koseki T, et al. Experimental evaluation of zero-power levitation control by transfer function approach for a 4-pole hybrid electromagnet. In: *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics*; 2011 April 13-15; Istanbul, Turkey. 2011. p. 23-28, doi: 10.1109/ICMECH.2011.5971299
 8. Morishita M, Azukizawa T, Kanda S, et al. A new MAGLEV system for magnetically levitated carrier system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1989;38(4):230-236. doi: 10.1109/25.45486
 9. Wang TC, Tzeng YK. A new electromagnetic levitation system for rapid transit and high speed transportation. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1994;30(6):4734-4736. doi: 10.1109/20.334205
 10. Патент РФ на изобретение № RU2739939/ 30.12.2020. Бюл. № 1. Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Белов А.В., Васильев В.Н., Кухтин В.П., Капаркова М.В., Ламзин Е.А., Ларионов М.С., Неженцев А.Н., Родин И.Ю., Сычевский С.Е., Фирсов А.А., Шатиль Н.А. «Гибридный электромагнит для системы маглев». [Pat. RUS № RU2739939/ 30.12.2020. Byul. № 1. Amoskov V.M., Arslanova D.N., Belov A.V., et al. “Gibridnyj jelektromagnit dlya sistemy maglev”. (In Russ.)). Ссылка активна на: 27.10.2021. Доступно по: <https://patenton.ru/patent/RU2739939C1>
 11. Патент РФ на изобретение № RU2743753/ 25.02.2021. Бюл. № 6. Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Белов А.В., Васильев В.Н., Кухтин В.П., Капаркова М.В., Ламзин Е.А., Ларионов М.С., Неженцев А.Н., Родин И.Ю., Сычевский С.Е., Фирсов А.А., Шатиль Н.А. «Гибридный магнит без полей рассеяния для системы маглев». [Pat. RUS № RU2743753/25.02.2021. Byul. № 6. Amoskov V.M., Arslanova D.N., Belov A.V., et al. “Gibridnyj magnit bez poley rassejaniya dlya sistemy maglev”. (In Russ.)). Ссылка активна на: 27.10.2021. Доступно по: <https://patenton.ru/patent/RU2743753C1>
 12. Amoskov VM, Belov AV, Belyakov VA, et al. Computation technology based on

KOMPOT and KLONDIKE codes for magnetostatic simulations in tokamaks. *Plasma Devices and Operations*. 2008;16(2):89-103. doi: 10.1080/10519990802018023

13. Amoskov VM, Arslanova DN, Bazarov AM, et al. Modeling EMS maglev systems to develop control algorithms. *Cybernetics and physics*. 2018;7(1):11-17. doi: 10.35470/2226-4116-2018-7-1-11-17
14. Andreev EN, Arslanova DN, Akhmetzyanova EV, et al. Combined electromagnetic suspensions with reduced energy consumption for levitation vehicles. *Technical Physics*. 2019;64(7):1060-1065. doi: 10.1134/S1063784219070041

Сведения об авторах:

Амосков Виктор Михайлович, к.ф.-м.н.;

eLibrary SPIN: 2436-3828; ORCID: 0000-0001-9781-9116; Scopus ID: 6701846033;

E-mail: amoskov-sci@yandex.ru

Арсланова Дарья Николаевна, магистр;

eLibrary SPIN: 3234-8141; ORCID: 0000-0002-3791-723X; Scopus ID: 55314279800;

E-mail: arslanova-sci@yandex.ru

Белов Андрей Александрович, магистр;

eLibrary SPIN: 6291-0480; ORCID: 0000-0001-7040-6741;

E-mail: andrewthewhite@mail.ru

Васильев Вячеслав Николаевич;

eLibrary SPIN: 5444-8639; ORCID: 0000-0002-1218-6274; Scopus ID: 7005989574;

E-mail: vvnmm@mail.ru

Деомидов Валерий Викторович, магистр;

eLibrary SPIN: 5931-9704; ORCID: 0000-0003-2795-8342;

E-mail: deomidov@icloud.com

Зайцев Анатолий Александрович, д.э.н.;

eLibrary SPIN: 9477-4316; ORCID: 0000-0002-1342-8036; Scopus ID: 57199509604;

E-mail: noscpp@pgups.ru

Капаркова Марина Викторовна;

eLibrary SPIN: 6881-2266; ORCID: 0000-0002-3489-5581; Scopus ID: 12445243900;

E-mail: kaparkova-sci@yandex.ru

Кухтин Владимир Петрович, к.ф.-м.н.;

eLibrary SPIN: 1628-3135; ORCID: 0000-0001-6925-6141; Scopus ID: 35353250700;

E-mail: kukhtin-sci@yandex.ru

Лабусов Алексей Николаевич, к.ф.-м.н.;

eLibrary SPIN: 4734-7358; ORCID: 0000-0003-2264-677X;

E-mail: labusov@sintez.niiefa.spb.su

Ламзин Евгений Анатольевич, д.ф.-м.н.;

eLibrary SPIN: 8287-7879; ORCID: 0000-0002-6072-5711; Scopus ID: 12756829300;

E-mail: lamzin-sci@yandex.ru

Ларионов Михаил Сергеевич;

eLibrary SPIN: 1631-3598; ORCID: 0000-0002-8570-7210; Scopus ID: 36443801800;

E-mail: larionov-sci@yandex.ru

Неженцев Андрей Николаевич;

eLibrary SPIN: 7319-8924; ORCID: 0000-0002-8724-7211; Scopus ID: 57201374326;

E-mail: nezhentzev-sci@yandex.ru

Овсянников Дмитрий Александрович, д.ф.-м.н., профессор

eLibrary SPIN: 7762-9740; ORCID: 0000-0002-0829-2023;

E-mail: d.a.ovsyannikov@spbu.ru

Овсянников Дмитрий Александрович (Мл.), магистр;

eLibrary SPIN: 5657-4707; ORCID: 0000-0003-4191-8494

E-mail: d-ovs@yandex.ru

Родин Игорь Юрьевич, к.т.н.;

eLibrary SPIN: 4935-6473; Scopus ID: 7005063976;

E-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su

Сычевский Сергей Евгеньевич, д.ф.-м.н.;

eLibrary SPIN: 3073-0334; ORCID: 0000-0003-1527-4015; Scopus ID: 6602159085;

E-mail: sytch-sie@yandex.ru

Шатиль Николай Александрович, к.т.н.;

eLibrary SPIN: 2818-0206; ORCID: 0000-0001-8529-130X; Scopus ID: 6507475131;

E-mail: shatiln@yandex.ru

Фирсова Татьяна Александровна;

eLibrary SPIN: 2858-7562; ORCID: 0000-0002-9229-9622

E-mail: firsova@sintez.niiefa.spb.su

Фирсов Алексей Анатольевич;

eLibrary SPIN: 7943-4297; ORCID: 0000-0002-7846-8717; Scopus ID: 56069602000;

E-mail: firsov-sci@yandex.ru

Information about the authors:

Victor M. Amoskov , PhD in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 2436-3828; ORCID: 0000-0001-9781-9116; Scopus ID: 6701846033;

E-mail: amoskov-sci@yandex.ru

Darya N. Arslanova, MSc;

eLibrary SPIN: 3234-8141; ORCID: 0000-0002-3791-723X; Scopus ID: 55314279800;

E-mail: arslanova-sci@yandex.ru

Andrei A. Belov, MSc;

eLibrary SPIN: 6291-0480; ORCID: 0000-0001-7040-6741;

E-mail: andrewthewhite@mail.ru

Valery V. Deomidov, MSc;

eLibrary SPIN: 5931-9704; ORCID: 0000-0003-2795-8342 ;

E-mail: deomidov@icloud.com

Vyacheslav N. Vasiliev, MSc;

eLibrary SPIN: 5444-8639; ORCID: 0000-0002-1218-6274; Scopus ID: 7005989574;

E-mail: vvnm@mail.ru

Anatoly A. Zaytzev, PhD, DSc in Economics;

eLibrary SPIN: 9477-4316 ORCID: 0000-0002-1342-8036; Scopus ID: 57199509604;

E-mail: nocpp@pgups.ru

Marina V. Kaparkova, MSc;

eLibrary SPIN: 6881-2266; ORCID: 0000-0002-3489-5581; Scopus ID: 12445243900;

E-mail: kaparkova-sci@yandex.ru

Vladimir P. Kukhtin, PhD in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 1628-3135; ORCID: 0000-0001-6925-6141; Scopus ID: 35353250700;

E-mail: kukhtin-sci@yandex.ru

Alexey N. Labusov, PhD in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 4734-7358; ORCID: 0000-0003-2264-677X;

E-mail: labusov@sintez.niiefa.spb.su

Evgeny A. Lamzin, PhD, DSc in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 8287-7879; ORCID: 0000-0002-6072-5711; Scopus ID: 12756829300;

E-mail: lamzin-sci@yandex.ru

Mikhail S. Larionov, MSc;

eLibrary SPIN: 1631-3598; ORCID: 0000-0002-8570-7210; Scopus ID: 36443801800;

E-mail: larionov-sci@yandex.ru

Andrey N. Nezhentzev, MSc;

eLibrary SPIN: 7319-8924; ORCID: 0000-0002-8724-7211; Scopus ID: 57201374326;

E-mail: nezhentzev-sci@yandex.ru

Dmitry A. Ovsyannikov, DSc in Physics and Mathematics, Full Professor;

eLibrary SPIN: 7762-9740; ORCID: 0000-0002-0829-2023;

E-mail: d.a.ovsyannikov@spbu.ru

Dmitry A. Ovsyannikov (Jr), MSc;

eLibrary SPIN: 5657-4707; ORCID: 0000-0003-4191-8494

E-mail: d-ovs@yandex.ru

Igor Yu. Rodin, PhD in Engineering;

eLibrary SPIN: 4935-6473; Scopus ID: 7005063976;

E-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su

Nicolai A. Shatil, MSc, PhD in Engineering;

eLibrary SPIN: 2818-0206; ORCID: 0000-0001-8529-130X; Scopus ID: 6507475131;

E-mail: shatiln@yandex.ru

Sergey E. Sytchevsky, DSc in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 3073-0334; ORCID: 0000-0003-1527-4015; Scopus ID: 6602159085;

E-mail: sytch-sie@yandex.ru

Tatiana A. Firsova;

eLibrary SPIN: 2858-7562; ORCID: 0000-0002-9229-9622

E-mail: firsova@sintez.niiefa.spb.su

Alexey A. Firsov, MSc;

eLibrary SPIN: 7943-4297; ORCID: 0000-0002-7846-8717; Scopus ID: 56069602000;

E-mail: firsov-sci@yandex.ru

Цитировать:

Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Белов А.В. и др. Натурные испытания и верификация математической модели гибридного электромагнита подвеса для больших величин левитационных зазоров // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 28–37. doi: 10.17816/transsyst20228128-37

To cite this article:

Amoskov VM, Arslanova DN, Belov AV, et al. Verification of numerical model of hybrid ems using test bench measurements at large air gap. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(1):28-37. doi: 10.17816/transsyst20228128-37

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 656.078

DOI 10.17816/transsyst20228138-49

© В.В. Ющенко¹, В.Е. Храпов²

¹ Исследователь

(Мурманск, Россия)

² Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (Апатиты, Россия)

МОДЕЛЬ СОПРЯЖЕНИЯ КОНТЕЙНЕРА И ФИТИНГОВОЙ ПЛАТФОРМЫ

Обоснование: Исследования в направлении создания новых технологий погрузки и выгрузки сыпучих грузов вызваны спросом со стороны рынка на снижение расходов на контейнерные перевозки.

Цель: Формирование оригинальной технологии выгрузки сыпучих грузов, перевозимых в контейнерах, на примере железнодорожного транспорта

Методы: Для достижения поставленной цели были использованы теоретические методы научного исследования: анализ, синтез и моделирование.

Результаты: Предложена оригинальная модель сопряжения контейнера и фитинговой платформы для железнодорожного транспорта. Дается определение понятия «сопряжения контейнера и платформы». Показаны внешний вид сопряжения и устройства контейнера и поясняются этапы выгрузки груза.

Заключение: Практическая значимость состоит в том, что предложенная модель повышает конкурентоспособность железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: модель сопряжения, снижение стоимости, сопряжение контейнера и фитинговой платформы, развитие эффективности транспортной системы, железнодорожный транспорт, моделирование грузовых перевозок, новая технология.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrical complexes and systems

© V.V. Yushchenko¹, V.E. Khrapov²

¹ Researcher

(Murmansk, Russia).

² Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” (Apatity, Russia)

CONTAINER AND FITTING PLATFORM DESIGN MODEL

Background: Research in the direction of creating new technologies for loading and unloading bulk cargo is caused by market demand to reduce the cost of container transportation.

Aim: Formation of an original technology for unloading bulk cargo transported in containers, on the example of railway transport.

Methods: Theoretical methods of scientific research were used to achieve the goal: analysis, synthesis and modeling.

Results: An original model of design a container and a fitting platform for railway transport is offered. The appearance of the design and the device of the container are shown, and the stages of unloading the cargo are explained.

Conclusion: The practical significance is in the fact that the proposed model increases the competitiveness of railway transport.

Key words: design model, cost reduction, design of a container and a platform, development of the efficiency of the transport system, rail transport, modeling of freight traffic, new technology.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие отечественной, межгосударственной и мировой систем производства и потребления требует от грузового транспорта организации перевозок, когда торговые и транспортные связи изменяются по направлениям и объемам.

Мировая глобализация влияет на экономику каждой страны, открывает возможности рыночным агентам использовать различные виды транспорта, конкурирующие между собой. И особая роль в этом процессе принадлежит железнодорожному транспорту, который круглосуточно и круглогодично перевозит грузы получателям, независимо от климатических условий или геологических особенностей.

Конкуренция между различными видами подвижного состава на железнодорожном транспорте направлена на предоставление рынку новых моделей перевозок, формируемых в вагонах и контейнерах, имеющих технологические преимущества, которые обеспечивают снижение стоимости перевозки грузов. Одной из таких новых и перспективных моделей является модель сопряжения контейнера и фитинговой платформы.

ЭВОЛЮЦИОННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК ГРУЗОВ ПО ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Прототипом железных дорог были конные пути для перевозки тяжелых грузов. Первоначально колейные дороги появились на перевозках камня, в угольных шахтах и рудниках. Первые упоминания о них

относятся к середине XVI в. Первые рельсы представляли собой деревянные брусья – лежни. По такому колейному пути лошадь могла везти груз в 4 раза больший, чем по обыкновенной грунтовой дороге. Однако деревянные лежни быстро изнашивались, повозки сходили с пути. Чтобы уменьшить износ деревянных лежней, их стали укреплять железными или чугунными полосами.

В 1763 году К.Д. Фролов построил на Колываново-Воскресенских заводах лежневый путь с желобчатыми чугунными полосами, по которому перевозили руду в вагонах, приводимых в движение от гидросиловой установки – вагонетках [1].

Одна из первых чугунных дорог протяженностью 174 м была построена на Александровском артиллерийском заводе в Петрозаводске (Онежский завод) в 1788 г. под руководством А.С. Ярцева. Ширина колеи была около 0,8 м, рельс – уголковым. Движение по этому пути было в 12 раз легче, чем по обыкновенным грунтовым дорогам [1].

В 1806-1809 гг. П.К. Фролов построил на Змеиногорском руднике Колывано-Воскресенских заводов на Алтае первую в мире железную дорогу длиной 1,8 км для перевозки руды со всеми ее основными элементами [1].

В Соединенных Штатах, первым обосновал идею строительства железной дороги в 1812 году полковник Джон Стивенс, в сборнике работ под названием «Документы, доказывающие превосходящие преимущества железных дорог и паровых вагонов перед судоходством по каналам» [2].

Первым регулярным перевозчиком пассажиров и грузов была железная дорога Балтимора и Огайо, построенная 28 февраля 1827 года. Перевозки начались в 1830 году на 14-мильном участке пути между Балтимором и Элликоттом, штат Мэриленд [3].

Открытие первой в России железной дороги на участке Санкт-Петербург – Царское Село, состоялось 11 ноября 1837 года, эта дата считается днем создания Российских железных дорог [4].

Началась эра конкуренции моделей грузовых железнодорожных перевозок, которая переносила внимание с вопроса: «Что возить?» на «Как возить?».

Промышленный подъем обусловил ускоренное развитие отечественного вагоностроения. Совершенствовалась конструкция, увеличивалась грузоподъемность двухосных грузовых вагонов. Получили применение новые разновидности вагонов грузового парка.

Как одна из первых и новых моделей перевозок в России проектируется и производится в 1901 г. цистерна-платформа, имеющая квадратный котел, над которым установлена платформа для обратной загрузки (инженера Бранта) [5].

Другим типом модели перевозок являлась созданная в 1901 г. конструкция вагона-цистерны, предназначенная для перевозки спирта.

Цилиндрический котел объемом $15,5 \text{ м}^3$ со своими опорами размещали внутри кузова нормального крытого вагона, что предотвращало интенсивный нагрев груза солнечными лучами. Цистерну заполняли через колпак, выступающий над крышей кузова и защищенный специальной надстройкой, которая запиралась крышкой. Разгружали цистерну при помощи насоса также через колпак. Тара такого вагона составляла 9,5–10,5 т. Отличительным признаком этого вагона была белая полоса с надписью «Спиртовый» [6].

Важно подчеркнуть, что выбору целесообразных значений основных параметров грузовых вагонов, принимаемых при их проектировании, предшествовали теоретические разработки и исследования. При этом конструкторы стремились уменьшить тару вагона, приходящуюся на единицу его грузоподъемности (коэффициент тары), иметь объем кузова, позволяющий в наибольшей степени использовать грузоподъемность вагона (характеризуется рациональным удельным объемом, т. е. отношением объема кузова вагона к его грузоподъемности).

В дальнейшем, рост объемов грузовых перевозок обусловил не только количественное увеличение вагонного парка, но и его совершенствование, прежде всего за счет повышения грузоподъемности вагонов – важного средства увеличения массы (веса) поездов, роста провозной способности железных дорог.

КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ, КАК СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Контейнеризация – это способ перевозки грузов путем погрузки в крупногабаритные контейнеры, разработанный в XX веке. В начале века использовались автомобильно-железнодорожные контейнеры, герметичные ящики стандартных размеров; но только в 1960-х годах контейнеризация стала основным элементом морских перевозок, что стало возможным благодаря новым судам, специально предназначенным для перевозки контейнеров. Большие и быстрые контейнеровозы перевозят контейнеры, как над палубой, так и под ней; грузы легко загружаются и выгружаются, что делает возможным более частые рейсы и минимальные потери времени в порту. Портовые сооружения для быстрой обработки контейнеров сложны и дороги, обычно оправданы только при наличии большого потока грузов в обоих направлениях. Контейнер может покинуть завод на грузовике и быть перегруженным в железнодорожный вагон, далее на судно; такие перевозки неконтейнерного груза существенно увеличили бы стоимость [7].

Новые разработки при контейнерных перевозках грузов патентуются во всем мире, в том числе российскими учёными и исследователями.

Известен способ загрузки и разгрузки контейнеров, перевозимых железнодорожными платформами. Техническим результатом изобретения является получение технологии мультимодальной перевозки штучных грузов на экспорт в 40-футовых контейнерах международного стандарта со складов предприятий, не имеющих оборудование для перегрузки груженых контейнеров. Затаривают 40-футовые контейнеры международного стандарта непосредственно на четырехосных платформах для крупнотоннажных контейнеров, состоящих в сцепке железнодорожного состава однотипных платформ с такими же контейнерами [8].

Известен способ установки контейнеров для перевозки железнодорожным транспортом. Изобретение относится к перевозке контейнеров железнодорожным транспортом. На платформе для перевозки контейнеров размещают нижние контейнеры, устанавливают штыковые упоры в верхние фитинги нижних контейнеров, закрепляют нижние контейнеры посредством стяжек на платформе и размещают на штыковых упорах верхние контейнеры [9].

Известен способ выгрузки сыпучего груза из гибкого контейнера. Изобретение относится к разгрузке груженых гибких контейнеров, используемых для перевозки сыпучих грузов в железнодорожных полувагонах. Для выгрузки сыпучего груза используют гибкий контейнер, выполненный в виде вкладыша, размещенного в полувагоне. Способ выгрузки включает удаление скопившихся осадков с верха вкладыша, срезание верха вкладыша, раскрытие разгрузочных люков в нижней части полувагона, разрезание дна вкладыша через проемы разгрузочных люков и гравитационное высыпание сыпучего груза в зарельсовое пространство в приемный бункер [10].

Во всем мире активно выводят на рынок новые продукты и услуги, основой которого являются новые идеи и модели, оформленные патентами. В 2020 г. общемировые темпы заявительской активности вновь начали расти после первого за прошедшее десятилетие спада в 2019 г., который был во многом вызван снижением числа заявок в Китае. В 2020 г. Национальное управление интеллектуальной собственностью Китая сообщило о вновь наметившемся росте заявительского интереса, результатом которого стали 1,5 млн. патентных заявок. Это в 1,5 раза больше, чем число заявок, полученных патентным ведомством Соединенных Штатов Америки, второй страны в списке лидеров (ВПТЗ США; 597 172). За США следовали Япония (ЯПВ; 288 472), Республика Корея (КРО; 226 759) и Европейское патентное ведомство (ЕПВ; 180 346). В итоге на эти пять ведомств приходилось 85,1% общемирового объема заявок [11].

В 2020 г. среди десяти ведущих ведомств лишь в трех был зафиксирован рост числа заявок – речь идет о Китае (+6,9 %), Индии

(+5,9 %) и Республике Корея (+3,6 %), тогда как в Германии (–7,9 %) и Японии (–6,3 %) аналогичный показатель заметно снизился. В десятку ведущих ведомств также вошли Германия (62 105), Индия (56 771), Российская Федерация (34 984), Канада (34 565) и Австралия (29 294) [11].

Система PATENTSCOPE (Всемирной организации интеллектуальной собственности) позволяет производить поиск в 101 млн. патентных документов, включая 4,3 млн. опубликованных международных заявок на патент (РСТ), и более 2500 международных заявок по теме железнодорожных контейнеров на английском языке [12].

Мы живем в мире, где решения принимаются на основе актуальной информации, и новые модели помогают планировать будущее.

МОДЕЛЬ СОПРЯЖЕНИЯ

Контейнерные перевозки позволяют выполнять доставку товаров от отправителя к получателю без перегрузки, тем самым значительно сократив объём промежуточных погрузочно-разгрузочных работ.

В настоящее время производится перевозка отдельных насыпных грузов в универсальных 20 футовых контейнерах, с загрузкой в лайнер-беги. И такая технология требует снятия контейнера с фитинговой платформы при выгрузке.

Для целей данного исследования, принимаем, что к насыпным грузам относятся сахар, соль, мелкий гравий, а к навалочным – зерновые (пшеница, рожь) и незерновые (уголь, руда). При этом навалочные грузы – это отдельная группа насыпных.

Для выгрузки насыпных грузов из грузового контейнера (далее – контейнера) без крановых операций или привлечения вилочного погрузчика или иных устройств или механизмов по перемещению контейнера к месту выгрузки, предлагается внести изменения в конструкцию контейнера – установить люки на крыше для погрузки груза и выгрузочные люки вдоль боковых стен контейнера. Кроме того, предусмотреть конструкцию фитингового упора платформы с возможностью откидывания и фиксирования в рабочем положении (перед погрузкой контейнера) перпендикулярно длинной стороне платформы. Кроме того, соединить на время выгрузки каждый контейнер и фитинговую платформу (например двумя шарнирными соединениями) таким образом, чтобы выгрузка контейнера (на сторону соединения/сопряжения) осуществлялась под углом к плоскости пола платформы, подъемом за край внешней части пола контейнера по длинной стороне контейнера слева или справа с помощью стационарного или съемного подъемного механизма (например винтового домкрата), установленным между полом платформы и контейнером посередине поднимаемого края контейнера при открытом выгрузочном люке на

противоположной боковой стене контейнера (на стороне соединения/сопряжения).

«Модель сопряжения контейнера и фитинговой платформы» (или модель сопряжения) – это оригинальная и новая конструкция, позволяющая выгружать насыпные и навалочные грузы из грузового контейнера в зарельсовое пространство без снятия выгружаемого контейнера с фитинговой платформы.

Модель сопряжения представлена на Рис. 1.

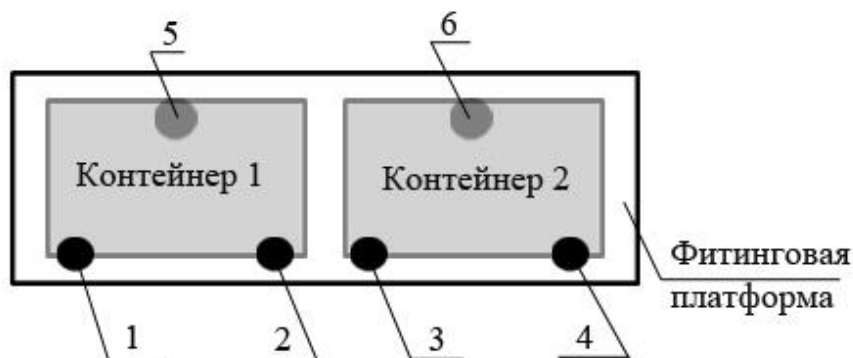


Рис. 1. Макет фитинговой железнодорожной платформы, груженной двумя 20 футовыми контейнерами (вид сверху)

Элементы 1, 2, 3, 4 – места соединения (сопряжения) грузового контейнера и фитинговой платформы, которые позволяют поэтапно выгружать контейнер, могут быть представлены шарнирным соединением фитинга контейнера и фитингового упора платформы, установленным на базе фитингового упора платформы. Элементы 5 и 6 – могут быть представлены подъемным устройством (например, винтовым домкратом). Места установки подъемных устройств и элементов соединения (сопряжения), а также их количество не ограничены данным рисунком.

Этапы выгрузки модели сопряжения представлены на Рис. 2–5 (виды макетов с торца контейнера и платформы).



Рис. 2. Вид модели сопряжения перед выгрузкой (этап выгрузки № 1)

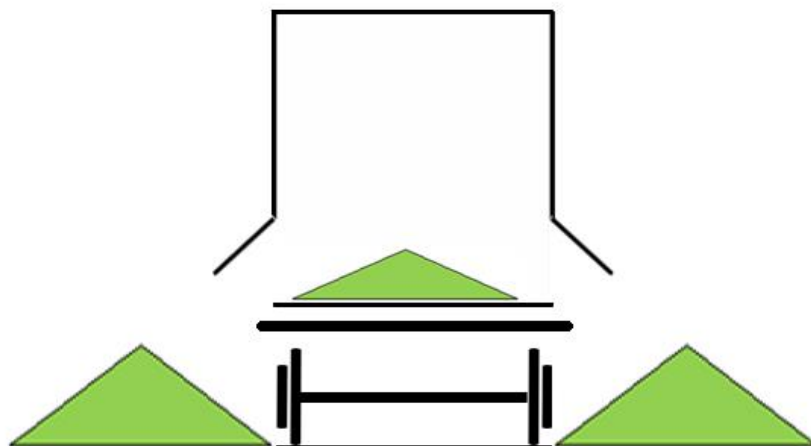


Рис. 3. Вид модели сопряжения после выгрузки груза через боковые выгрузочные люки контейнера (этап выгрузки № 2)

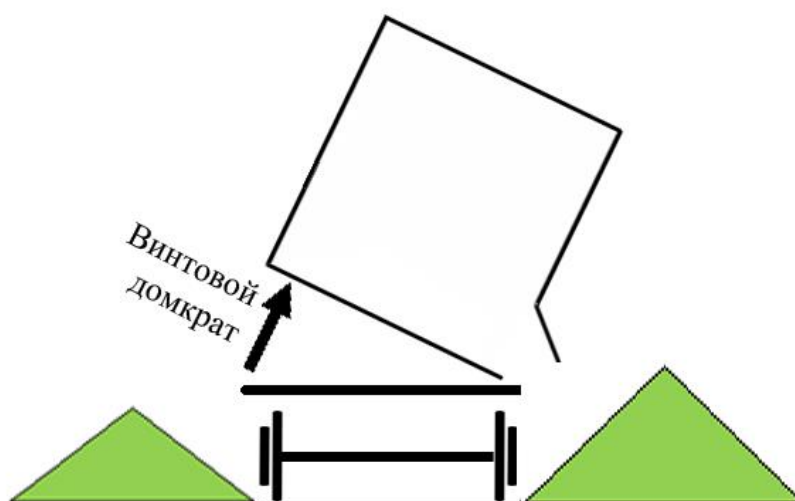


Рис. 4. Вид модели сопряжения при подъеме нижней части пола контейнера под углом для полной выгрузки груза (этап выгрузки № 3)

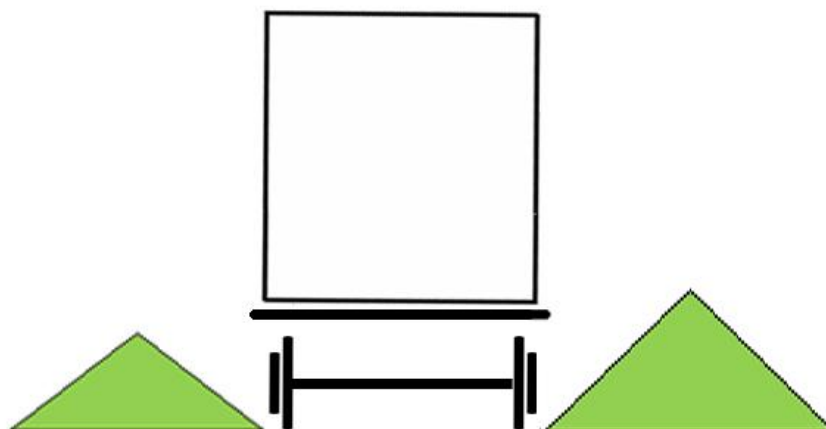


Рис. 5. Вид модели сопряжения после выгрузки (этап № 4)

После подачи контейнера под выгрузку, основная часть насыпного груза высыпается равномерно через боковые люки контейнера, показано на Рис. 3. Остаток груза выгружается подъемом пола контейнера под углом к плоскости пола платформы, подъемом за край внешней части пола контейнера по длинной стороне контейнера слева с помощью подъемного механизма, показано на Рис 4. Кроме того предлагаются варианты расположения боковых выгрузочных люков контейнера на время выгрузки: свободное расположение в открытом положении (Рис. 4) или с фиксированием люков в открытом положении к боковой стене контейнера.

Для исключения опрокидывания контейнера при выгрузке, при необходимости, следует предусмотреть конструкцию упоров к раме платформы в необходимом количестве.

Преимущества представленной модели сопряжения:

1. снижение стоимости перевозки груза на величину конечных операций при выгрузке контейнера (крановые операции погрузки-выгрузки, затраты на автотранспорт).
2. увеличение скорости выгрузки.
3. попеременная перевозка тарно-штучных и насыпных грузов в одном контейнере.
4. снижение порожних пробегов подвижного состава;
5. предоставление контейнеров для экспортных грузов в периоды нехватки вагонов, например для перевозки зерновых (пшеница, рожь).

Согласно «ГОСТ Р 52202—2004 КОНТЕЙНЕРЫ ГРУЗОВЫЕ. Термины и определения», грузовой контейнер: единица транспортного оборудования. Согласно Федерального закона «О транспортной безопасности» от 09.02.2007 N 16-ФЗ, фитинговая платформа – транспортное средство, устройство, предназначенное для перевозки грузов. И грузовой контейнер, как транспортное оборудование, и фитинговая платформа, как устройство имеют в модели сопряжения внешний вид (дизайн), на каждом этапе выгрузки груза.

Согласно ч. 1 ст. 1259 ГК РФ дизайн «Модели сопряжения контейнера и фитинговой платформы», являясь разновидностью произведения науки, литературы и искусства, относится к объектам авторских прав и охраняется как результат интеллектуальной деятельности на территории Российской Федерации и на территории государств, принявших Бернскую конвенцию по охране литературных и художественных произведений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобализация мировой экономики и торговли превратила контейнерную транспортную систему в транспортную индустрию. Контейнеризация охватила не только генеральные грузы, но и навалочные, насыпные и наливные. Некоторые аналитики обращают внимание на порожний пробег контейнеров, при перевозке грузов [13–14], а также на особенности конкуренции на рынке железнодорожных перевозок на сети ОАО «РЖД» [15]. Контейнерные перевозки стали важной частью глобальных перевозок, и проблема перемещения порожних контейнеров приобретает особое значение [14].

Современные транспортные схемы перевозок невероятно усложнились, стали взаимозависимыми. Для России с ее огромной территорией роль железнодорожной отрасли имеет стратегическое значение для устойчивого экономического роста. От эффективности железнодорожного транспорта зависит эффективность работы других отраслей промышленности, следовательно, и экономическая безопасность страны.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Инновационный дайджест. История развития железнодорожного пути. [Innovacionnyj dajdzhest. Istorija razvitija zheleznodorozhnogo puti. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 05.02.2022. Доступно по: http://www.rzd-expo.ru/history/history_of_railway_track/
2. Stevens J. *Documents tending to prove the superior advantages of rail-ways and steam-carriages over canal navigation* [Internet]. NY: T&J Swords; 1812. [cited 2022 February 5]. Available from: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015076463952&view=1up&seq=1>
3. Baltimore & Ohio railroad [Internet]. [cited 2021 February 12]. Available from: <https://case.edu/ech/articles/b/baltimore-ohio-railroad>
4. Фадеев Г.М., Анисимов П.С., Богданов Г.И. Железные дороги России. История и современность в фотодокументах. – СПб: Петро-Ньюс, 1996. – 285 с. [Fadeev GM, Anisimov PS, Bogdanov GI. *Zheleznye dorogi Rossii. Istoriya i sovremennost v fotodokumentakh*. St. Petersburg: Petro-Nyus, 1996. 285 p. (In Russ.)].
5. Иванов А.И., Хусаинов Р.М., Бахтизина А.Р. Становление железнодорожного транспорта России 1800–1930 годы // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 4. – С. 70–72. [Ivanov AI, Khusainov RM, Bakhtizina AR. *Stanovlenie zheleznodorozhnogo transporta Rossii 1800–1930 gody. Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo sirya*. 2016;4:70-72.

- (In Russ.)). Ссылка активна на 22.02.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29334850>
6. О железных дорогах России и Советского Союза. Грузовые вагоны постройки 1892–1917 г. [O zheleznykh dorogah Rossii i Sovetskogo Soyuza. Gruzovye vagonu postroiki 1892-1917 g. [Internet]. (In Russ.)). Ссылка активна на 06.02.2022. Доступно по: <https://www.1520mm.ru/railcars/wagons-1892-1917.phtml>
 7. Containerization transport [Internet]. [cited 2022 February 12]. Available from: <https://www.britannica.com/technology/containerization>
 8. Патент РФ на изобретение № 2127703/ 20.03.99. Бюл. № 11. Альтшуллер А.А., Глухов Г.А., Лимонов Э.Л., Масловский А.П. Способ загрузки и разгрузки контейнеров, перевозимых железнодорожными платформами. [Pat. RUS № 2014712/ 15.06.94. Byul. № 11. Altshuller AA, Glukhov GA, Limonov EL, Maslovskii AP. Sposob zagruzki i razgruzki konteinerov, perevozimyykh zheleznodorozhnyimi platformami. (In Russ.)). Дата обращения: 12.02.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2127703&TypeFile=html
 9. Патент РФ на изобретение № 2644056/ 07.02.18. Бюл. № 11. Носырев С.В. Способ установки контейнеров для перевозки железнодорожным транспортом. [Pat. RUS № 2644056/ 07.02.18. Byul. № 11. Nosyrev SV. Sposob ustanovki konteinerov dlya perevozki zheleznodorozhnym transportom. (In Russ.)). Дата обращения: 12.02.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2644056&TypeFile=html
 10. Патент РФ на изобретение № 2657798/ 15.06.18. Бюл. № 11. Постовалов Б.В. Способ выгрузки сыпучего груза из гибкого контейнера. [Pat. RUS № 2657798/ 15.06.18. Byul. № 11. Postovalov BV. Sposob vygruzki sypuchego gruzha iz gibkogo konteynera. (In Russ.)). Дата обращения: 12.02.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2657798&TypeFile=html
 11. World Intellectual Property Indicators Report: Worldwide Trademark Filing Soars in 2020 Despite Global Pandemic [Internet]. [cited 2022 February 12]. Available from: https://www.wipo.int/pressroom/ru/articles/2021/article_0011.html#patents
 12. Railway container [Internet]. [cited 2022 February 12]. Available from: https://patentscope.wipo.int/search/en/result.jsf?_vid=P21-KZK133-40887
 13. Miloslavskaya S, Panychev A, Myskina A, et al. Organization of export transportation of goods from Russia to China. 2019. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 698 066065. doi: 10.1088/1757-899X/698/6/066065
 14. Kuzmicz KA, Pesch E. Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation. *Mega-international journal of management science*. 2019;85:194-213. doi: 10.1016/j.omega.2018.06.004
 15. Pittman R, Diaconu O, Sip E, et al. Competition in freight railways: “above-the-rail” operators in central Europe and Russia. *Journal of Competition Law and Economics*. 2017;3(4):673-687. doi:10.1093/joclec/nhm028

Сведения об авторах:

Ющенко Вячеслав Васильевич, исследователь;

eLibrary SPIN: 1212-9307; ORCID: 0000-0002-6982-1910; Scopus ID: 57210914630;

E-mail: v.yushchenko.arctic@gmail.com

Храпов Владимир Евгеньевич, д.э.н., доцент;

eLibrary SPIN: 4562-5595; ORCID: 0000-0002-1982-7724; Scopus ID: 57206731069;

E-mail: Khrapov00@mail.ru

Information about the authors:

Viacheslav V. Yushchenko, researcher;

eLibrary SPIN: 1212-9307; ORCID: 0000-0002-6982-1910; Scopus ID: 57210914630;

E-mail: v.yushchenko.arctic@gmail.com

Vladimir E. Khrapov, Associated Professor, Doctor of Economics;

eLibrary SPIN: 4562-5595; ORCID: 0000-0002-1982-7724; Scopus ID: 57206731069;

E-mail: Khrapov00@mail.ru

Цитировать:

Ющенко В.В., Храпов В.Е. Модель сопряжения контейнера и фитинговой платформы // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 38–49. doi: 10.17816/transsyst20228138-49

To cite this article:

Yushchenko VV, Khrapov VE. Container and fitting platform design model. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(1):38-49. doi: 10.17816/transsyst20228138-49

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.313.333

DOI: 10.17816/transsyst20228150-66

© В.А. Соломин, А.В. Соломин, Л.Л. Замшина, Н.А. Трубицина

Ростовский государственный университет путей сообщения

(Ростов-на-Дону, Россия)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЕВОГО УСИЛИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВРАЩАТЕЛЬНО- ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Обоснование: многообразие современных электроприводов требует создания новых видов электродвигателей с расширенными функциональными возможностями. К таким электрическим машинам относятся и цилиндрические линейные асинхронные двигатели с вращательно-поступательным движением вторичных элементов.

Цель: разработка цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента.

Метод: использование дискретной системы индуктора для реализации вращательно-поступательного движения вторичного элемента, аналитическое решение полевой задачи.

Результат: новая конструкция цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента, соотношение для определения осевого усилия двигателя.

Заключение: предложенная конструкция цилиндрического линейного асинхронного двигателя обладает расширенными функциональными возможностями за счет одновременной реализации вращательно-поступательного перемещения вторичного элемента.

Ключевые слова: цилиндрический линейный асинхронный двигатель, дискретный индуктор, вторичный элемент, вращающееся магнитное поле, бегущее магнитное поле, токовый контур, осевое усилие.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© V.A. Solomin, A.V. Solomin, L.L. Zamshina, N.A. Trubitsina

Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

DETERMINATION OF THE AXIAL FORCE OF A CYLINDRICAL LINEAR INDUCTION MOTOR WITH ROTATIONAL- TRANSLATIONAL MOVEMENT OF THE SECONDARY ELEMENT

Background: the variety of modern electric drives requires the creation of new types of electric motors with enhanced functionality. Cylindrical linear induction motors with rotational-translational movement of secondary elements also belong to such electric machines.

Aim: development of a cylindrical linear induction motor with rotational-translational movement of the secondary element.

Methods: the use of a discrete inductor system for the implementation of the rotational-translational movement of the secondary element, the analytical solution of the field problem.

Results: new design of a cylindrical linear induction motor with rotational-translational movement of the secondary element, the ratio for determining the axial force of the motor.

Conclusion: the proposed design of a cylindrical linear induction motor has extended functionality due to the simultaneous implementation of the rotational-translational movement of the secondary element.

Key words: cylindrical linear induction motor, discrete inductor, secondary element, rotating magnetic field, running magnetic field, current circuit, axial force.

ВВЕДЕНИЕ

Линейные двигатели, перспективны для применения в современном электрическом приводе. Тяговый электропривод для магистрального высокоскоростного магнитолевитационного транспорта содержит линейные электрические машины [1–8]. Ведутся исследования и разработки линейного асинхронного электропривода для городского магнитолевитационного транспорта и метрополитена [9–14]. Электрический привод на базе линейных асинхронных двигателей (ЛАД) применяется в различных машинах и механизмах [15], что позволяет создавать надежные устройства с простыми кинематическими схемами. Значительный вклад в создание и развитие электрических приводов с цилиндрическими линейными асинхронными двигателями (ЦЛАД) внес профессор О.Н. Веселовский [15]. В статье рассматривается ЦЛАД с расширенными функциональными возможностями, который обеспечивает вращательно-поступательное движение вторичного элемента (ВЭ).

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В ряде электроприводов требуется вращательно-поступательное перемещение рабочих органов, которое достигается применением сложных кинематических схем или сочетанием двух электрических машин – вращательной и линейной. Сочетание двух видов движения вращательного и поступательного может быть обеспечено при помощи цилиндрических электромагнитных устройств с трехфазными обмотками. Простейшая

конструкция цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента представлена на Рис. 1. Индуктор ЦЛАД состоит из ряда элементарных сердечников 1, расположенных соосно один за другим. Каждый элементарный сердечник 1 содержит трехфазную обмотку 2. Внутри элементарных сердечников расположен цилиндрический вторичный элемент 3 из электропроводящего материала (Рис. 1).

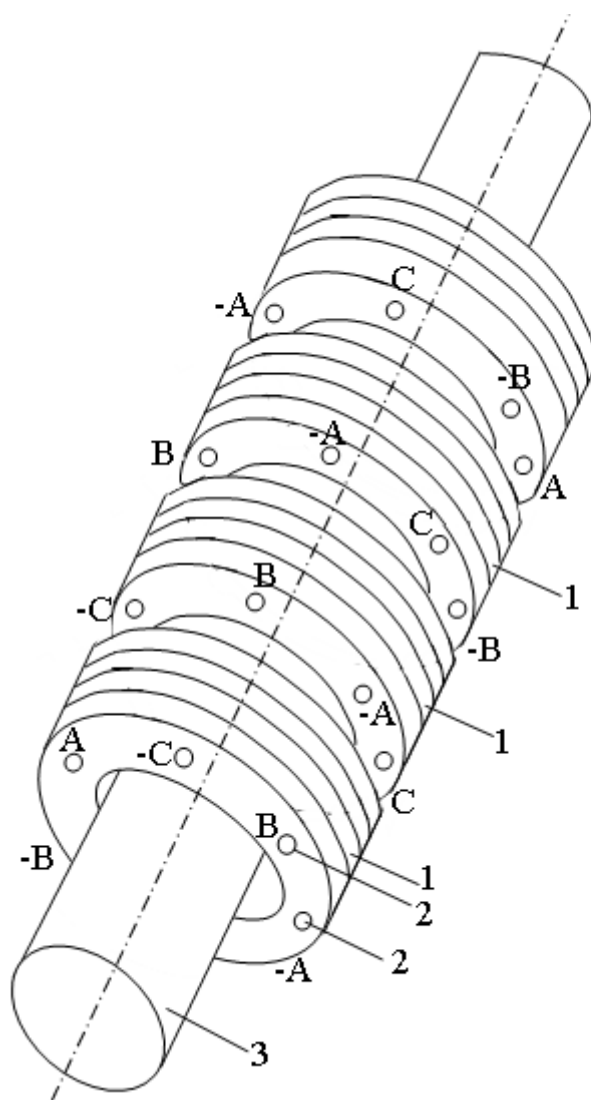


Рис.1. Цилиндрический линейный асинхронный двигатель с вращательно-поступательным перемещением вторичного элемента. 1 – элементарный сердечник индуктора; 2 – трехфазная обмотка; 3 – вторичный элемент

Каждый последующий элементарный сердечник с трехфазной обмоткой повернут вокруг своей оси по отношению к предыдущему на угол, занимаемый одной катушечной группой фазы обмотки сердечника. В этом случае (Рис. 1) вся система элементарных сердечников индуктора ЦЛАД образует в продольном направлении трехфазные обмотки с

прямыми (или обратными) порядками следования фаз: А, -С, В, -А, С, -В, ... ; -С, В, -А, С, -В, А, ... ; В, -А, С, -В, А, -С, ... ; -А, С, -В, А, -С, В, -А, ... ; и так далее. В свою очередь, во внутренней расточке каждого элементарного сердечника 1 его обмотка 2 будет иметь прямой (или обратный) порядок следования фаз. Принцип действия цилиндрического линейного асинхронного двигателя следующий. При подключении обмотки индуктора ЦЛАД к источнику напряжения вся система обмоток индуктора возбуждает бегущие в осевом направлении магнитные поля, одновременно обмотки элементарных сердечников создают вращающиеся магнитные поля. Бегущие и вращающиеся магнитные поля пересекают вторичный элемент и наводят в нем электродвижущие силы, вызывающие протекание вихревых токов.

В результате взаимодействия бегущих магнитных полей с токами, ими индуцированными во вторичном элементе, создаются осевые (продольные) механические усилия, приводящие ВЭ в поступательное перемещение. Одновременно в пределах каждого элементарного сердечника с трехфазной обмоткой возникает механический момент, обусловленный действием вращающегося магнитного поля на токи вторичного элемента, им индуцированными. Под действием суммарного механического момента ВЭ начнет вращаться. Осевые (продольные) усилия будут складываться с вращающим моментом и вторичный элемент будет двигаться по винтовой линии, т.е. ВЭ будет осуществлять вращательно-поступательное перемещение. Для увеличения продольных усилий ЦЛАД все элементарные сердечники объединяются общим ярмом, например, размещают их внутри стальной трубы, играющей одновременно роли ярма и корпуса двигателя.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВРАЩАТЕЛЬНО-ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Рассмотрим ЦЛАД, у которого элементарные сердечники имеют явно выраженные полюсы, на которых расположены катушки сосредоточенной обмотки. Вопросы теории линейных асинхронных двигателей посвящены работы [16-20], в которых рассматриваются различные расчетные модели машин. Для получения расчетной модели двигателя мысленно разрежем все элементарные сердечники по образующим и развернем их на плоскости (Рис. 2). Вторичный элемент 1, имеющий ширину $2s$, также развернут на плоскости. На плоской развертке ЦЛАД (Рис. 2) стрелка 2 показывает направление бегущего, а 3 – вращающегося магнитного поля. На Рис. 2 показана система координат.

Прямоугольные токовые контуры индуктора ЦЛАД соответствуют полюсам с катушками обмотки, по которым протекают синусоидальные токи (Рис. 2).

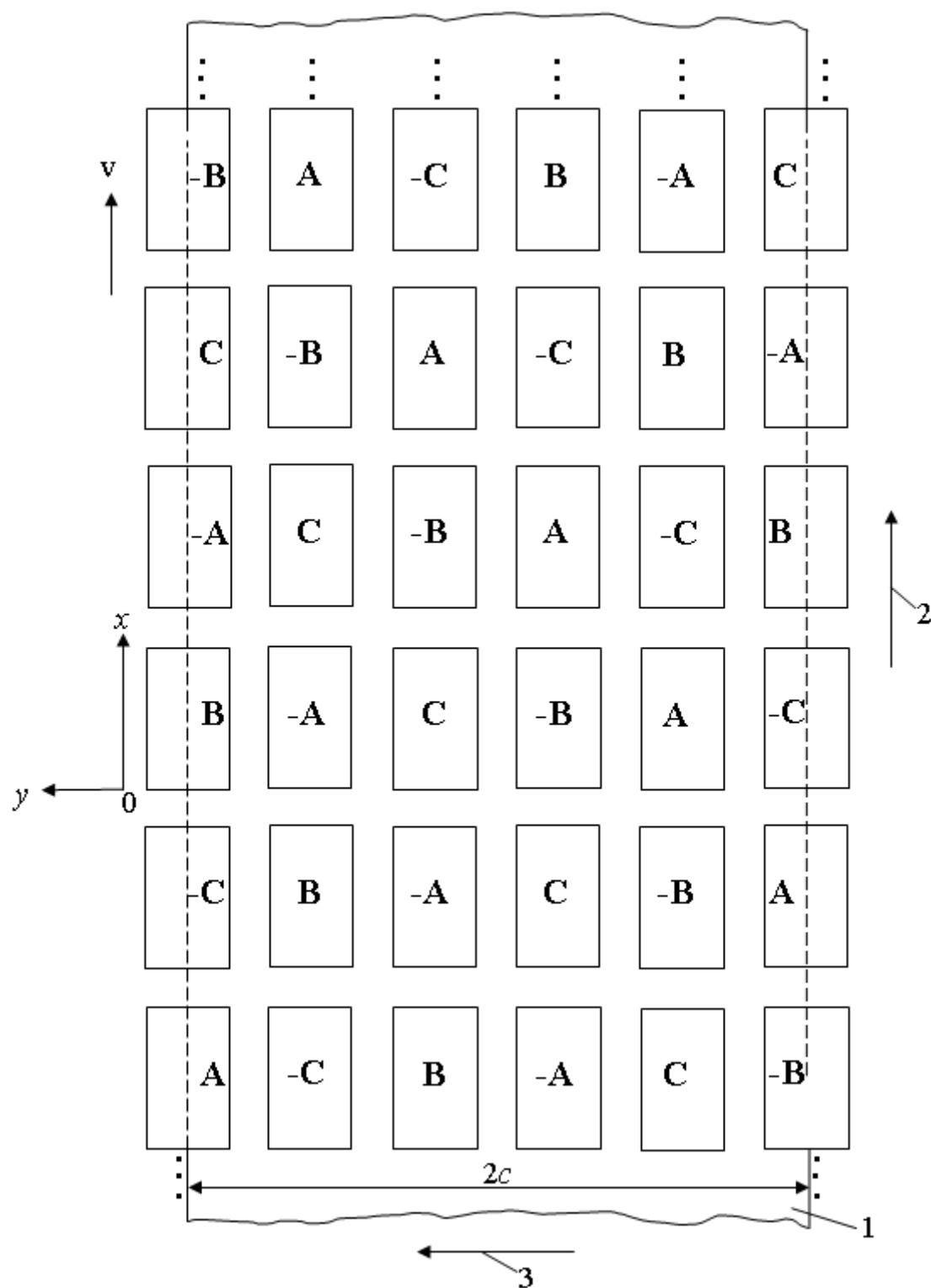


Рис. 2. Развертка на плоскости индуктора цилиндрического линейного асинхронного двигателя

Полагаем, что расчетная модель двигателя содержит бесконечное число токовых контуров (Рис. 3) в продольном и поперечном направлениях. В этом случае не учитываются ограниченные размеры двигателя, как продольный, так и поперечный. Заметим, что поперечный размер ЦЛАД (Рис. 1, 2) и не должен учитываться, поскольку элементарные сердечники двигателя имеют замкнутые магнитные системы.

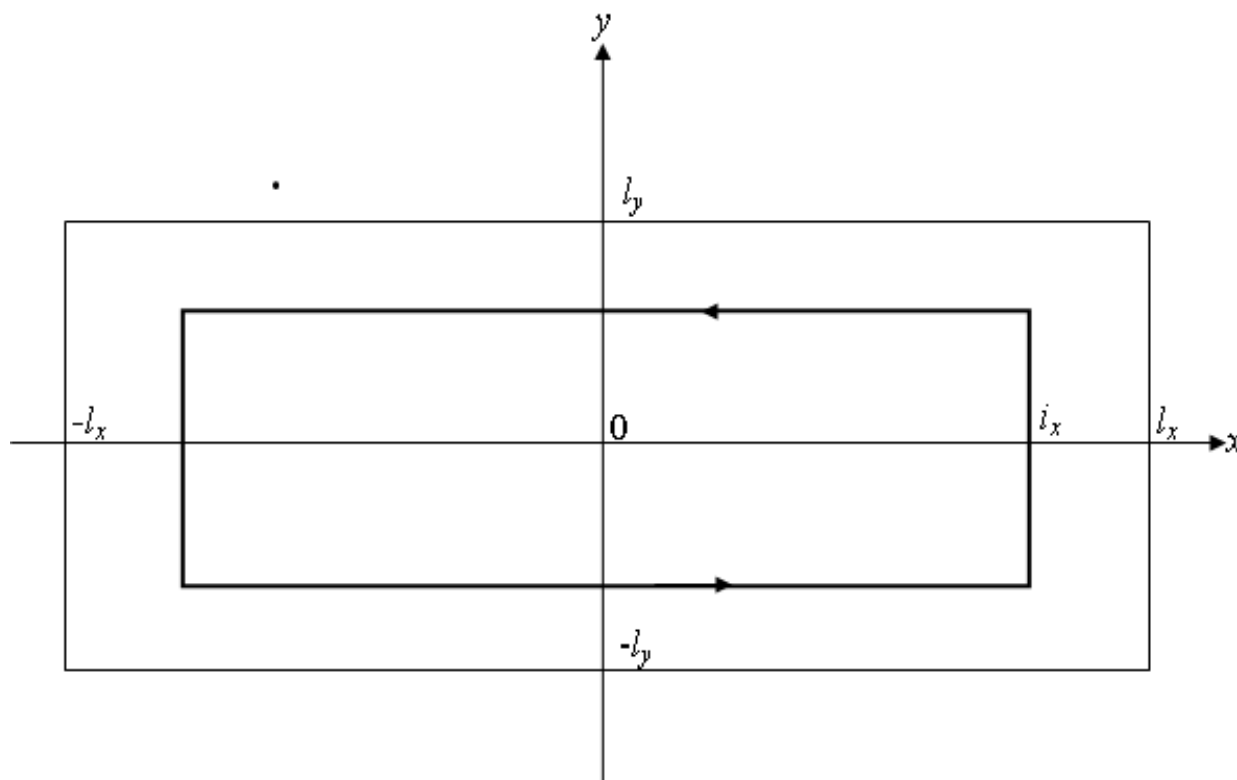


Рис. 3. Токовый контур индуктора цилиндрического ЛАД вращательно-поступательного перемещения

Ограниченность продольного размера ЦЛАД может быть учтена путем определения влияния продольного концевого эффекта, например, по методикам, изложенным в работах [18, 20]. Рассмотрим элементарный токовый контур (Рис. 3), участвующий в создании бегущего магнитного поля, взаимодействующего с вихревыми токами во вторичном элементе. Система токовых контуров бесконечна в направлениях « x » и « y ». Эта система токовых контуров периодична в плоскости « xy ». Таким образом, задача сводится к определению механического усилия, действующего на один контур. Результирующее усилие определяется суммированием элементарных сил. Расчетная модель ЦЛАД для определения осевого усилия для одного токового контура показана на Рис. 4. При анализе полагаем, что токовые контуры индуктора цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением

вторичного элемента размещены на сердечниках с бесконечно большой магнитной проводимостью (область 3).

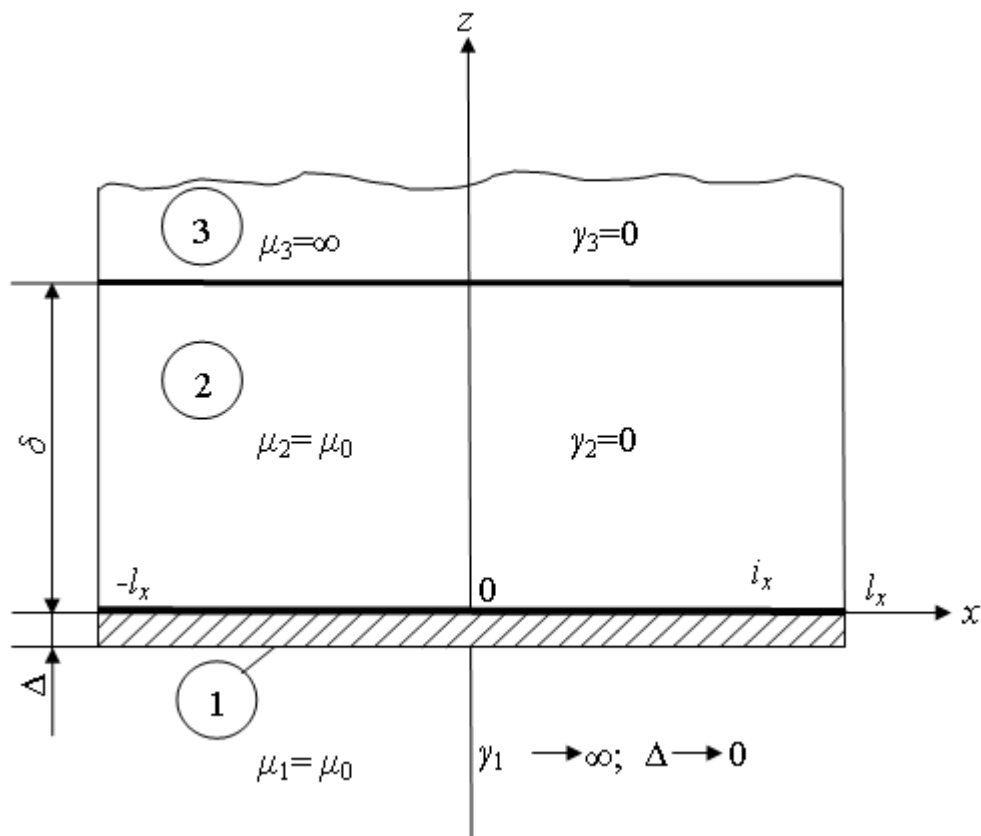


Рис. 4. Фрагмент расчетной модели ЦЛАД. δ – воздушный зазор; Δ – толщина вторичного элемента.

Токовый контур индуктора ЦЛАД (на рис. 4 показан жирной линией) размещен на расстоянии равном величине воздушного зазора δ (область 2) от электропроводящего вторичного элемента (заштрихован) с толщиной Δ (область 1), перемещающегося в осевом (продольном) направлении со скоростью v . Допустим, что ток движущегося вторичного элемента сосредоточен в бесконечно тонком слое на его поверхности, полагая его электропроводность равной бесконечности (Рис. 4).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЕВОГО УСИЛИЯ ЦЛАД

Для определения механического осевого усилия, действующего на элементарный токовый контур (Рис. 4), следует решить задачу магнитного

поля $H=H(x,y,z,t)$ в области 1 ($-\infty < z \leq 0$) и в области 2 ($0 \leq z < \delta$). Эти области разделены слоем вихревого тока $J_1 = J_1(x,y,t)$.

Система уравнений Максвелла, описывающих магнитное поле для расчетной модели ЦЛАД (Рис. 4):

$$\begin{cases} \text{rot} \bar{H} = \bar{j}; \\ \text{div} \bar{B} = 0; \\ \text{rot} \bar{E} = -\frac{d\bar{B}}{dt}; \\ \bar{j} = \gamma(\bar{E} + \bar{V} \cdot H). \end{cases}; \quad (1)$$

С учетом того, что:

$$B = \mu_0 H, \quad (2)$$

запишем уравнения Максвелла в виде:

$$\begin{cases} \text{rot} \bar{H} = \bar{j}; \\ \text{div} \bar{H} = 0; \\ \text{rot} \bar{E} = -\mu_0 \frac{d\bar{H}}{dt}; \\ \bar{j} = \gamma(\bar{E} + \mu_0 \bar{V} \cdot H), \end{cases} \quad (3)$$

где $\bar{E}$ - напряженность электрического поля;

$\bar{H}$ - напряженность магнитного поля;

$\bar{j}$ - вектор плотности тока;

μ_0 - магнитная проницаемость вакуума;

$\bar{V}$ - скорость продольного перемещения вторичного элемента.

Для областей 1 и 2 (Рис. 4) выражения (3) приводят к следующим системам уравнений:

$$\begin{cases} \Delta \bar{H}^1 = 0; \\ \text{div} \bar{H}^1 = 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta \bar{H}^2 = 0; \\ \operatorname{div} \bar{H}^2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

На границе раздела 2 и 3 областей (Рис. 4) при $z=\delta$ касательная напряженности магнитного поля соотносится с плотностью тока индуктора:

$$\bar{H}^2 \Big|_{z=\delta} = \bar{J}_1. \quad (6)$$

В первой области при бесконечно большом расстоянии от индуктора напряженность магнитного поля:

$$\bar{H}^1 \Big|_{z=-\infty} = 0. \quad (7)$$

Для плоскости, разделяющей области 1 и 2, справедливы следующие соотношения:

$$\bar{H}_z^1 \Big|_{z=0} = \bar{H}_z^2 \Big|_{z=0}; \quad (8)$$

$$(\bar{H}^1 - \bar{H}^2) \Big|_{z=0} = \bar{J}_1; \quad (9)$$

$$(\operatorname{rot} \bar{H}^{1,2})_z \Big|_{z=0} = 0. \quad (10)$$

Эти соотношения при заданном токе индуктора ЦЛАД определяют магнитное поле в воздушном зазоре.

Полагая, что ток в элементарных контурах изменяется синусоидально, решение уравнений (4) и (5) может быть представлено в виде:

$$\bar{H}^{1,2}(x, y, z, t) = \bar{H}^{1,2}(x, y, z) e^{j\omega t}. \quad (11)$$

С учетом (11) уравнения (4) и (5) принимают следующий вид:

$$\frac{d^2 \bar{H}^{1,2}}{dx^2} + \frac{d^2 \bar{H}^{1,2}}{dy^2} + \frac{d^2 \bar{H}^{1,2}}{dz^2} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{d^2 H_x^{1,2}}{dx} + \frac{d^2 H_y^{1,2}}{dy} + \frac{d^2 H_z^{1,2}}{dz} = 0. \quad (13)$$

Рассмотрим область, приходящуюся на один элементарный контур в соответствии с Рис. 3 и 4: $-l_x \leq x \leq l_x$; $-l_y \leq y \leq l_y$; $-\infty \leq z \leq \delta$.

Пусть ток в контуре изменяется по синусоидальному закону:

$$I = I_m \cdot e^{j\omega t}. \quad (14)$$

С учетом этого (14) можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \left. \bar{H}_x^2 \right|_{z=\delta} = I_m [\delta(x+l_x) - \delta(x-l_x)] [\gamma(y+l_y) - \gamma(y-l_y)], \\ \left. \bar{H}_y^2 \right|_{z=\delta} = I_m [\delta(y+l_y) - \delta(y-l_y)] [\gamma(x+l_x) - \gamma(x-l_x)], \end{cases} \quad (15)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака;

$\gamma(x)$ – единичная функция Хевисайда, для которой можно записать $\gamma(x)=0$ при $-\infty \leq x \leq 0$; $\gamma(x)=1$ при $0 < x < \infty$.

Рассмотренные выше соотношения относятся к элементарному контуру. Токи в бесконечной структуре элементарных контуров периодичны, что показано на Рис. 2. На основании соотношения (11) получим:

$$\begin{cases} H^{1,2}(x, y, z) = H^{1,2}(x + z l_x, y, z) e^{j \frac{\pi}{3}}; \\ H^{1,2}(x, y, z) = H^{1,2}(x, y + z l_y, z) e^{j \frac{\pi}{3}}. \end{cases} \quad (16)$$

Следовательно, продольный и поперечный сдвиг контуров по координатам $x \rightarrow x + z l_x$ и $y \rightarrow y + z l_y$, соответствует умножению искомых функций на $e^{j\pi/3}$. Это позволяет обойтись определением магнитного поля в областях, представленных на Рис. 3 и Рис. 4.

Из равенств (7) и (8) следует:

$$H_{x,y,z}^1 = 0 \quad \text{при } x \rightarrow -\infty; \quad (17)$$

$$H_z^1 = H_z^2 \quad \text{при } z=0. \quad (18)$$

Поддействуем оператором *rot* на равенство (9), полагая, что:

$$\bar{J}_1 = \gamma_2 \Delta [E_x \bar{e}_x + (E_y - \mu_0 V H_z) \bar{e}_y], \quad (19)$$

где e_x, e_y – единичные векторы.

Сравнивая составляющие $\text{rot}\bar{J}_1$ по оси «z» и учитывая равенство:

$$\text{rot}\bar{E} = -j\mu_0\omega\bar{H}, \quad (20)$$

Получим следующее соотношение на границе между областями 2 и 1:

$$\left(\frac{dH_z^2}{dz} - \frac{dH_z^1}{dz} \right) \Big|_{z=0} = \mu_0\gamma_2\Delta \left(j\omega H_z^{1,2} + V \frac{dH_y^{1,2}}{dx} \right) \Big|_{z=0}. \quad (21)$$

На основании (18) можно записать:

$$\frac{dH_x^{1,2}}{dy} \Big|_{z=0} = \frac{dH_y^{1,2}}{dx} \Big|_{z=0}. \quad (22)$$

Решение уравнений (12) с учетом условий (16) и (17) имеет вид:

$$\begin{cases} H_{x,y,z}^1(x,y,z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{H}_{x,y,zmn}^1 e^{C_{mn} \cdot z} e^{j(a_m x + b_n y)}; \\ H_{x,y,z}^2(x,y,z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\hat{H}_{1x,y,zmn}^2 ch C_{mn} \cdot z + \hat{H}_{2x,y,zmn}^2 sh C_{mn} z) \cdot e^{j(a_m x + b_n y)}, \end{cases} \quad (23)$$

где a_m , b_n , C_{mn} – постоянные разделения переменных.

$$a_m = -\frac{(6_m - 1)\delta}{6l_x}, \quad m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots; \quad (24)$$

$$b_n = -\frac{(6_n - 1)\delta}{6l_y}, \quad m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots; \quad (25)$$

$$C_{mn} = \sqrt{a_m^2 + b_n^2}; \quad (26)$$

$\hat{H}_{x,y,zmn}^{1,1}$, ... - коэффициенты Фурье.

Коэффициенты Фурье находятся путем подстановки (23) в равенства (13), (15), (18), (21), (22). Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases}
ja_m \hat{H}_{xmn}^1 + jb_n \hat{H}_{ymn}^1 + C_{mn} \hat{H}_{zmn}^1 = 0; \\
ja_m \hat{H}_{1xmn}^2 + jb_n \hat{H}_{1ymn}^2 + C_{mn} \hat{H}_{1zmn}^2 = 0; \\
ja_m \hat{H}_{2xmn}^2 + jb_n \hat{H}_{2ymn}^2 + C_{mn} \hat{H}_{2zmn}^2 = 0; \\
chC_{mn} \delta \hat{H}_{1xmn}^2 + shC_{mn} \delta \hat{H}_{2xmn}^2 = \theta_{xmn}; \\
chC_{mn} \delta \hat{H}_{1ymn}^2 + shC_{mn} \delta \hat{H}_{2ymn}^2 = \theta_{ymn}; \\
\hat{H}_{zmn}^1 = \hat{H}_{1zmn}^2; \\
C_{mn} \hat{H}_{2zmn}^2 = \varepsilon_{mn} \hat{H}_{zmn}^1; \\
b_n \hat{H}_{xmn}^1 = a_m \hat{H}_{ymn}^1; \\
b_n \hat{H}_{1xmn}^2 = a_m \hat{H}_{1ymn}^2,
\end{cases} \quad (27)$$

где

$$\theta_{xmn} = \frac{jI_m \cdot \sin a_m l_x \cdot \sin b_n l_y}{l_x \cdot l_y \cdot b_n}; \quad (28)$$

$$\theta_{ymn} = \frac{jI_m \cdot \sin a_m l_x \cdot \sin b_n l_y}{l_x \cdot l_y \cdot a_m}; \quad (29)$$

$$\varepsilon_{mn} = C_{mn} + j\mu_0 \Delta \gamma_2 (\omega + a_m \cdot V). \quad (30)$$

Коэффициенты Фурье с учетом граничных условий (15):

$$\hat{H}_x^2 \Big|_{z=\delta} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \theta_{xmn} \cdot e^{j(a_m x + b_n y)}; \quad (31)$$

$$\hat{H}_y^2 \Big|_{z=\infty} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \theta_{ymn} \cdot e^{j(a_m x + b_n y)}. \quad (32)$$

Решая систему уравнений (27) относительно коэффициентов Фурье в области воздушного зазора цилиндрического линейного асинхронного двигателя (область 2), получаем:

$$\hat{H}_{1xmn}^2 = \frac{a_m \cdot \varepsilon_{mn}}{C_{mn}^2} \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} shC_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} chC_{mn} \cdot \delta}; \quad (33)$$

$$\hat{H}_{2xmn}^2 = \frac{b_n \cdot \theta_{ymn}}{a_m \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta} + \frac{1}{a_m} \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} \operatorname{ch} C_{mn} \cdot \delta} \times \\ \times (C_{mn} + \varepsilon_{mn} \frac{b_n^2}{C_{mn}^2} \cdot \operatorname{cth} C_{mn} \cdot \delta); \quad (34)$$

$$\hat{H}_{1ymn}^2 = \frac{b_n \cdot \varepsilon_{mn}}{C_{mn}^2} \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} \operatorname{ch} C_{mn} \cdot \delta}; \quad (35)$$

$$\hat{H}_{2ymn}^2 = \frac{\theta_{ymn}}{\operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta} - \frac{b_n \cdot \varepsilon_{mn}}{C_{mn}^2} \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} \operatorname{ch} C_{mn} \cdot \delta} \times \operatorname{cth} C_{mn} \cdot \delta; \quad (36)$$

$$\hat{H}_{1zmn}^2 = -j \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} \operatorname{ch} C_{mn} \cdot \delta}; \quad (37)$$

$$\hat{H}_{2zmn}^2 = -j \frac{\varepsilon_{mn}}{\gamma_{mn}} \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} \operatorname{ch} C_{mn} \cdot \delta}. \quad (38)$$

При синусоидально изменяющемся токе в контуре среднее значение механического осевого усилия может быть определено соотношением:

$$f = \frac{\mu_0}{2} \cdot \operatorname{Re}(\bar{j}_m \cdot \bar{H}_m^*), \quad (39)$$

где $\bar{j}_m$ - амплитудное значение тока;

$\bar{H}_m^*$ - самосопряженный комплекс амплитудного значения магнитной напряженности поля в воздушном зазоре.

Осевое продольное усилие, действующее на элементарный контур определится соотношением:

$$F_x = \frac{\mu_0 I_m}{2} \cdot \operatorname{Re} \left[\int_{-l_y}^{l_y} \left(H_z^2 \Big|_{z=l_x}^{z=\delta} - H_z^2 \Big|_{z=-l_x}^{z=\delta} \right) dy \right]. \quad (40)$$

Преобразуем (40), подставив в подынтегральные выражения полученные ранее ряды (23). После ряда преобразований получим соотношение для расчета осевого усилия ЦЛАД с вращательно-поступательным движением вторичного элемента:

$$F_x = 2\mu_0 \cdot I_m \cdot J_m \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\left(\hat{H}_{1zmn}^2 \cdot chC_{mn} \cdot \delta + \hat{H}_{2zmn}^2 \cdot shC_{mn} \cdot \delta \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\sin a_m l_x \cdot \sin b_n l_y}{b_n} \right] \right\}. \quad (41)$$

Полученное соотношение позволяет определить осевое усилие цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента для случая, когда индуктор машины образован бесконечно большим числом элементарных соосно расположенных сердечников с трехфазными обмотками.

ВЫВОДЫ

1. Предложена конструкция цилиндрического линейного асинхронного двигателя, позволяющая получить вращательно-поступательное движение вторичного элемента, что расширяет функциональные возможности электрической машины.

2. На основе решения полевой задачи получено соотношение для расчета осевого механического усилия линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 03.02.2019. Доступно по: https://b-ok.org/book/2901328/800f1a/?_ir=1
2. Зайцев А.А., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Транспорт на магнитном подвесе / под ред. А.А. Зайцева. – СПб: ПГУПС, 2010. – 160 с. [Zaitsev AA, Talashin GN, Sokolova IaV. *Transport na magnitnom podvese*. Zaitsev AA, editor. St. Petersburg: PSTU; 2010. 160 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.02.2019. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004907216>
3. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA, editor. *Magnitolevitatsionnyy transport: nauchnyye problem i tekhnicheskiye resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. 612 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.02.2019. Доступно по: <https://b-ok.org/book/2910926/a2ce27>

4. Зайцев А.А., Морозова Е.Н., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны / под ред. А.А. Зайцева. – СПб: НП-ПРИНТ, 2015. – 140 с. [Zaitsev AA, Morozova EN, Talashin GN, Sokolova YaV. *Magnitolevitatsionnyy transport v edinoi transportnoi sisteme strany*. Zaitsev AA, editor. St. Petersburg: NP-PRINT; 2015. 140 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 03.02.2019. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008161609>
5. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта и подходах к выбору специализации и физической основы высокоскоростного движения на направлении Москва–Санкт-Петербург // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2016. – № 4. – С. 26–33. [Zaitsev AA. O sovremennoy stadii razvitiya magnitolevitatsionnogo transporta i podkhodakh k vyboru spetsializatsii i fizicheskoy osnovy vysokoskorostnogo dvizheniya na napravlenii Moskva–Sankt-Peterburg. *Byulleten' ob'yedinennogo uchenogo soveta OAO RZHD*. 2016;4:26-33. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.02.2019. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27472893>
6. Зайцев А.А. Магнитолевитационные системы и технологии // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73. [Zaitsev AA. Magnitolevitatsionnye sistemy i tehnologii. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2014;5:69-73. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 03.02.2019. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21883966>
7. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А., Морозова Е.И. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы // Известия ПГУПС. – 2014. – Т. 4. – № 41. – С. 5–15. [Antonov YuF, Zaitsev AA, Morozova EI. Issledovanie magnitodinamicheskoi levitatsii i elektrodinamicheskogo tormozheniya gruzovoi transportnoi platformy. *Izvestia PGUPS*. 2014;4(41):5-15. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 05.02.2019. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-magnitodinamicheskoy-levitatsii-i-elektrodinamicheskogo-tormozheniya-gruzovoy-transportnoy-platformy>
8. Соломин В.А., Соломин А.В., Замшина Л.Л. Линейные асинхронные тяговые двигатели для высокоскоростного подвижного состава и их математическое моделирование. – М.: ФГБОУ УМЦ ЖДТ, 2015. – 164 с. [Solomin VA, Solomin AV, Zamshina LL. *Lineinye asinkhronnye dvigateli dla vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava i ikh matematicheskoye modelirovanie*. Moscow: FGBOU UMC ZHDT; 2015. 164 p. (In Russ.)].
9. Isobe E. Linear Metro Transport System for the 21th Century. *Hitachi Review*. 1999;48(3):144-148.
10. Nonaka S, Higuchi T. Design of a Single Sided Linear Induction Motors for Urban Transit. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1988;37(3):167-173. doi: 10.1109/25.16543
11. Zhu K, Wang YM, Fan JF. Influence of Reaction Plate's Material and Configuration on the Performance of LIM Urban Transit Vehicle. *Urban Mass Transit*. 2007;10(9):55-57.
12. Nozaki Y, Koseki T, Masada E. Analysis of Linear Induction Motor for HSST and Linear Metro using Finite Difference Method. *5th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications*. Proc. LDIA-2005. pp. 168-171.
13. Fujii N, Hoshi T, Tanabe Y. Methods for Improving Efficiency of Linear Induction Motor for Urban Transit. *JSME International Journal, Series C*. 2004;47(2):512-517. doi: 10.1299/jsmec.47.512
14. He Y, Wang Y-S, Lu Q, et al. Design of Single-Sided Linear Induction Motor for Low-Speed Maglev Vehicle in 160 km/h and Variable Slip Frequency Control.

- Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):120-128. doi: 10.17816/transsyst201842120-128
15. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с. [Veselovsky ON, Konyaev AJu, Sarapulov FN. *Lineinye asinkhronnye dvigateli*. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 256 p. (in Russ.)].
 16. Lee H-W, Lee SG, Park C, et al. Characteristic Analysis of a Linear Induction Motor for a Lightweight Train According to Various Secondary Schemes. *IJR International Journal of Railway*. 2008;1(1):6-11.
 17. Li M, Yang Z, Lin F, Sun H. Characteristics of Linear Induction Motor Considering Material of Reaction Plate Change. *Journal of Computers*. 2013;8(1):102-107. doi: 10.4304/jcp.8.1.102-107
 18. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 271 с. [Voldek AI. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom*. Leningrad: Energia; 1970. 271 p. (In Russ.)].
 19. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 180 с. [Yamamura S. *Teoria lineinykh asinkhronnykh dvigatelei*. Leningrad: Energoatomizdat; 1983. 180 p. (In Russ.)]
 20. Boucheta A, Bousserhane IK, Hazzab A, Sicard P, Fellah MK. Speed Control of Linear Induction Motor Using Sliding Mode Controller Considering the End Effects. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2012;7(1):34-45. doi: 10.5370/JEET.2012.7.1.34

Сведения об авторах:

Соломин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор;

e-Library SPIN: 6885-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;

E-mail: ema@rgups.ru

Соломин Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент;

e-Library SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;

E-mail: vag@rgups.ru

Замшина Лариса Леонидовна, кандидат технических наук, доцент;

e-Library SPIN: 8703-4347; ORCID: 0000-0001-5374-9443;

E-mail: ema@rgups.ru

Трубицина Надежда Анатольевна, кандидат технических наук, доцент;

e-Library SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;

E-mail: ema@rgups.ru

Information about the authors:

Vladimir A. Solomin, Doctor of Technical Sciences, Professor;

e-Library SPIN: 6885-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;

E-mail: ema@rgups.ru

Andrej V. Solomin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

e-Library SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;

E-mail: vag@rgups.ru

Larisa L. Zamshina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

e-Library SPIN: 8703-4347; ORCID: 0000-0001-5374-9443;

E-mail: ema@rgups.ru

Nadejda A. Trubitsina Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
e-Library SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;
E-mail: ema@rgups.ru

Цитировать:

Соломин В.А., Соломин А.В., Замшина Л.Л., Трубицина Н.А. Определение осевого усилия цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 50–66. doi: 10.17816/transsyst20228150-66

To cite this article:

Solomin VA, Solomin AV, Zamshina LL, Trubitsina NA. название статьи Determination of the axial force of a cylindrical linear induction motor with rotational-translational movement of the secondary element. *Modern transportation systems and technologies*. 2022;8(1):50-66. doi: 10.17816/transsyst20228150-66

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Транспортные системы

УДК [UDC] 622.625.6
DOI 10.17816/transsyst20228167-85

© А.Н. Фиронов, А.С. Костенко
Российский университет транспорта (МИИТ)
(Москва, Россия)

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОСКОВСКОЙ МОНОРЕЛЬСОВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Цель: Московская монорельсовая транспортная система, эксплуатирующаяся более 18 лет и использующая линейный электропривод, доказала свою эффективность, надежность, безопасность, но вместе с тем возникла необходимость ее модернизации. В основе предлагаемой модернизации – новые тележки, в конструкции которых объединены электромагниты и линейный двигатель.

Материалы и методы: На основе модельно-ориентированного подхода в приложениях Simscape – Simulink среды MATLAB® разработана динамическая модель двухвагонного подвижного состава монорельсовой транспортной системы с применением магнитолевитационной технологии.

Результаты: Дано общее описание модели и входящих в нее подсистем. Представлены результаты моделирования с учетом нервноностей путевой структуры.

Заключение: Разработанная модель позволяет выбрать наиболее рациональные конструктивные параметры тележек, упруго-диссипативных элементов подвеса подвижного состава, системы управления электромагнитами. Предлагаемая монорельсовая транспортная система может быть реализована в городах России, где по разным причинам применение метро нецелесообразно.

Ключевые слова: монорельс, модельно-ориентированное проектирование, подвижной состав, динамическая модель, тягово-подъемный модуль, магнитолевитационная технология, электромагнит, линейный электропривод.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Transport systems

© A.N. Fironov, A.S. Kostenko
Russian University of Transport (MIIT)
(Moscow, Russia)

DYNAMIC MODEL OF THE MOSCOW MONORAIL TRANSPORT SYSTEM USING MAGNETOLEVITATION TECHNOLOGY

Aim: The Moscow monorail transport system, which has been in operation for more than 18 years and uses a linear electric drive, has proven its efficiency, reliability, and safety,

but at the same time there is a need to modernize it. The proposed modernization is based on new trolleys, in the design of which electromagnets and a linear motor are combined.

Materials and methods: Based on a model-oriented approach in Simscape – Simulink applications of the MATLAB ® environment, a dynamic model of a two-car rolling stock of a monorail transport system using magnetolevitation technology has been developed.

Results: A general description of the model and its subsystems is given. The results of modeling taking into account the nervousness of the track structure are presented.

Conclusion: The developed model allows you to choose the most rational design parameters of trolleys, elastic-dissipative suspension elements of rolling stock, electromagnetic control systems. The proposed monorail transport system can be implemented in Russian cities where, for various reasons, the use of the metro is impractical.

Key words: monorail, model-oriented design, rolling stock, dynamic model, traction and lifting module, magnetolevitation technology, electromagnet, linear electric drive.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивный рост городов, развитие туризма, повышение мобильности населения, развитие бизнеса и необходимость экономии времени, а также ряд других причин порождают необходимость совершенствования общественного транспорта [1–2]. Увеличение скорости в междугородном сообщении связано с развитием магнитолевитационной технологии [3–6]. Активно исследуются возможности вакуумно-магнитолевитационного транспорта [7–10].

Переход на опирание и тягу без механического контакта дает ряд преимуществ прежде всего в городских агломерациях при перемещении больших масс пассажиров. В наибольшей степени этим требованиям соответствует монорельсовый транспорт, в последние годы в котором активно начинает применяться магнитная левитация и линейный электропривод [11–16].

Вопросы динамики транспорта с магнитной левитацией остаются наиболее актуальными для исследований. [17–22]. При проектировании таких линий необходимо учитывать как конструкционные особенности путевой структуры, так и динамические свойства подвижного состава. Для правильного выбора параметров новой линии целесообразно и необходимо проводить комплексное компьютерное моделирование всей транспортной системы.

В статье рассматривается модель двухвагонного монорельсового транспорта с применением магнитолевитационной технологии, позволяющая определять динамические воздействия на транспортное средство с учетом неровностей путевой структуры и разработать рекомендации к конструкции подвижного состава.

МОСКОВСКАЯ МОНОРЕЛЬСОВАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА

Московская монорельсовая транспортная система (ММТС) эксплуатируется с 2004 года. При создании ММТС при поддержке Правительства Москвы ставилась задача ее создания как экспериментальной транспортной системы для проверки работоспособности монорельса в условиях плотной городской застройки. Как показал опыт продолжающейся эксплуатации, ММТС оказалась не только жизнеспособной, но и востребованной, достигнув наибольшей производительности в 2013–2015 годах, когда ежегодно перевозилось более 5,5 млн. пассажиров.

Особенность ММТС заключается в том, что в начале 2000-х годов это была технически прогрессивная система с опиранием на пневматические колеса и бесконтактным линейным асинхронным тяговым приводом (Рис.1).

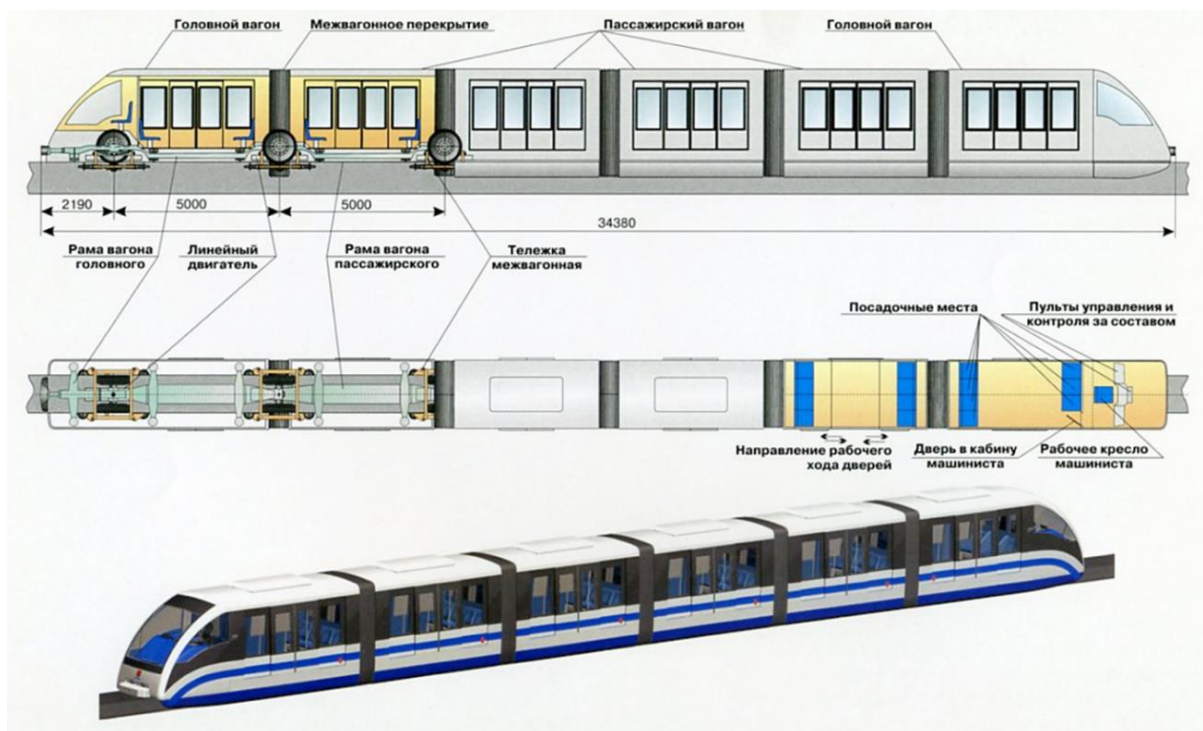


Рис. 1. Подвижной состав ММТС с линейным двигателем

Применение линейного электропривода для целей тяги/торможения было обусловлено специфическими российскими климатическими условиями, когда выпавший снег и образующиеся наледи на горизонтальной поверхности эстакадного пути не позволяли разогнать и затормозить подвижной состав монорельса, если бы это происходило через традиционный контакт пневматических колес с плоской металлической поверхностью несущей балки. Поэтому было принято решение обеспечить

тягу/торможение бесконтактным способом, т.е. с помощью линейного асинхронного двигателя. Конструкция тележки подвижного состава предусматривала специальную систему поддержания воздушного зазора между индуктором линейного двигателя и вторичным элементом на пути.

В последние годы ММТС переведена в т.н. «экскурсионный» режим и активно обсуждается вопрос ее дальнейшей судьбы.

Выполненный в Российском университете транспорта (МИИТ) анализ, подтвердил перспективность использования монорельса для городских перевозок в условиях плотной городской застройки и эксплуатации в Российских климатических условиях. Кроме этого, была предложена модернизация ММТС с *минимальными затратами без кардинальной переделки существующей путевой структуры* с применением магнитной левитации [23, 24]. Переоборудование путевых конструкций, путевого хозяйства, СЦБ, связи, системы электроснабжения, депо и подвижного состава при этом может быть обеспечено с минимальными по стоимости и исчерпывающими для применения магнитолевитационной технологии.

Для обеспечения применения новой для Москвы магнитолевитационной транспортной технологии было предложено доработать подвижной состав и частично путевую структуру (без выполнения капитальных строительно-монтажных работ), усовершенствовать систему тягового электропривода и управления движением и повысить среднюю скорость сообщения до 30 км/ч (сейчас – 15,5 км/ч). Предлагаемая модернизация позволяет *организовать сквозной проход вдоль всего состава и увеличить вместимость состава на 30 %*. Пассажиропоток на модернизированной трассе может быть увеличен до 12–15 млн. человек в год.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ ММТС С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Ходовая балка ММТС представляет собой металлическую конструкцию коробчатого сечения длиной 30–40 м. Высота ходовой балки выбрана из условия допустимой деформации при выбранной величине пролетного сечения.

Исходя из *требования минимизации затрат на переустройство инфраструктуры и подвижного состава ММТС* был рассмотрен следующий вариант. Верхняя металлическая плита толщиной 32 мм имеет выступающие за сечение балки края с вылетом 150 мм (Рис. 2).

Целесообразно, не меняя несущую конструкцию балки:

1. Изменить конструкцию ходовой части тележки подвижного состава следующим образом:

- разместить на охватывающих путевую структуру частях ходовой тележки по одному тяговому линейному двигателю и по два электромагнита левитации с каждой стороны для обеспечения магнитного притяжения снизу к выступающим краям металлической балки и создания необходимого тягового усилия (Рис. 3);
- сохранить опорную колесную систему с заменой пневматических колес на обрешиненные катки меньшего диаметра;
- перенести вторичный элемент ЛАД с верхней горизонтальной поверхности на две боковые поверхности несущей балки.

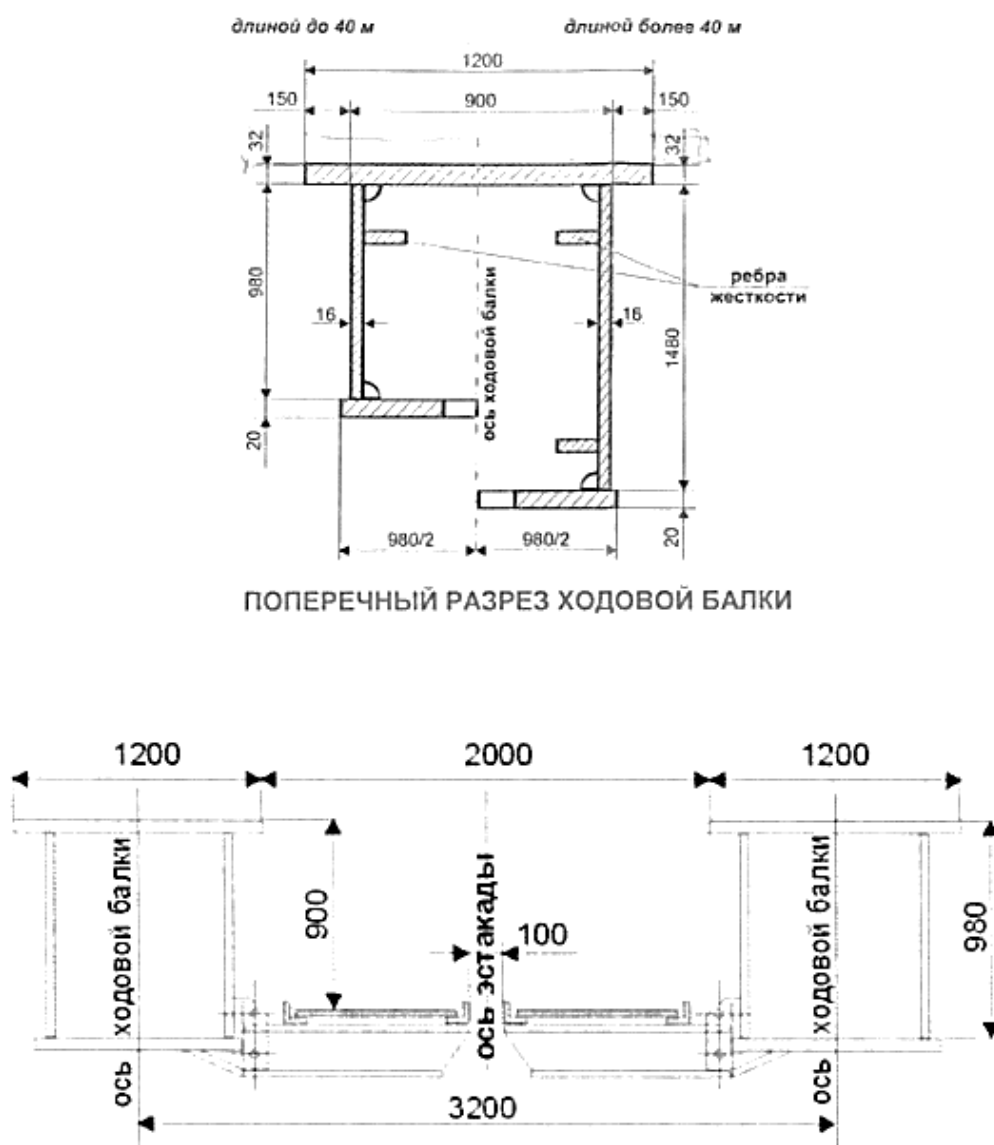


Рис. 2. Поперечный разрез ходовой балки и путевой структуры ММТС

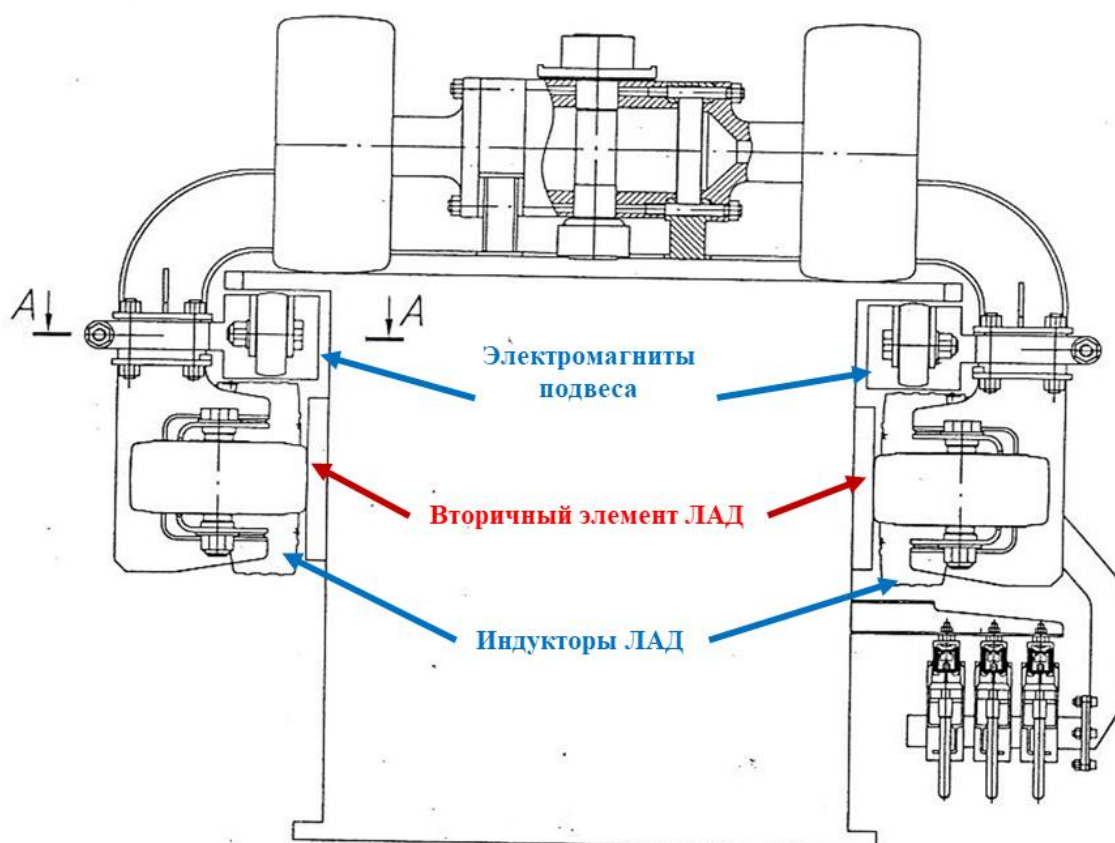


Рис. 3. Поперечный разрез тележки с тягово-подъемными модулями модернизированного вагона ММТС

Как показали испытания электромагнитов подвеса и тележки, возможно использование боковых поверхностей несущей балки без переделки троллейной системы. При этом обеспечивается вписывание в габарит подвижного состава.

В предложенном варианте:

1. Высвобождается межвагонное пространство, что позволит обеспечить сквозной проход вдоль состава;
2. До 2,5 раз снижается осевая нагрузка на опорные колеса, а при полном магнитном подвесе колеса разгружаются целиком и используются как дополнительная система безопасности;
3. За счет снижения нагрузки на ось увеличивается средняя эксплуатационная скорость до 25–30 км/ч и снижается потребляемая мощность линейного двигателя;
4. Вторичный элемент защищен от прямого воздействия снега и наледи, т.к. размещается на боковых поверхностях несущей балки и практически под навесом «крыльев» конструкции;
5. Вертикальное размещение тяговых ЛАД дает дополнительное преимущество с точки зрения обеспечения поперечной стабилизации.

Внедрение векторной системы управления ЛАД позволит независимо управлять силой тяги и силой поперечной стабилизации при прохождении кривых и динамических возмущениях.

Для проверки предложенных технических решений был использован подход на основе модельно-ориентированного проектирования (МОП). Основной целью применения МОП является то, что при разработке системы создается модель, максимально приближенная к оригиналу и позволяющая выполнить анализ взаимного влияния компонентов системы, провести настройку параметров и избежать серьезных ошибок при изготовлении макетных образцов.

На такой модели различные команды разработчиков совместно проверяют взаимное влияние подсистем, проводят любые виртуальные испытания, в том числе безопасно отрабатывают аварийные или экстремальные режимы работы изделия. Системная модель используется не только как виртуальный полигон для отработки различных сценариев работы системы, но и как средство проектирования, то есть быстрого перебора решений или выбора оптимального компонента для установки в систему. Методы математической оптимизации и калибровки позволяют выбрать наилучшие параметры для достижения целевых показателей поведения системы. Из системной модели производится генерация исходного кода для различных микропроцессоров, операционных систем реального времени, программируемых логических интегральных схем, программируемых логических контроллеров и встраиваемых графических процессоров.

МОДЕЛЬ ДВУХВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Основная цель разработки модели заключается в определении:

- динамических нагрузок на вагон при его движении по трассе;
- выбора параметров и настройки системы управления электромагнитами подвеса;
- выбора параметров и настройки системы вторичного подвеса вагона по условиям обеспечения наилучших ходовых качеств;
- выборе параметров и настройки системы управления двигателем при прямолинейном движении и в кривых;
- проведение тяговых расчетов в условиях динамических возмущений.

Расчетная кинематическая схема модели макетного двухвагонного трехтележного подвижного состава монорельсовой транспортной системы с магнитной разгрузкой представлена на Рис. 4. За основу в модели были приняты массовые и габаритные размеры действующего подвижного состава ММТС.

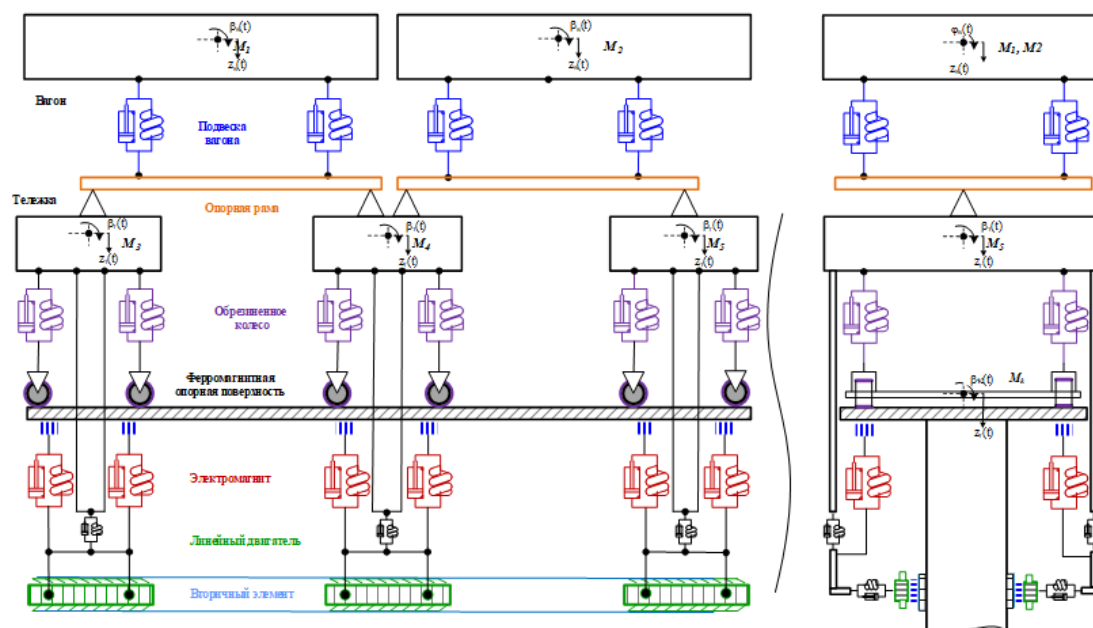


Рис. 4. Расчетная кинематическая схема модели двухвагонного подвижного состава монорельсовой транспортной системы с магнитной разгрузкой

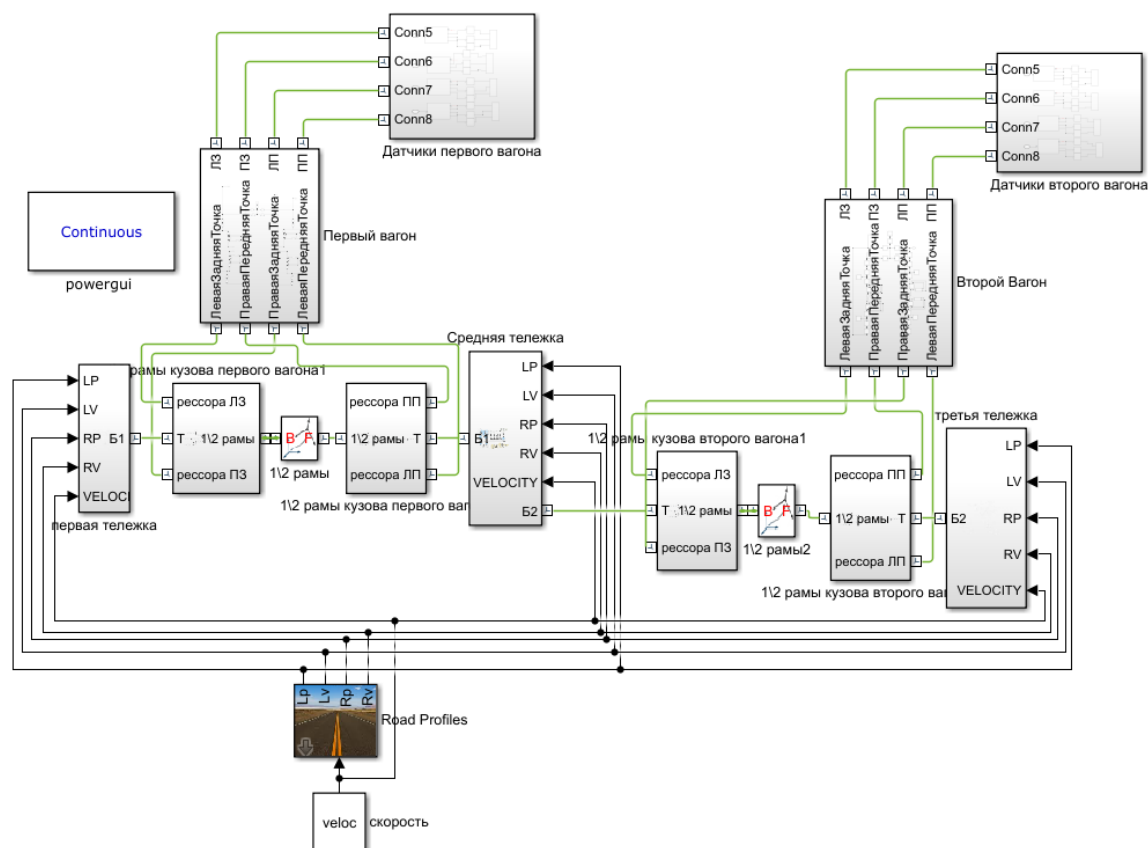


Рис. 5. Обобщенная структура модели двухвагонного состава.

Пассажирский вагон через четырехточечную систему подвеса, соединен с опорной рамой, которая, в свою очередь, опирается на две тележки. В межвагонном соединении средняя тележка несет частичную весовую нагрузку от двух вагонов. Для головного и хвостового вагонов используются дополнительные тележки.

Обобщенная структура модели двухвагонного подвижного состава разработана в среде Simulink–Simscape пакета MATLAB (Рис. 5).

В составе модели подсистемы, описывающие каждый вагон с датчиками силы, размещенными в опорной раме в четырех местах подвески. Основной несущий элемент подвижного состава – тележка, которая в составе модели двухвагонного подвижного состава представлена тремя подсистемами, описывающими три тележки с тягово-подъемными модулями. Каждая подсистема, описывающая тележку, имеет пять входов, четыре из которых обозначают опорные колеса, и один – входную скорость. Модель тележки рассмотрена ниже.

Визуализация, полученная из модели двухвагонного подвижного состава представлена на Рис. 6.

Неровности путевой структуры с учетом скорости движения представлены отдельной подсистемой и позволяют оценить динамические воздействия на подвижной состав.

В модели задаются геометрические параметры пути, каркаса тележки, опорных обрешеченных колес, магнитов и индуктора ЛАД, горизонтальных колес, а также параметры всех упруго-диссипативных элементов, включенных в конструкцию, параметры кузова вагона и подвагонной рамы, массы конструктивных элементов и скорость движения.

ТЕЛЕЖКА С ТЯГОВО-ПОДЪЕМНЫМИ МОДУЛЯМИ

Основной элемент предлагаемой транспортной системы – тележки, на которые через раму опираются пассажирские вагоны. Общая структура модели тележки с тягово-подъемными модулями с магнитной разгрузкой и линейным тяговым приводом представлена на Рис. 7.

Тележки представляют собой силовую пространственную конструкцию с размещенными симметрично по боковым плоскостям тягово-подъемными модулями (ТПМ), по два на тележку, обеспечивающий подвес, тягу/торможение и боковую стабилизацию подвижного состава. В конструкции ТПМ размещены два электромагнита, закрепленные на несущей раме, которые притягиваются снизу к выступающим краям горизонтальной поверхности металлической плиты несущей балки путевой структуры (Рис. 3).

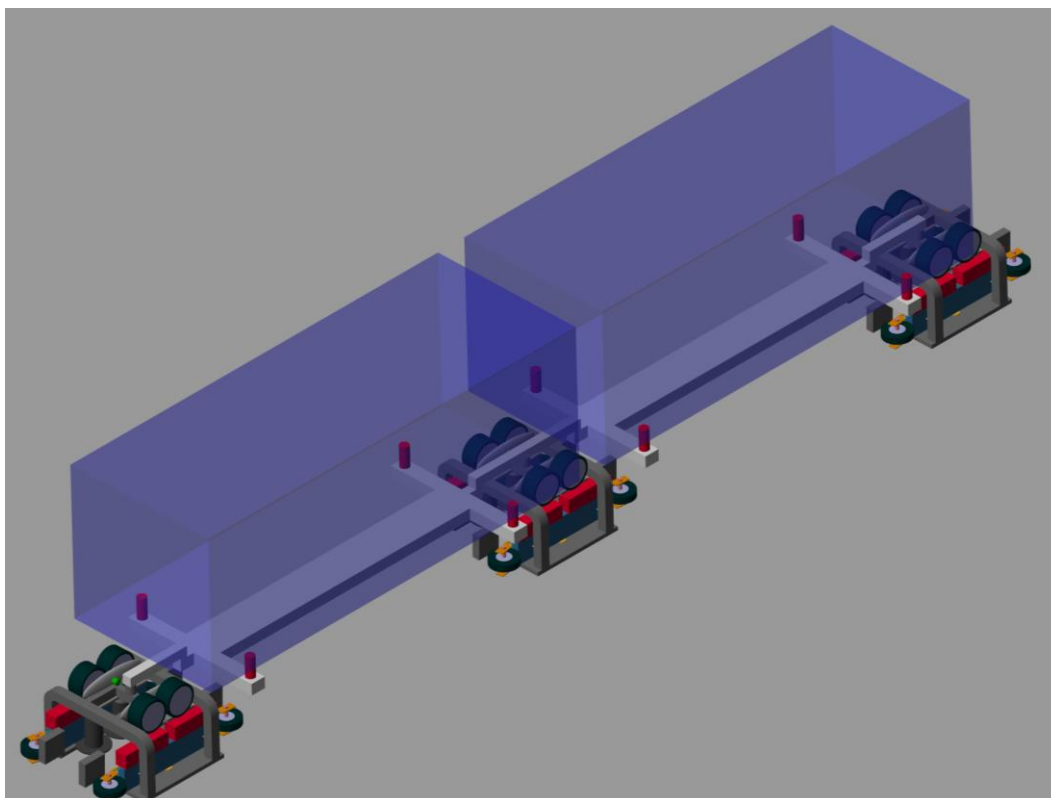
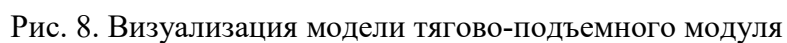


Рис. 6. Визуализация модели двухвагонного состава

С каждой стороны тележки под электромагнитами размещены индукторы тяговых линейных двигателей. Тяга (торможение) осуществляется при взаимодействии бегущего магнитного поля индуктора со вторичным элементом (алюминиевой полосой с металлической подложкой), расположенного на боковых поверхностях несущей балки. Визуализация тележки, полученная из подсистемы модели, представлена на Рис. 8. Здесь красным цветом обозначены электромагниты подвеса, синим – индукторы ЛАД.

Путевая структура в модели, на которую опираются вертикальные колеса, представлена четырьмя плоскими поверхностями (по количеству колес), опирающимися на цилиндрические платформы (Рис. 7, 8). Назначение платформ – задавать неровности пути в виде колебательных (с разными частотами и амплитудами) или различных ступенчатых процессов. Алгоритм управления платформами позволяет задавать неровности, воздействуя как одновременно, так и отдельно на каждое колесо и в зависимости от скорости движения.

Вертикальные колеса опираются на раму тележки через «коромысло». Такая конструкция позволяет плавно проходить неровности путевой структуры. Боковые колеса ограничивают зазор между индуктором и вторичным элементом ЛАД, а также в динамических процессах и/или при прохождении кривых.



Тягово-подъемные модули, состоящие из пары электромагнитов двигателя с каждой стороны, крепятся «параллелограммом» к раме тележки через вертикальный упруго-диссипативный элемент. Колебания зазора между индуктором ЛАД и вторичным элементом на пути сглаживаются горизонтальным упруго-диссипативным элементом.

Электромагниты подвеса питаются попарно с каждой стороны от двухплечевого двухквadrантного широтно-импульсного преобразователя (ШИП) с IGBT-транзисторными ключами. Вертикальные колеса ТПМ рассчитаны на нагрузку только от тары подвижного состава. Сигнал от полезной нагрузки (от пассажиров), через ШИП управляет током электромагнитов, обеспечивая постоянную разгрузку вертикальных колес. В модель также включена реальная силовая характеристика, подтвержденная экспериментом на полномасштабном электромагните.

Боковые поверхности несущей балки в модели представлены вертикальными плоскостями, имитирующие боковые ограничители для горизонтальных колес.

Каждый конструктивный элемент ТПМ в модели представлен соответствующим описанием, включающего геометрические размеры, плотность материала, массу, прочие механические характеристики. Все элементы связаны между собой посредством единой координатной системы, что позволяет получать информацию об усилиях, скоростях и ускорениях, действующих в трех координатных осях на любую из входящих в конструкцию деталь.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯГОВО-ПОДЪЕМНОГО МОДУЛЯ

В модели приняты допущения, связанные в основном с упрощением описания геометрии элементов, входящих в конструкцию ТПМ и не оказывающих влияния на динамические характеристики. Для проведения имитационных расчетов были приняты предварительные исходные данные:

1. Параметры механической подвески тягово-подъемного модуля:
 - Жесткости упругих элементов крепления двигателя и рамы с магнитами (по экспериментальным данным) 174 400 Н/м;
 - Диссипация упругих элементов крепления двигателя и рамы с магнитами 50 000 Н/(м/с)
2. Массы: Электромагнита 150 кг
Двигателя 300 кг
3. Неровности путевой структуры задаются моделирующими их платформами, для каждой стороны путевой структуры, в соответствии с приведенным в Табл. 1 алгоритмом:

Таблица 1. Виды неровностей путевой структуры для моделирования

№	Вид неровности
1	Низкочастотная синусоида с левой и правой платформами, колеблющимися в фазе
2	Низкочастотная синусоида с левой и правой платформами, колеблющимися в противофазе
3	Среднечастотная синусоида с левой и правой платформами, колеблющимися в фазе
4	Среднечастотная синусоида с левой и правой платформами, колеблющимися в противофазе
5	Высокочастотная синусоида с левой и правой платформами, колеблющимися в фазе
6	Высокочастотная синусоида с левой и правой платформами, колеблющимися в противофазе
7	Шаг левой и правой платформ в фазе
8	Шаг левой и правой платформ в противофазе
9	Импульс левой и правой платформ в фазе
10	Импульс левой и правой платформ в противофазе
11	Большой провал вниз

Характеристики неровностей пути, оказывающие динамические воздействия на ТПМ и принятые при моделировании, предусматривают следующие виды:

- низкочастотные колебания балки путевой структуры;
- средне и высокочастотные колебания верхней плиты;
- деформационные стыки верхней плиты;
- случайные неровности поверхности верхней плиты;
- возможные резкие провалы в поверхности верхней плиты.

Все амплитудные и частотные характеристики платформ, моделирующих неровности, задаются в зависимости от скорости движения с учетом смещения по времени воздействия на передние и задние колеса тележки.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью разработанной модели была проведена серия имитационных расчетов при разных скоростях движения и разных значениях полезной нагрузки на среднюю тележку подвижного состава. В конструкции тележки предусмотрено ограничение по зазору между электромагнитами и путевой структурой. Магнитная разгрузка вертикальных колес обеспечивается притяжением электромагнитов к путевой структуре, что отражается в приводимых ниже графиках. В качестве примера на Рис. 9 приведены осциллограммы сил, действующих в трех координатных осях в центре ТПМ (места крепления рам вагона) без

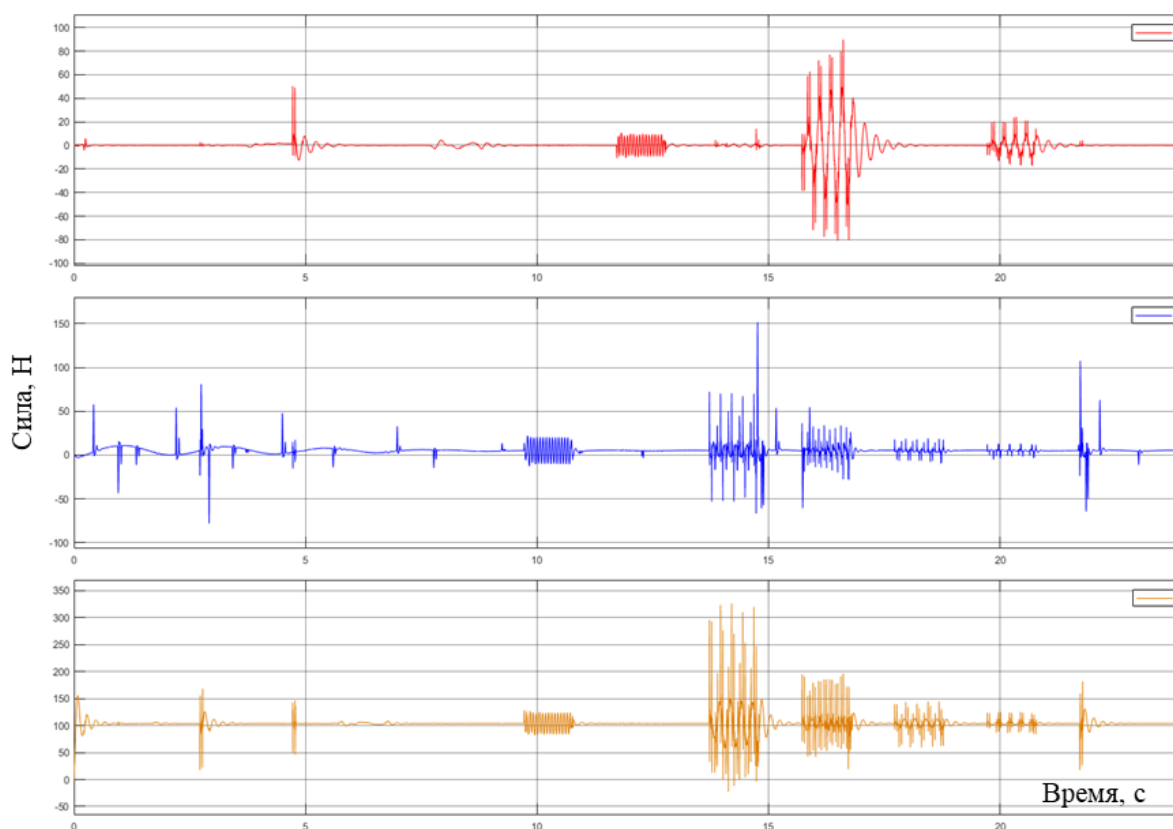
нагрузки (Рис. 9а) и при полезной нагрузке 6500 кг (Рис. 9б) и скорости движения 30 км/ч.

ВЫВОДЫ

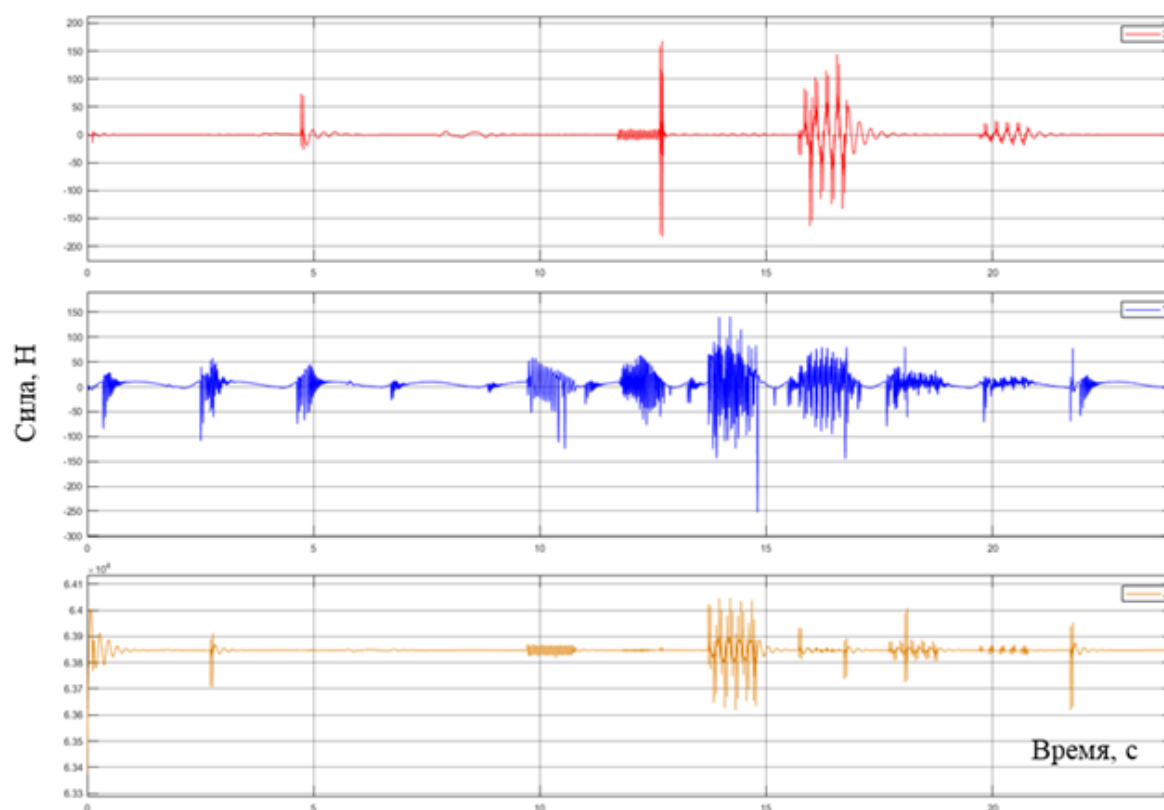
Разработанная модель позволяет оценить динамические характеристики подвижного состава монорельсовой транспортной системы с элементами электромагнитной подвески. Результаты моделирования дают возможность принять предварительные решения по параметрам первичной и вторичной подвески с целью обеспечения требований к качеству хода. При анализе динамики движения приняты достаточно жесткие условия по неровностям пути и алгоритму их применения, которые позволяют предложить улучшения в конструкции ТПМ и двухвагонного макетного образца модернизированной ММТС.

Дальнейшее развитие модели проекта модернизации ММТС предполагает:

- выполнение комплекса расчетов для двухвагонного подвижного состава;



а)



б)

Рис. 9. Осциллограммы сил в центре шкворневого узла ТПМ

при скорости движения 30 км/ч:

а) без полезной нагрузки;

б) при нагрузке 100 %

- доработку модели с целью обеспечения полного электромагнитного подвеса с системой управления воздушным зазором;
- моделирование системы поперечной стабилизации посредством линейного асинхронного двигателя;
- выполнение комплекса динамических и тягово-энергетических расчетов для реальной трассы монорельса.

В городах Российской Федерации, где строительство метро по экономическим или геологическим причинам нецелесообразно, предлагаемая монорельсовая транспортная система с магнитолевитационной технологией может найти применение.

БЛАГОДАРНОСТИ

Особая благодарность Член-корреспонденту Академии электротехнических наук, Главному конструктору АО ИНЦ «ТЭМП» Андрею Александровичу Галенко; Заместителю Генерального директора АО ИНЦ «ТЭМП», кандидату технических наук Алексею Тихоновичу Горелову; кандидату технических наук, доктору экономических наук, профессору Владимиру Викторовичу Коновалову за замечания и рекомендации при выполнении данной работы.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Фиронов А.Н. Магнитная левитация – мировой тренд транспортных технологий. Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 3. – С. 54–58. [Zaytsev AA, Sokolova YV, Fironov AN. Magnitnaya Levitatsiya – mirovoy trend transportnyh technology. Zeleznodorogny transport. 2019;(3):54-58. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 17.02.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37058002>
2. Wenk M, Klühspies J, Blow L, et al. Maglev: Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. The International Maglev Board [Internet]. [cited 2018]. Available from <http://www.maglevboard.net/en/research>
3. Винокуров В.А., Галенко А.А., Горелов А.Т., Фиронов А.Н. Транспортные системы с магнитным подвешиванием и линейным электроприводом. В кн.: Машиностроение. Энциклопедия/Подвижной состав железных дорог. Т. IV-23/ Под ред. П.С. Анисимова. – 2008. – С. 591–643. [Vinokurov VA, Galenko AA, Gorelov AT, Fironov AN. Transportnye systemy s magnitnym podveshivaniem i lineinym elektroprivodom. In: Anisimov PS. editor. Mashinostroenie. Enciklopedia/Podviznoy sostav zeleznych dorog. V. IV-23; Moscow, 2008, pp. 591-643. (In Russ.)].
4. Винокуров В.А., Галенко А.А., Горелов А.Т., Фиронов А.Н. Транспорт на новых технологических принципах. – М., МИИТ, 2004, в 2-х частях, часть 1. – 185 с. часть 2 – 140 с. [Vinokurov VA, Galenko AA, Gorelov AT, Fironov AN. Transport na novykh technologicheskikh principah. Moscow, MIIT, 2004, in 2 parts, part 1. 185 p., part 2 – 140p. (In Russ.)].
5. Han H-S, Kim D-S. Magnetic Levitation Maglev Technology and Applications. Springer Science+Business Media Dordrecht 2016, 247с. doi: 10.1007/978-94-017-7524-3
6. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF. Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 17.02.2022. Доступно по: https://b-ok.org/book/2901328/800f1a/?_ir=1

7. Фионов А.Н. Вакуумно-левитационный транспорт: перспектива или тупик? Транспорт Российской Федерации, – № 3(70). – 2017. – С. 46–49. [Fironov AN. Vacuumno-levitacionny transport: perspectiva ili tupic? Transport Russian Federation. 3(70):46-49. [Internet]. (in Russ.)]. Ссылка активна на: 17.02.2022. Доступно по: <http://www.rostransport.com/>
8. Zhang Y, Oster D, Kumada M, et al. Key vacuum technology issues to be solved in evacuated tube transportation. Journal of Modern Transportation. 2011;19(2):110-113 Journal homepage: jmt.swjtu.edu.cn. doi:10.1007/BF03325748
9. Oster D, Kumada M, Zhang Y. Evacuated tube transport technologies (ET3)tm: a maximum value global transportation network for passengers and cargo. Journal of Modern Transportation. 2011;19(1):42-50. Journal homepage: jmt.swjtu.edu.cn. doi:10.1007/BF03325739
10. Галенко А.А. Применение тягового линейного электропривода (ТЛЭП) в транспортных системах различного назначения. Техника железных дорог. Ноябрь – 2016. – № 4(36). – С. 46–49. [Galenko AA. Primenenie tyagovogo lineinogo electropivoda (TLEP) v transportnyh sistemah razlichnogo naznacheniya. *Tehnika zeleznyh dorog* November 2016;4(36):46-49 (in Russ.)]. Ссылка активна на: 17.02.2022. Доступно по: <https://opzt.ru/magazine/zhurnal-np-opzht-tehnika-zhelezyh-dorog-4-36/>
11. Сидяков В.А., Краснов И.В. Монорельсовый транспорт. Проблемы, приоритеты и инновации. Решение транспортного коллапса. Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 4(47). – С. 38–41. [Sidyakov VA, Krasnov IV. Monorelsovy transport. Problemy, phioritety, I innovacii. *Transport Russian Federation*. 2013;4(47):38-41. [Internet]. (in Russ.)]. Ссылка активна на: 17.02.2022. Доступно по: <http://www.rostransport.com/>
12. Liang X, Wang W, Chen F, Fu Q. Research on Key Technologies of Medium Speed Maglev Transportation System. Abstract for The MAGLEV 2018 Conference Russia, St. Petersburg, Together with MTST 2018 Conference, September 5-8, 2018. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349305234_Maglev_2018_-_Abstracts_of_the_24th_International_Conference_in_St_Petersburg_Russian_Federat ion
13. Han H-S, Kim C-H, Lim J, Ha C-W. Latest Advancements in the Urban Maglev ECOBEE. Abstract for The MAGLEV 2018 Conference Russia, St. Petersburg, Together with MTST 2018 Conference, September 5-8, 2018. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349305234_Maglev_2018_-_Abstracts_of_the_24th_International_Conference_in_St_Petersburg_Russian_Federat ion
14. Operating Cost of Incheon Airport Maglev Line Park Doh Co-Authors: B.C. Shin, K.B. Lee, S.K. Ma. Abstract for The MAGLEV 2018 Conference Russia, St. Petersburg, Together with MTST 2018 Conference, September 5 - 8, 2018. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349305234_Maglev_2018_-_Abstracts_of_the_24th_International_Conference_in_St_Petersburg_Russian_Federat ion
15. Stephan R, De Andrade Junior R, Ferreira A, et al. Maglev-cobra: an urban transportation system For highly populated cityes. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):16-25. doi: 10.17816/transsyst20151216-25
16. Zhao C, Feng Y, Liu D, Ren X. Dynamic Mechanical Behaviors of Secondary Air Spring Suspension of High-Speed Maglev Vehicles Running over the Curve Track. Abstract for The MAGLEV 2018 Conference Russia, St. Petersburg, Together with MTST 2018 Conference, September 5-8, 2018. Available from:

- https://www.researchgate.net/publication/349305234_Maglev_2018_-_Abstracts_of_the_24th_International_Conference_in_St_Petersburg_Russian_Federation
17. Gao S, Liang X, Wang W. Research on Dynamic Characteristic of MultiSpan Continuous Steel Turnout Beam in Medium Maglev Transportation System. Abstract for The MAGLEV 2018 Conference Russia, St. Petersburg, Together with MTST 2018 Conference, September 5-8, 2018. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349305234_Maglev_2018_-_Abstracts_of_the_24th_International_Conference_in_St_Petersburg_Russian_Federation
 18. Li J, Wang P, Wang YG, et al. Construction and Equipment Configuration of Beijing Urban Maglev Commercial Line (S1 line) Abstract for The MAGLEV 2018 Conference Russia, St. Petersburg, Together with MTST 2018 Conference, September 5-8, 2018. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349305234_Maglev_2018_-_Abstracts_of_the_24th_International_Conference_in_St_Petersburg_Russian_Federation
 19. Application of Low-Dynamic-Interaction Levitation Frame to Medium-Low Speed Maglev Vehicle. Zhang Min. Co-Authors: Ma Weihua, Gao Chang, Luo Shihui. Abstract for The MAGLEV 2018 Conference Russia, St. Petersburg, Together with MTST 2018 Conference, September 5 - 8, 2018. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349305234_Maglev_2018_-_Abstracts_of_the_24th_International_Conference_in_St_Petersburg_Russian_Federation
 20. Zhao C, Zhao C, Yang F, et al. Modeling and Simulation of Coupling Vibration between Medium-Low Speed Maglev Vehicle and Switch Beam. Abstract for The MAGLEV 2018 Conference Russia, St. Petersburg, Together with MTST 2018 Conference, September 5-8, 2018. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349305234_Maglev_2018_-_Abstracts_of_the_24th_International_Conference_in_St_Petersburg_Russian_Federation
 21. Xiang X, Long Z, Liang X, Wang W-L. Study on Bogies Anti-rolling and Decoupling Characteristics of 160km/h Medium-speed Maglev Train. Abstract for The MAGLEV 2018 Conference Russia, St. Petersburg, Together with MTST 2018 Conference, September 5-8, 2018. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349305234_Maglev_2018_-_Abstracts_of_the_24th_International_Conference_in_St_Petersburg_Russian_Federation
 22. Галенко А.А., Горелов А.Т., Коновалов В.В., Фиронов А.Н. Городской монорельс и модернизация Московской монорельсовой транспортной системы на основе магнитной левитации и линейного электропривода. Транспортные стратегии XXI век. – 2021. – № 46. – С. 9–18. [Galenko AA, Gorelov AT, Konovalov VV, Fironov AN. Gorodskoy monorels I modernizacia Moskovskoy monorelsovoy transportnoy systemy. *Transportnye strategii XXI vek*. 2021;(46):9-18. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 17.02.2022. Доступно по: <http://www.sovstrat.ru/journals/transportnaya-strategiya-21-vek/numbers/nom-trans-46-2021.html>
 23. Вакуленко С.П., Роменский Д.Ю., Мнацаканов В.А. и др. Разработка вариантов модернизации Московской Монорельсовой Транспортной Системы. Метро и тоннели. – 2020. – № 4. – С. 28–35. [Vaqlenko SP, Romensky DY,

Mnatsakanov VA, et al. Razrabotka variantov modernizatsii Moskovskoy monorelsovoy transportnoy systemy. *Metro i tonnelly*. 2020;(4):28-35. (In Russ.)).
Ссылка активна на: 17.02.2022. Доступно по:
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44324240>

Сведения об авторах:

Фионов Анатолий Николаевич, к.т.н., доцент;
eLibrary SPIN: 2477-7313; ORCID: 0000-0003-2683-9958;
E-mail: tyml2341@yandex.ru

Костенко Алексей Сергеевич, студент;
eLibrary SPIN: 2477-7324;
E-mail: a-kostenko@bk.ru

Information about the authors:

Anatoly N. Fironov, PhD, associate professor;
eLibrary SPIN: 2477-7313; ORCID: 0000-0003-2683-9958;
E-mail: tyml2341@yandex.ru

Alex S. Kostenko, student;
eLibrary SPIN: 2477-7324;
E-mail: a-kostenko@bk.ru

Цитировать:

Фионов А.Н., Костенко А.С. Динамическая модель Московской монорельсовой транспортной системы с применением магнитолевитационной технологии // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 67–85. doi: 10.17816/transsyst20228167-85

To cite this article:

Fironov AN, Kostenko AC. Dynamic model of the Moscow monorail transport system using magnetolevitation technology. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(1):67-85. doi: 10.17816/transsyst20228167-85

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК [UDC] 625.122

DOI 10.17816/transsyst20228186-98

© С.Я. Луцкий¹, А.А. Лычковский¹, А.Я. Ландсман²

¹ Российский университет транспорта (МИИТ)

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(Москва, Россия)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ СООРУЖЕНИЯ ДОРОЖНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Обоснование: Многолетние деформации геотехнических сооружений на слабых основаниях и болотах приводят к необходимости разработки новых строительных технологий, повышающих несущую способность грунтов. Существующие нормы проектирования железных и автомобильных дорог ориентированы в основном на обеспечение безопасности земляного полотна на стадии эксплуатации. Между тем, риски потери устойчивости и стабильности участков дорог возникают и на стадии строительства, особенно при работе мощной тяжёлой строительной техники и оборудования.

Цель: Формирование технико-технологической системы, функционирующей на принципах прямой и обратной связи между характеристиками возводимого земляного полотна и параметрами строительной техники для обеспечения безопасности и качества производства работ.

Методы: Технологическое регулирование нагрузок и воздействий строительных машин и оборудования при упрочнении основания и возведении насыпей земляного полотна.

Результаты: Разработан состав комплексной технологии и режим регулирования строительных нагрузок для повышения несущей способности слабых грунтов в основании земляного полотна железных и автомобильных дорог. Определены особенности геотехнического мониторинга для направленного улучшения прочностных характеристик грунтов в строительный период. Показана целесообразность технологического регулирования нагрузок и воздействий строительных машин, оборудования при сооружении земляного полотна.

Заключение: Комплексная технология повышения несущей способности слабого основания земляного полотна состоит в последовательном применении регулируемых режимов интенсивного воздействия на каждый слой основания максимально допустимой нагрузкой при геотехническом мониторинге.

Ключевые слова: земляное полотно, интенсивная технология, технологическое регулирование, строительство дорог.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© S.Y. Lutskiy¹, A.A. Lychkovskiy¹, A.Y. Landsman²

¹ Russian university of transport (MIIT)

² Moscow automobile and road construction state technical university
(Moscow, Russia)

TECHNOLOGICAL REGULATION AND MONITORING OF ROADBED CONSTRUCTION

Background: Long-term deformations of hydraulic structures on weak foundations and swamps lead to the need to develop new construction technologies that increase the bearing capacity of soils. The existing standards for the design of railways and highways are mainly focused on ensuring the safety of the roadbed at the operational stage. Meanwhile, the risks of loss of stability and stability of road sections also arise at the construction stage, especially when powerful heavy construction machinery and equipment are operating.

Aim: Formation of a technical and technological system functioning on the principles of direct and feedback between the characteristics of the constructed roadbed and the parameters of construction equipment to ensure the safety and quality of work.

Methods: Technological regulation of loads and impacts of construction machinery and equipment during the strengthening of the foundation and the construction of embankments of the roadbed.

Results: The composition of the complex technology and the regime of regulation of construction loads have been developed to increase the bearing capacity of weak soils at the base of the roadbed of railways and highways. The features of geotechnical monitoring for the directed improvement of the strength characteristics of soils during the construction period are determined. The expediency of technological regulation of loads and impacts of construction machinery, equipment during the construction of the roadbed is shown.

Conclusion: The complex technology of increasing the load-bearing capacity of the weak foundation of the roadbed consists in the consistent application of regulated modes of intensive impact on each layer of the foundation with the maximum permissible load during geotechnical monitoring.

Key words: roadbed, intensive technology, technological regulation, road construction

ВВЕДЕНИЕ

Геотехническое строительство на слабых грунтах и болотах связано с риском потери стабильности основания и устойчивости объекта при производстве работ, особенно под динамическими нагрузками мощной строительной техники. Причины состоят в неоднородности характеристик, изменении схемы нагрузок от строительных машин для незавершенных сооружений, особенно насыпей. Вероятность неравномерных осадок и, как следствие, предельное состояние грунтовых массивов может возникнуть на переувлажненных участках и косогорах, при сезонном изменении

гидрологии и др. Участки трассы с деформациями, как правило, становятся «больными» местами дорог в эксплуатационный период. Для таких объектов в сложных инженерных условиях строительства особенно актуальны требования Технического регламента о безопасности зданий и сооружений [1], в соответствии с которым безопасность объекта должна быть доказана и сопровождаться геотехническим мониторингом на всех стадиях жизненного цикла. В нормах [2, 3] регламентированы параметры, при которых конструкции и основания проектируемого здания или сооружения не достигнут предельного состояния по прочности и устойчивости. Между тем фундаментальные труды по земляному полотну [4, 5] и механике грунтов [6, 7] не рассматривают технологическое изменение физико-механических характеристик грунтов в ходе строительства.

НАЗНАЧЕНИЕ И СОСТАВ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Выбор технологических параметров возведения насыпей должен включать проверку допустимой скорости нагрузки на слабое основание при производстве земляных работ с учетом порового давления, различия в прочностных характеристиках грунтов в дренированном и неконсолидированном состояниях.

Упрочнение оснований земляного полотна на болотах выполняют с применением трехэтапной технологии: 1) устройство траншеи для удаления торфа, отсыпка или намыв песчаного массива; 2) уплотнение основания; 3) уплотнение верхней части массива и насыпи. На каждом этапе организуют контроль безопасности технологических нагрузок и сроков консолидации грунтов (Рис.1).

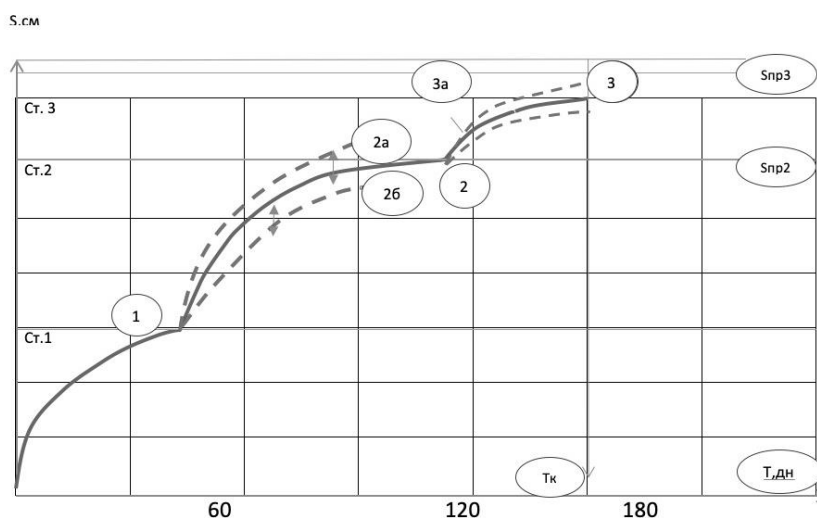


Рис. 1. Этапы консолидации основания насыпи на участке вырезки и замены слабых грунтов

Ст.1 – отсыпка песчаного массива в траншею с погружением на минеральное дно;

Ст.2 – глубинное уплотнение песчаного массива;

Ст.3 – виброуплотнение верхней зоны; Sпр – проектная осадка; Тк – срок консолидации основания

Первый технологический этап выполняется мехколоннами с участием субподрядных подразделений для буровзрывных и гидромеханизированных работ по общему календарному плану. Взаимосвязанные экскаваторные и буровзрывные работы необходимы для доставки карьерного песка и вытеснения находящихся под давлением болотных масс. На слабых основаниях первый этап включает интенсивную технологию упрочнения слабых оснований, в том числе устройство поперечных дренажных прорезей (к водоотводной канаве), защитного слоя и упрочнение основания через защитный слой. В соответствии с рекомендациями [8] для эффективного уплотнения основания, особенно с коэффициентом 0,95–0,98, работы следует выполнять с нагрузками, близкими к пределу прочности грунтов с учетом прироста коэффициента динамичности и контактных напряжений.

На втором и третьем этапах для уплотнения песчаного массива следует применить максимально допустимые технологические нагрузки машинами ударно-импульсного действия (типа Terra-Mix) и тяжелыми виброкатками. Именно в этом технологическом процессе возникает риск превышения безопасной для основания нагрузки. Этапы не гарантируют стабильность основания в связи с неоднородностью структуры слоев, которая может привести к остаточным деформациям в связи с изменениями характеристик грунтов в ходе работ из-за повышения влажности и динамического воздействия, особенно при нерегулируемых процессах.

Параметры и продолжительность работы машин следует регулировать в зависимости от состояния стабильности слабых грунтов при непрерывной диагностике напряженно-деформированного состояния насыпи и контроле процессов консолидации слабых грунтов в режиме реального времени.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

По требованиям безопасности при повышенных нагрузках и предельном состоянии грунтов необходим технологический мониторинг в реальном масштабе времени [4, 9]. Режим интенсивной технологии уплотнения [10, 11] предполагает возможность поэтапного увеличения нагрузок для ускорения консолидации слабого основания.

Опыт работ ООО «Трансстроймеханизация» [12] на строительстве автодороги М-11 в 2015-16гг показал необходимость сопровождения работ геотехническим мониторингом на каждом этапе. Замена слабых грунтов, погружение на дно и уплотнение песчаного массива на участке трассы М-11 (км 356 – км 357) были выполнены с применением буровзрывного метода и виброкатками тремя изложенными выше технологическими

этапами. По техническому заданию подрядчика было проведено геотехническое обследование сложных участков земляного полотна, выполненное ООО НПП «Инжгеофизика».

Для оценки результатов уплотнения песчаного массива были организованы геофизические исследования – сейсмотомография и электротомография поэтапного изменения литологии и деформационных характеристик грунтов. По результатам сейсмотомографии [6, 13] по разрезам массива определены скорости продольных и поперечных волн, значения которых позволили установить распределение коэффициента Пуассона μ :

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

где V_p , V_s – соответственно скорости продольных и поперечных волн при сейсмотомографии.

В разрезах массива (Рис. 2) показаны фрагменты площадей S_{sp} , соответствующие значениям коэффициента Пуассона (по [14] при отсутствии экспериментальных данных эти значения допускается принимать равными: 0,30–0,35 – для песков и супесей; 0,35–0,37 – для суглинков; 0,38–0,45 при $0,25 < IL < 1,0$ – для глин, верхняя граница соответствует водонасыщенным грунтам). По всем трем этапам наблюдается последовательное снижение значений коэффициента Пуассона и соответственно увеличение объема песчаной фракции грунтов. Такая динамика показывает уплотнение и осадку песчаного массива.

Статистический анализ позволил установить регрессионные зависимости и устойчивую тенденцию снижения коэффициента Пуассона на всех трех технологических этапах (Рис. 3, Табл.).

Таблица. Деформационные характеристики основания земляного полотна по этапам замены слабых грунтов

	1 этап	2 этап	3 этап
Коэффициент Пуассона $K_{\mu c}$ (ср. взвешенное значение)	0,409	0,373	0,36
Коэффициент регрессии R	0,047	0,67	0,76
Модуль деформации E_c , МПа	17,79	25,81	32,92
Модуль сдвига G_c , МПа	6,493	9,716	12,53

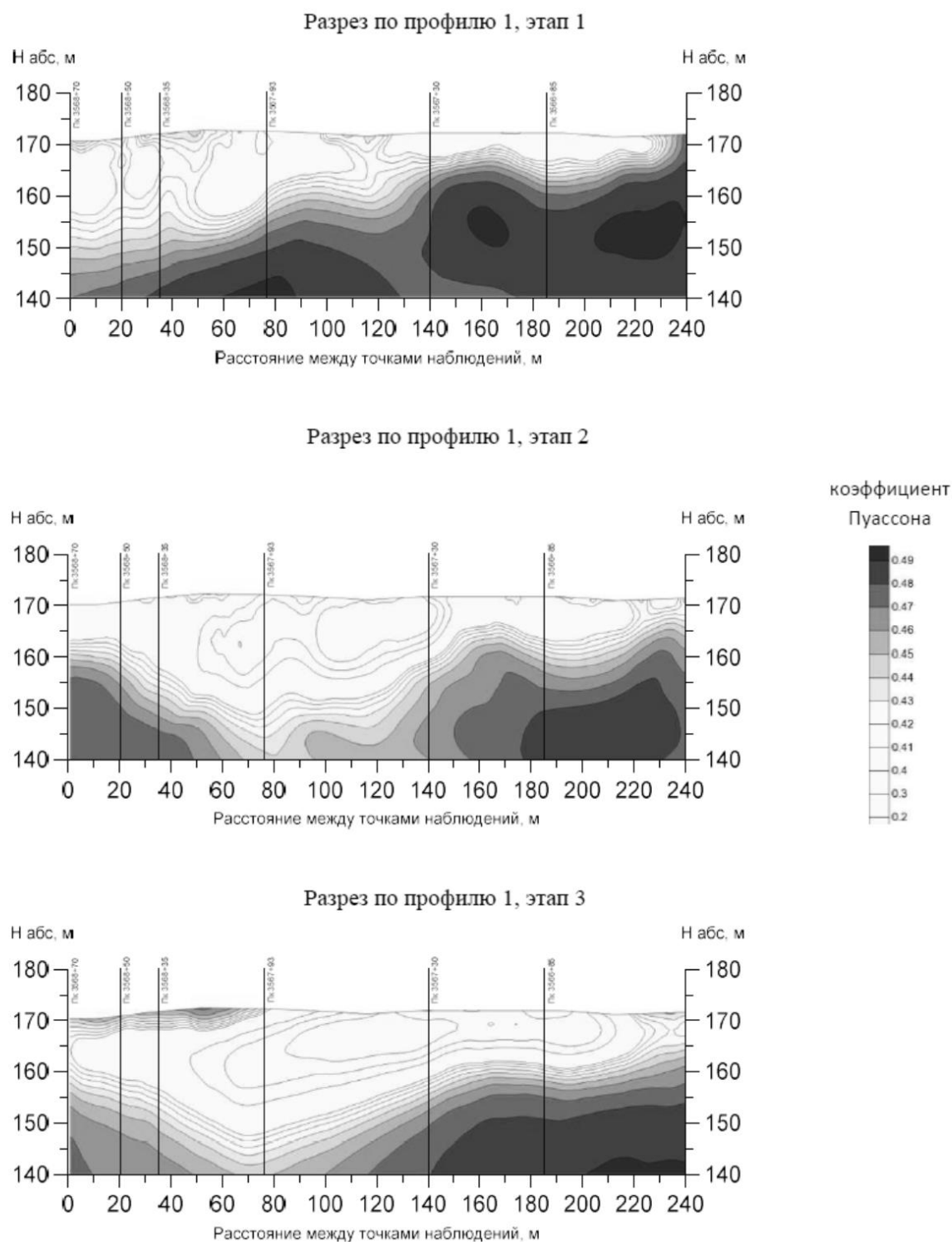


Рис. 2. Разрезы грунтового массива с распределением коэффициента Пуассона по технологическим этапам

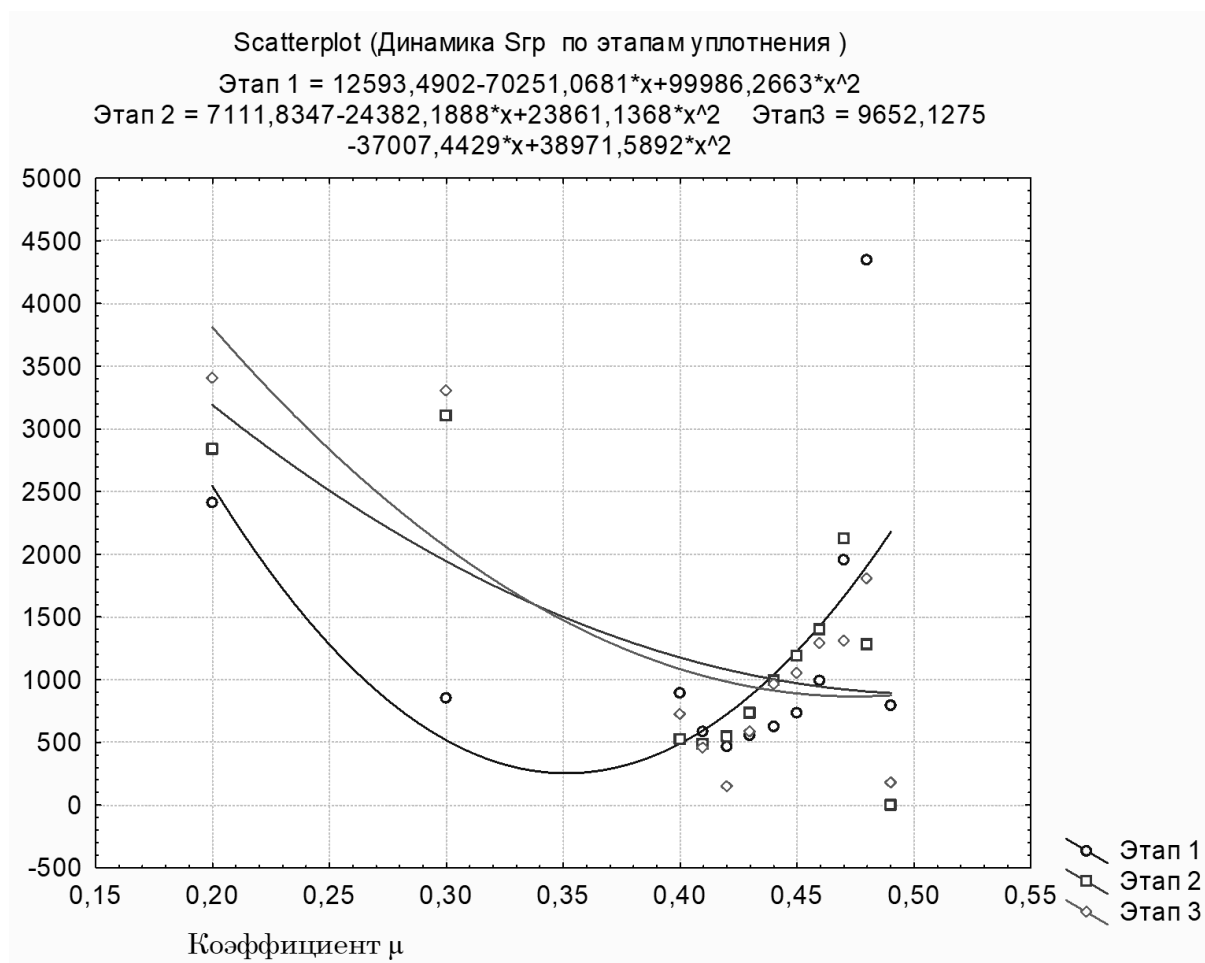


Рис. 3. Распределение площадей разрезов массива $S_{гр}$, m^2 по этапам уплотнения

Уплотнение и технологическое регулирование нагрузки последовательно по этапам повышают однородность состава грунтов и стабильность основания под нагрузкой. Для поэтапной оценки изменения литологии массива в каждом разрезе была введена комплексная характеристика – средневзвешенное значение коэффициента Пуассона:

$$K_{\mu c} = \frac{\sum \mu_i \cdot S_{гpi}}{\sum S_{гpi}}, \quad (2)$$

где $S_{гpi}$ – часть площади $S_{гр}$ в разрезе массива с i -м значением коэффициента μ , которая соответствует определенному виду грунтов.

Снижение значений комплексной характеристики $K_{\mu c}$ за три этапа в 1,14 раза подтверждает последовательное замещение песком слабых водонасыщенных грунтов. Более точный результат по этой методике может быть получен, если геофизические исследования позволяют разделить массив на объемные части.

Для оценки деформационных свойств основания определим относительное изменение характеристик всего песчаного массива (в дополнение к точечным лабораторным и полевым исследованиям грунтов) с учетом связи модулей деформации E и сдвига грунта G :

$$G = \frac{E}{2 \cdot (\mu + 1)}$$

Анализ поэтапной динамики средневзвешенных значений нормативного модуля E_c и расчетного модуля G_c [2] показал последовательное по трем технологическим этапам улучшение деформационных и сдвиговых характеристик массива (Табл.). Перейдем к расчету осадки на этапах комплексной технологии:

$$S_{гр} = 0,8 \sum \frac{Q_{kt} \cdot H_k}{E_{ckt}} \quad (3)$$

где Q_{kt} - технологическая нагрузка; H_k , E_{ckt} - толщина и модуль деформации k -го слоя.

Такой расчет совместно с полевыми испытаниями [5, 15] позволит учитывать слои сложной конфигурации и более точно определить неоднородность основания в расчетах стабильности и деформаций. Вместе с тем на каждом этапе следует контролировать и при необходимости регулировать технологическую и транспортную нагрузку строительных машин. Следует учитывать потенциальные опасности: 1) превышение проектной крутизны откоса или подрезка склона, находящегося в состоянии, близком к предельному; 2) изменение технологической нагрузки и соответственно расчетной схемы устойчивости (перемещение строительных машин, распределение земляных масс и др.); 3) изменение УГВ, влажности и соответственно прочностных характеристик, прогрессирующая ползучесть. Непрерывному изменению технологических нагрузок и воздействий должны соответствовать операционный контроль и прогнозирование хода консолидации грунтов в режиме реального времени [16, 13].

Оценку отклонений фактического хода осадки от проектного тренда и прогноз очередного технологического этапа выполним с применением экспоненциального скользящего среднего [15]. Прогнозное значение осадки S_{ct} определяется по рекурсивной формуле:

$$S_{ct} = K_t \cdot S_{ct-1} + (1 - K_t) \cdot S_{гр,t}, \quad (4)$$

где S_{ct} , S_{ct-1} – соответственно, значение экспоненциального скользящего среднего осадки участка земляного полотна для текущего и предыдущего периода;

$S_{гр, t}$ – контрольное (измеренное) значение осадки участка земляного полотна в результате уплотнения последнего слоя насыпи или прохода виброкатка по площади участка;

K_t – регулирующий коэффициент влияния нового текущего значения осадки на общую динамику. Его величину целесообразно принять равной коэффициенту уплотнения в t -м цикле. Это позволит учитывать в прогнозе последние контрольные результаты осадки (после каждого контрольного этапа - уплотненного слоя) с большей достоверностью, чем данные предыдущих измерений. Зависимость осадки S_{ct} во времени имеет доверительный интервал (Рис. 1).

Контрольные и прогнозные значения осадки следует сопоставить с проектными и нормативными требованиями по стабильности основания после каждой рабочей смены и по предельным деформациям насыпи после уплотнения каждого слоя. Динамическая нагрузка от виброкатка при уплотнении основания не должна превышать безопасный предел:

$$\min[Q_{пр}, Q_{б}, Q_{mc}]_t \geq Q_{k,t}(A_t, V_t, v_t) \quad (5)$$

где $Q_{пр}$ – предел прочности песчаного слоя; $Q_{б}$ – безопасная нагрузка для верхнего слоя по сдвигу; Q_{mc} – предельно допустимая по риску тиксотропии вибронагрузка; $Q_{k,t}$ – нагрузка от катка, зависящая от веса, скорости движения V_t , амплитуды A_t , частоты v_t вибровальца в t -й период интенсивной технологии [9].

Рассмотрим технологический режим виброуплотнения и возможные отклонения осадки S_{ct} от графика схемы-модели (Рис. 1).

1) Осадку превышает верхнюю границу доверительного интервала зависимости S_{ct} , следовательно, расчетная вибронагрузка при уплотнении выше безопасного для грунтов значения $Q_{б}$. Причина может состоять в недостаточном учете деформационных характеристик грунтов, их влажности и др. Состояние грунтов может перерасти в прогрессирующую ползучесть с риском потери устойчивости насыпи, необходимо регулирование (уменьшение) нагрузки. Для механизации работ целесообразно использовать эксплуатационные возможности современных виброкатков, оборудованных системами оперативного контроля качества уплотнения и бесступенчатого изменения амплитуды и частоты вибрации. Более того, современные модели машин (например, фирм Bomag, Дунарак и др.) позволяют при нарушениях заданных параметров технологического режима немедленно снизить нагрузку, перейти в режим осцилляции или остановить работу.

2) Осадка меньше нижней границы доверительного интервала, что может быть следствием порового давления и увеличить сроки консолидации. Эти изменения должны показать датчики порового давления. После его стабилизации следует рассчитать новое повышенное значение нагрузки $Q_{k,t}$.

3) Перманентное колебание, отклонение значений среднего значения осадки S_{ct-1} за пределы доверительного интервала может быть следствием неоднородности массива по структуре и характеристикам грунтов (литология, состав фракций, влажность, плотность). Исследования качества виброуплотнения грунтов при неоднородной структуре основания [12] показали повышение риска предельной нагрузки.

Для оценки таких колебаний следует рассчитывать коэффициент вариации $C_{vt} = \sigma_t / S_{ct}$ по формуле аналогичной (4), его величина должна монотонно уменьшаться.

Величины Q_{np} , Q_6 и Q_{mc} определяют в зависимости от прочностных характеристик каждого слоя грунта, которые изменяются в технологическом цикле уплотнения основания. Технологический режим уплотнения верхнего нестабильного слоя основания виброкатком связан с необходимостью двух проверок с учетом коэффициента надежности: 1) нагрузка от катка не должна превышать максимальную допустимую нагрузку для стабильности грунтов в основании; 2) величина ускорения колебаний при работе виброкатка, распространяющаяся в толще грунта, не должна превышать критического ускорения по риску появления тиксотропных изменений.

Максимальная технологическая нагрузка должна быть принята равной допустимому значению безопасной нагрузки, рассчитанной по формуле (5) для всех слоев основания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Интенсивное уплотнение основания предназначено для улучшения прочностных характеристик и снижения влажности грунтов. Особенность интенсивной технологии состоит в уплотнении грунтов и отжати воды в режиме максимально допустимых нагрузок. Режим работы катков следует уточнять по результатам испытаний грунтов и расчета коэффициента стабильности каждого слоя основания.

2. Расчет параметров интенсивных технологических режимов должен быть основан на оценке взаимосвязи физико-механических характеристик и технологических нагрузок. Регулирование технологических нагрузок до максимально допустимого для грунтов размера в сочетании с мониторингом в режиме реального времени повышает прочностные характеристики основания насыпей.

3. Технологический эффект состоит в уменьшении сроков консолидации грунтов за счет регулируемых режимов интенсивного воздействия на каждый слой основания земляного полотна максимально допустимой нагрузкой под контролем порового давления. Применение комплексной технологии на участке строительства автодороги М-11 показало возможность ускорения консолидации слабых оснований, сокращения срока строительства и получения экономического эффекта при вводе в эксплуатацию.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Федеральный закон Российской Федерации №384-ФЗ от 23 декабря 2009 г. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». [Federal Law of Russian Federation №384-FZ of 23 December 2009. "Tehnicheskii reglament o bezopasnosti zdanii i soorujenii". (In Russ.)]. Ссылка активна на: 14.01.2022. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/
2. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М.: 2016. – 160 с. [SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdanii i soorujenii. Moscow; 2016. 160 p. (In Russ.)].
3. СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. – М.: 2015. – 71 с. [SP 238.1326000.2015. Jeleznodorojnii put. Moscow; 2015. 71 p. (In Russ.)].
4. Ашпиз Е.С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог. – М.: Путь-пресс, 2002. – 112 с. [Ashpiz ES. Monitoring zemlyanogo polotna pri ekspluatatsii jeleznih dorog. Moscow: Put-press; 2002. 112 p. (In Russ.)].
5. Цытович Н. А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с. [Citovich NA. Mehanika gruntov. Moscow: Visshaya shkola, 1983. – 288 p. (In Russ.)].
6. Крамаренко В.В. Грунтоведение. – М.: Studme, 2017. – 430с. [Kramarenko VV. Gruntovedenie. Moscow: Studme; 2017. 430 p. (In Russ.)].
7. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с. [Shahunyanc GM. Jeleznodorojnii put. Moscow: Transport; 1987. 479 p. (In Russ.)].
8. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1975. – 288 с. [Harhuta NYa, Vasilev YuM. Prochnost, ustoichivost i uplotnenie gruntov zemlyanogo polotna avtomobilnih dorog. Moscow: Transport; 1975. 288 p. (In Russ.)].
9. Лычковский А.А., Луцкий С.Я., Ландсман А.Я., Навроцкая Н.В. Диагностика морозного влагонакопления и технологическое регулирование сооружения земляного полотна // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 61–69. [Lichkovskii AA, Luckii SY, Landsman AY, Navrockaya NV. Diagnostics of frost water accumulation and technological regulation of the construction of the roadbed. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(2):61-69. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20206261-69
10. Патент РФ на изобретение № 2273687/ Заявл. 24.02.2005; опубл.10.04.2006. – 2005. С.Я. Луцкий [и др.] Дорожное полотно и способ его возведения. [Pat. RUS № 2273687/ Zayavl. 24.02.2005; opubl.10.04.2006. – 2005. S.Y. Luckyi [i dr.] Dorojnoe polotno i sposob ego vozvedeniya. (In Russ.)]. Ссылка активна на

14.01.2022. Доступно по: <https://www.freepatent.ru/patents/2273687>

11. Рекомендации по интенсивной технологии и мониторингу строительства земляных сооружений на слабых основаниях. – М.: Тимп, 2005. – 96 с. [Rekomendacii po intensivnoj tekhnologii i monitoringu stroitel'stva zemlyanyh sooruzhenij na slabых osnovaniyah. Moscow: Timr; 2005. 96 p. (In Russ.)].
12. Луцкий С.Я., Сакун Б.В. Теория и практика транспортного строительства.- М.: Первая образцовая типография, 2018. – 304с. [Luckiy SY, Sakun BV. Teoriya i praktika transportnogo stroitel'stva. Moscow: Pervaya obrazcovaya tipografiya, 2018. 304 p. (In Russ.)].
13. Ausilio E, Conte E, Dente G. Stability analysis of slopes reinforced with piles. *Computers and Geotechnics*. Elsevier BV; 2001;28:591-611. doi: 10.1016/s0266-352x(01)00013-1
14. ГОСТ 12248-96 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Издательство стандартов, 2005. – 69 с. [GOST 12248-96 Grunti. Metodi laboratornogo opredeleniya harakteristik prochnosti i deformiruемости. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 2005. 69 p. (In Russ.)].
15. Liu JK, Peng L. Experimental Study on the Unconfined Compression of a Thawing Soil. *Cold Regions Science and Technology*. Elsevier BV; 2009;58:92-96. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.03.008
16. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Ромен Ю.С., Данилов А.В. Использование широкополосной сейсмической аппаратуры в задачах интеллектуального мониторинга земляного полотна железнодорожного пути // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 96–114. [Antonovskaya GN, Kapustyan NK, Romen YuS, Danilov AV. Ispolzovanie shirokopolosnoi seismicheskoi apparatury v zadachah intellektualnogo monitoringa zemlyanogo polotna jeleznodorojnogo puti_ Transportnie sistemi i tehnologii. 2019;5(4):96-114. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20195496-114

Сведения об авторах:

Луцкий Святослав Яковлевич, д. т. н., профессор;
eLibrary SPIN:2475-5149; ORCID: 0000-0002-0124-6497;
E-mail: lsy40@mail.ru

Лычковский Александр Александрович, аспирант;
eLibrary SPIN: 2671-9305; ORCID:0000-0002-2663-0508;
E-mail: Alexander_L12@mail.ru

Ландсман Анатолий Яковлевич, д. э. н., профессор;
eLibrary SPIN: 9901-5851; ORCID:0000-0002-9474-7337;
E-mail: map@sdm.ru

Information about the authors:

Svyatoslav Y. Lutskiy, Dr. of engineering, professor;
eLibrary SPIN:2475-5149; ORCID: 0000-0002-0124-6497;
E-mail: lsy40@mail.ru

Alexander A. Lychkovskiy, postgraduate;
eLibrary SPIN: 2671-9305; ORCID:0000-0002-2663-0508;
E-mail: Alexander_L12@mail.ru

Anatoliy Y. Landsman, Dr. of economics, professor; head of the department of the Moscow automobile and road construction state technical university (MADI);
eLibrary SPIN: 9901-5851; ORCID:0000-0002-9474-7337;
E-mail: map@sdm.ru

Цитировать:

Луцкий С.Я., Лычковский А.А., Ландсман А.Я. Технологическое регулирование и мониторинг сооружения дорожного земляного полотна // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 86–98. doi: 10.17816/transsyst20228186-98

To cite this article:

Lutskiy SY, Lychkovskiy AA, Landsman AY. Technological regulation and monitoring of roadbed construction. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(1):86-98. doi: 10.17816/transsyst20228186-98

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Транспортные системы

УДК [UDC] 656.211.5

DOI 10.17816/transsyst20228199-114

© А.Г. Филиппов, С.С. Смирнов, Д.А. Полиэктов, Г.Л. Васильев

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОТРЕБНОГО КОЛИЧЕСТВА УСТРОЙСТВ ДОСМОТРА ОТ ИХ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И ПАССАЖИРОПОТОКА

Обоснование: На сегодняшний день в крупных пассажирских зданиях сложилась ситуация, при которой не обеспечивается потребная пропускная способность. Данная проблема возникла в результате приведения зданий в соответствие с требованиями закона «О транспортной безопасности» и остается актуальной и требует решения.

Цель: Определить зависимость между количеством технических средств обеспечения транспортной безопасности для досмотра пассажиров (далее – ТС ОТБ), скоростью обслуживания ими пассажиров и входящим пассажиропотоком. Разработать рекомендации по изменению нормативно-правовой базы в области обеспечения транспортной безопасности. Оценить целесообразность применения ТС ОТБ на существующих объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта с учетом потребной пропускной способности пассажирских устройств.

Методы: Исследование основано на теории многоканальных систем массового обслуживания с неограниченной очередью. В основе расчетов положено обоснованное допущение, что пиковые пассажиропотоки, проходящие через пассажирские устройства, являются стационарными.

Результаты: Установлена зависимость между количеством ТС ОТБ, их пропускной способностью и количеством, а также длиной очереди в ожидании прохода через указанные устройства в пассажирское здание.

Заключение: Полученные результаты могут быть использованы в качестве технико-экономического обоснования количества ТС ОТБ, устанавливаемых на входе в пассажирское здание в ходе строительства, реконструкции или модернизации. Для существующих зданий, полученная зависимость позволит установить, имеется ли техническая возможность обеспечить потребную пропускную способность вокзала, или потребуются большие капитальные вложения на его реконструкцию.

Ключевые слова: пассажирское здание, пропускная способность, транспортная безопасность, система массового обслуживания, технико-экономическое обоснование, пассажиропоток, очередь.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Transport systems

© A.G. Filippov, S.S. Smirnov, D.A. Poliektov, G.L. Vasiliev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(St. Petersburg, Russia)

**THE CORRELATION BETWEEN THE NUMBER
OF SECURITY SCANNING DEVICES, THEIR CAPACITY
AND PASSENGER TRAFFIC**

Background: There is a situation today where the major passenger buildings are lacking the required passenger traffic capacity. This issue has come about as a result of aligning the requirements of “the Federal Law on Transport Safety” into the buildings’ design. The problem remains relevant and therefore needs to be addressed.

Aim: The paper seeks to examine the correlation between the number of transport safety technical devices for scanning passengers’ bodies and luggage, the device operation time and incoming passenger traffic. This will be done in order to develop recommendations for changing the legislative framework in the field of transport safety and to estimate the advisability of using transport safety technical devices at railway stations, taking into account passenger traffic capacity.

Methods: The study is based on the theory of multi-channel public service system with an unlimited line. The calculations are based on the assumption, that the peak passenger traffic through the passenger devices is stationary.

Results: The paper finds the correlation between the number of transport safety technical devices, their capacity and the length of the line of passengers waiting for passing into the passenger buildings.

Conclusion: The results can be used as a feasibility study of transport safety technical devices, that are installed at the entrance of passenger buildings during their construction, reconstruction or modernization. For the existing buildings the found correlation will help to understand whether it is technically possible to provide the station with the required passenger traffic capacity or it will take capital investments for its reconstruction.

Key words: passenger building, passenger traffic capacity, transport safety, public service system, feasibility study, passenger traffic, line.

ВВЕДЕНИЕ

Пассажи́рские здания во многом определяют качество транспортного обслуживания населения. В них производятся покупка билетов, ожидание посадки на поезд и заключительные операции, связанные с поездкой. В больших городах и крупнейших промышленных центрах сооружаются отдельные, обособленные от грузового движения станции. Это связано с массовостью выполнения операций, связанных с предоставлением необходимых удобств пассажирам и подготовкой поездов к перевозкам [1].

С позиции пассажира, поездка осуществляется в несколько этапов: выбор вида транспорта, покупка билета, ожидание отправления, непосредственно следование в поезде и заключительные операции. Исходя из принципов клиентоориентированности, пассажирские здания должны обеспечивать удобство и скорость покупки билетов, комфортное ожидание отправления и завершение поездки без лишних потерь времени [2].

Принимая во внимание, что пассажиров следует не только обслуживать, но и укрывать от атмосферных осадков и обеспечить им комфортное ожидание отправления, все остановочные пункты должны иметь навесы, павильоны или здания (в зависимости от пассажиропотока) [3].

В пригородном сообщении, за счет сравнительно малой продолжительности следования в поездах, пассажирам более заметны потери времени на вокзалах до и после поездки. Чтобы уменьшить затраты времени, пассажирские устройства должны обеспечивать быстрое, удобное и безопасное выполнение операций, связанных с обслуживанием людей [4].

В 2007 году вступил в силу федеральный закон «О транспортной безопасности», в связи с чем, началась работа по постепенному приведению вокзалов в соответствие с требованиями нормативно-правовых актов в области транспортной безопасности. Результатом данного процесса стало нарушение многих принципов, которыми руководствовались при проектировании пассажирских зданий. Целью исследования, представленного в настоящей статье, является определение зависимости между количеством ТС ОТБ, скоростью обслуживания ими пассажиров и входящим пассажиропотоком, что необходимо для оценки целесообразности и возможности безопасного проведения мероприятий по досмотру пассажиров, ручной клади, багажа и грузобагажа. На основании полученной зависимости разработаны рекомендации по переработке нормативно-правовой базы в области обеспечения транспортной безопасности на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта.

ТРУДНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

С точки зрения закона «О транспортной безопасности», пассажирские здания являются объектами транспортной инфраструктуры (далее – ОТИ) [5]. На ОТИ распространяются требования [6] о размещении на границах сектора свободного доступа, т.е. на входах в здания, пунктов досмотра. Несмотря на отсутствие в документе какой-либо методики расчета количества ТС ОТБ или ссылки на нее, ответственность за обеспеченность ими в достаточном количестве в зависимости от пассажиропотока отнесена на субъекты транспортной инфраструктуры:

перевозчиков, владельца инфраструктуры (далее – СТИ). Отсутствие методики не позволяет учитывать особенности пригородного сообщения: большие пассажиропотоки, высокая их неравномерность по часам суток, дням недели, сезонам и др. [7]. Результатом несовершенства законодательной базы являются скопления пассажиропотока перед входом в здания, отсутствие какого-либо удобства пользования пассажирскими устройствами и т.д., что хорошо видно на Рис. 1.

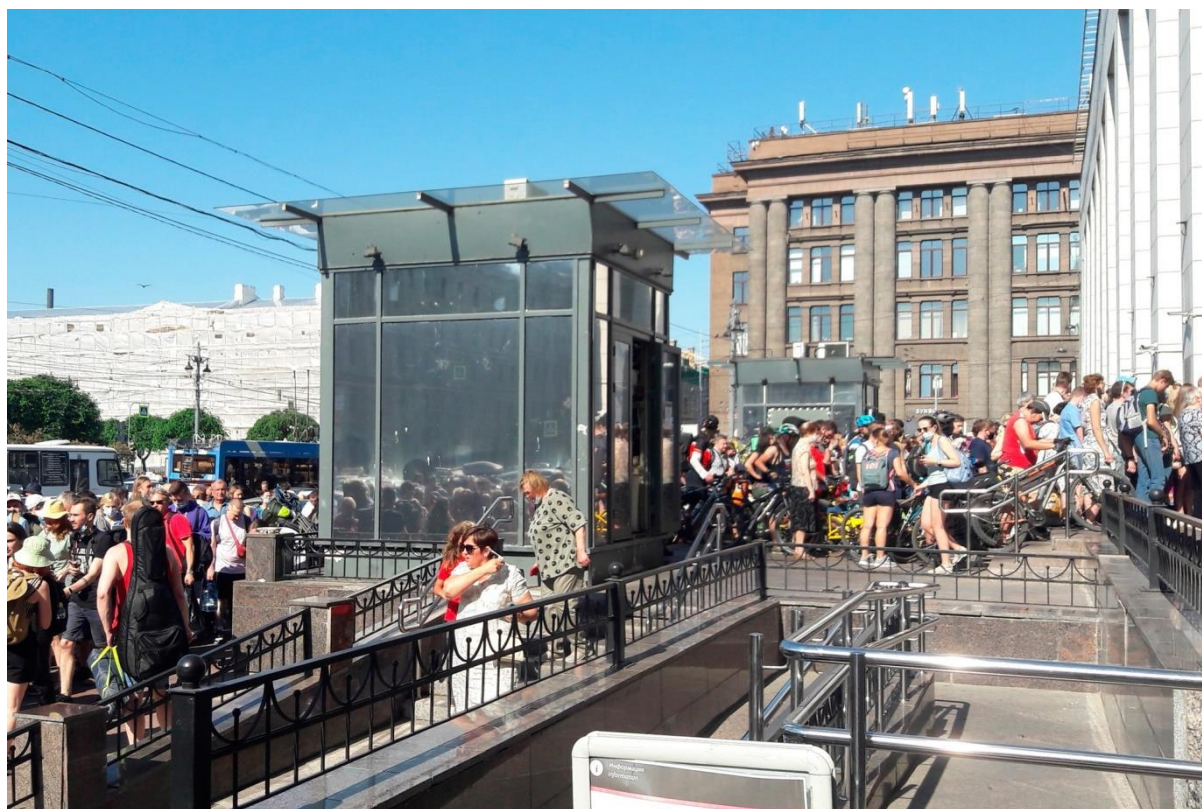


Рис. 1. Скопление пассажиров перед входом в пассажирское здание станции Санкт-Петербург-Финляндский из-за недостаточной пропускной способности ТС ОТБ

По отношению к пригородным перевозкам в [8] предусмотрено исключение – при условии полного разделения пассажиропотоков дальнего и пригородного сообщений, когда действует уровень безопасности № 1, досмотр всех пассажиров пригородного сообщения не обязателен. Но данное исключение практически не применимо, т.к. на пассажирских станциях не всегда предусмотрена специализация путей по дальнему и пригородному сообщениям. Более того, ввиду неравномерности перевозок, специализация путей может не соблюдаться.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ТРЕБУЕМЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ТС ОТБ И ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПАССАЖИРОПОТОКА

С точки зрения теории систем массового обслуживания (далее – СМО), ТС ОТБ по отдельности являются устройствами, образующими вместе систему. Пассажиры, вынужденные пользоваться устройствами этой системы, являются заявками и в совокупности образуют входящий поток заявок, а после использования устройств – выходящий поток. В основе представляемой методики лежит допущение, что входящий поток является стационарным.

Поток заявок называется стационарным, если вероятность поступления определенного количества требований за некоторый промежуток времени зависит только от длины этого промежутка и не зависит от того, где этот промежуток выбран на временной оси.

В действительности, стационарных пассажиропотоков не существует. Однако, при расчете пропускной способности пассажирских устройств следует задаться какой-либо интенсивностью потока. Очевидно, что для возможности пропуска пиковых пассажиропотоков следует проектировать устройства, рассчитанные на максимальную интенсивность пассажиропотока, которая принимается постоянной. А учитывая, что стационарный поток имеет постоянную интенсивность поступления заявок в СМО, пиковый пассажиропоток без особой погрешности может считаться стационарным [9].

Учитывая, что в любой момент времени в систему может поступить только одна заявка (т.к. пассажиры не входят на вокзал одновременно), входящий поток стационарен и ординарен, и такой поток является рекуррентным. Он может быть представлен стационарным пуассоновским потоком. Функция распределения интервалов между заявками этого потока имеет вид

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность потока заявок;

t – промежуток времени, между поступающими заявками.

Дифференцируя, получим плотность распределения интервалов в виде показательного закона распределения

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

В стационарном пуассоновском потоке число заявок, поступивших за промежуток времени t , распределено по закону Пуассона

$$P_k(t) = -\frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

где $P_k(t)$ – вероятность того, что за промежуток времени t поступит ровно k требований.

Математическое ожидание непрерывной случайной величины интервала T между моментами поступления заявок стационарного пуассоновского потока определяется интегралом [10]

$$M(T) = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt, \quad (4)$$

Из (2) и (4) математическое ожидание составит

$$M(T) = \lambda \int_{-\infty}^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = -t e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}, \quad (5)$$

Учитывая, что интенсивность потока – величина обратно пропорциональная интервалу между моментами поступления заявок, из (5) следует

$$\lambda = \frac{1}{M(T)}, \quad (6)$$

Интенсивность потока определяет еще одну важную характеристику многоканальной СМО, состоящей из n устройств – нагрузку. Если поток рекуррентный, а продолжительности обслуживания независимые и одинаково распределенные величины, нагрузка на СМО составит

$$\rho = \frac{\lambda}{n\mu}, \quad (7)$$

где μ – скорость обслуживания;

Интенсивность потока входящих заявок в многоканальную СМО не должна превышать перерабатывающую способность устройств в ней, что определяет условие

$$\rho < 1, \quad (8)$$

Если условие (8) не будет соблюдаться, то очередь будет расти до бесконечности, что по смыслу задачи не допустимо.

Далее речь будет идти о многоканальной СМО с неограниченной очередью. Пассажиры, приходя к вокзалу, вынуждены ожидать возможность попасть в него, в результате чего очередь разрастается до

достаточно больших размеров, что позволяет сделать допущение о неограниченности очереди.

Многоканальная СМО с неограниченной очередью имеет неограниченное число мест в очереди при счетном количестве состояний и может быть изображена графом (Рис. 2).

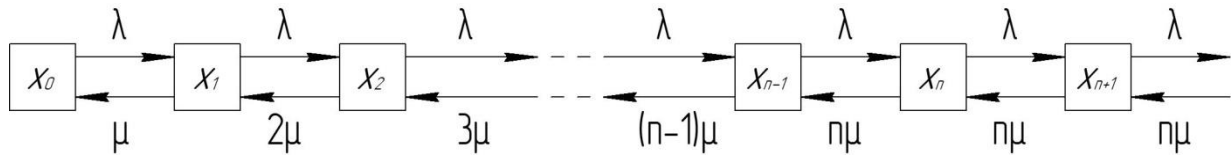


Рис. 2. Граф состояний многоканальной СМО с неограниченной очередью

Все состояния многоканальной СМО с неограниченной очередью образуют полную группу событий, из чего следует, что сумма вероятностей возникновения каждого из состояний равна единице. Это обстоятельство определяет условие нормировки

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1, \quad (9)$$

Основываясь на графе возможных состояний, составим систему уравнений Колмогорова

$$\left\{ \begin{array}{l} p'_0(t) = \mu p_1(t) - \lambda p_0(t); \\ p'_1(t) = \lambda p_0(t) + 2\mu p_2(t) - (\lambda + \mu)p_1(t); \\ \dots \\ p'_k(t) = \lambda p_{k-1}(t) + (k+1)\mu p_{k+1}(t) - (\lambda + k\mu)p_k(t), k = \overline{1, n-1}; \\ \dots \\ p'_n(t) = \lambda p_{n-1}(t) + n\mu p_{n+1}(t) - (\lambda + n\mu)p_n(t); \\ p'_{n+1}(t) = \lambda p_n(t) + n\mu p_{n+2}(t) - (\lambda + n\mu)p_{n+1}(t); \\ \dots \end{array} \right. \quad (10)$$

В стационарном режиме существуют конечные пределы [11]

$$p_k = \lim_{t \rightarrow \infty} p_k(t), \quad (11)$$

Из (11) следует, что

$$p'_k(t) \rightarrow 0, \quad (12)$$

Тогда при стационарном режиме работы СМО система (10) с учетом условия нормировки (9) принимает вид

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \mu p_1 - \lambda p_0; \\ 0 = \lambda p_0 + 2\mu p_2 - (\lambda + \mu)p_1; \\ \dots \\ 0 = \lambda p_{k-1} + (k+1)\mu p_{k+1} - (\lambda + n\mu)p_k, k = \overline{1, n-1}; \\ \dots \\ 0 = \lambda p_{n-1} + n\mu p_{n+1} - (\lambda + n\mu)p_n; \\ 0 = \lambda p_n + n\mu p_{n+2} - (\lambda + n\mu)p_{n+1}; \\ \dots \\ \sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1. \end{array} \right. , \quad (13)$$

Из (13) получаем

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 = (\lambda/\mu)p_0; \\ p_2 = (\lambda/\mu)^2 p_0/2!; \\ \dots \\ p_k = (\lambda/\mu)^k p_0/k!, k = \overline{1, n-1}; \\ \dots \\ p_n = (\lambda/\mu)^n p_0/n!; \\ p_{n+1} = (\lambda/\mu)^{n+1} p_0/(n \cdot n!); \\ \dots \\ \sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1. \end{array} \right. , \quad (14)$$

Уравнение для нахождения предельных вероятностей из (14) приобретает вид

$$p_k = \begin{cases} (\lambda/\mu)^k p_0/k!, k = \overline{1, n}; \\ (\lambda/\mu)^k p_0/(n^{k-n} n!), k > n. \end{cases} \quad (15)$$

Из условия нормировки (9)

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{\infty} p_k &= \sum_{k=0}^n \left(\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} \cdot p_0 \right) + \sum_{k=n+1}^{\infty} \left(\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{n^{k-n} n!} \cdot p_0 \right) = \\ &= p_0 \cdot \left[\sum_{k=0}^n \left(\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} \right) + \frac{n^n}{n!} \sum_{k=n+1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{n\mu} \right)^k \right] = 1, \end{aligned} \quad (16)$$

Условие нормировки выполняется, если ряд (17) сходится

$$\sum_{k=n+1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{n\mu} \right)^k, \quad (17)$$

Ряд (17) является геометрической прогрессией и сходится, если $\lambda < \mu n$, что по смыслу совпадает с условием (8). Т.е. если $\lambda \geq \mu n$, то ряд

расходится и стационарного режима работы СМО не существует ввиду бесконечного роста очереди. При $\lambda < \mu n$, принимая во внимание соотношение (7) сумма ряда (17) исчисляется как сумма всех членов бесконечно убывающей геометрической прогрессии и приобретает вид

$$\sum_{k=n+1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{n\mu}\right)^k = \sum_{k=n+1}^{\infty} \rho^k = \frac{\rho^{n+1}}{1-\rho}, \quad (18)$$

В таком случае из (16) следует:

$$p_0 = \left[\sum_{k=0}^n \left(\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \cdot \frac{1}{k!} \right) + \frac{n^n}{n!} \cdot \frac{\rho^{n+1}}{1-\rho} \right]^{-1} = \left[\sum_{k=0}^n \left(\frac{(n\rho)^k}{k!} \right) + \frac{(n\rho)^n \rho}{(1-\rho)n!} \right]^{-1}, \quad (19)$$

Длина очереди в СМО составляет

$$L = k - n, \quad k > n, \quad (20)$$

Средняя длина очереди определяется как математическое ожидание суммы произведений вероятностей возникновения состояний очереди на количество заявок в этих состояниях

$$L_{оч} = \lim_{t \rightarrow \infty} M(L(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} M\left(\sum_{k=n+1}^{\infty} ((k-n)p_k(t))\right), \quad (21)$$

В стационарном режиме, учитывая условие (8) при нахождении суммы ряда, длина очереди составит

$$\begin{aligned} L_{оч} &= \sum_{k=n+1}^{\infty} ((k-n)p_k) = \sum_{k=n+1}^{\infty} ((k-n) \cdot (\lambda/\mu)^k \cdot p_0 / (n^{k-n} \cdot n!)) = \\ [l = k - n] &= \frac{p_0}{n!} \cdot \sum_{l=1}^{\infty} (l \cdot (\lambda/\mu)^{l+n} / n^l) = \frac{p_0(\lambda/\mu)^n}{n!} \cdot \sum_{l=1}^{\infty} (l \cdot (\lambda/\mu)^l / n^l) = \\ &= \frac{p_0(n\rho)^n}{n!} \cdot \sum_{l=1}^{\infty} (l \cdot \rho^l) = \frac{p_0(n\rho)^n}{n!} \cdot \frac{\rho}{(1-\rho)^2} = \frac{\rho(n\rho)^n}{n!(1-\rho)^2} \cdot p_0, \end{aligned} \quad (22)$$

Подставляя в (22) выражение (19), получим формулу расчета длины очереди через нагрузку на СМО и количество устройств в ней

$$L_{оч} = \frac{\rho(n\rho)^n}{n!(1-\rho)^2} \cdot \left[\sum_{k=0}^n \left(\frac{(n\rho)^k}{k!} \right) + \frac{(n\rho)^n \rho}{(1-\rho)n!} \right]^{-1}. \quad (23)$$

Данная зависимость позволяет оценить требуемое количество ТС ОТБ при нормировании длины очереди $L_{оч}$ и нагрузки на систему ρ .

ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВЛЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Формула (23) для определения количества ТС ОТБ в представленном виде объективно неудобна. Оператор суммы значительно усложняет вынос переменной n . Избавиться от этого неудобства возможно путем составления нормировочной таблицы, где количество устройств n сопоставляется со значением нагрузки на СМО ρ и ими определена средняя длина очереди $L_{оч}$. Принимая к сведению приемлемую среднюю длину очереди перед входом в пассажирское здание и нагрузку на СМО, определяемую характеристиками выбранных ТС ОТБ, по составленной таблице возможно определить необходимое количество устройств. Пример такой таблицы представлен в виде Табл.

Таблица. Зависимость длины очереди от количества устройств и нагрузки

		Нагрузка на СМО, ρ									
		0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9
Количество устройств n	1	98,0	48,0	31,4	23,0	18,1	14,7	12,4	10,6	9,2	8,1
	2	97,5	47,5	30,9	22,6	17,6	14,3	11,9	10,1	8,8	7,7
	3	97,1	47,2	30,5	22,2	17,2	13,9	11,6	9,8	8,4	7,4
	4	96,8	46,8	30,2	21,9	16,9	13,6	11,3	9,5	8,2	7,1
	5	96,5	46,6	29,9	21,6	16,7	13,4	11,0	9,3	7,9	6,9
	6	96,3	46,3	29,7	21,4	16,4	13,2	10,8	9,1	7,7	6,7
	7	96,0	46,1	29,5	21,2	16,2	13,0	10,6	8,9	7,5	6,5
	8	95,8	45,9	29,3	21,0	16,0	12,8	10,4	8,7	7,4	6,3
	9	95,6	45,7	29,1	20,8	15,9	12,6	10,3	8,5	7,2	6,2
	10	95,4	45,5	28,9	20,6	15,7	12,4	10,1	8,4	7,1	6,0

Ситуация, в которой нагрузка на СМО при изменении числа устройств остается постоянной – это перегрузка системы. Как видно из Табл., при выборе ТС ОТБ необходимо стремиться к возможно меньшей нагрузке на всю СМО, т.к. количество устройств при постоянстве нагрузки мало влияет на ситуацию. Достичь снижения нагрузки возможно за счет выбора устройств, позволяющих обеспечить высокую пропускную способность и не вызвать перегрузку системы.

Вокзалы крупнейших пассажирских станций России имеют высокую нагрузку, которая усугубляется невозможностью расширения зон досмотра в условиях сложившейся капитальной городской застройки. В свою очередь, заполнение территории контрольно-пропускных пунктов приводит к резкому снижению эффективности проведения досмотровых мероприятий. Более того, существующей нормативно-правовой базой не учитывается опасность срабатывания взрывных устройств в зоне досмотра в момент скопления на них большого количества пассажиров. Отсутствует определенность и обоснованность в вопросе размещения и конфигурации

зон досмотра [12].

Пригородному сообщению на железнодорожном транспорте свойственны несколько видов неравномерности пассажиропотока, которые могут влиять на ситуацию одновременно – сезонная, суточная и внутрисуточная. Например, в предвыходные дни летнего периода перевозок, в вечерние часы наблюдается резкое, примерно в два раза, увеличение пассажиропотока относительно будних дней этого же периода, и более чем в три раза относительно будних дней в зимний период перевозок [13]. Нежелательность скопления пассажиров перед пунктами досмотра при данном обстоятельстве требует размещения ТС ОТБ с большим запасом пропускной способности, что невозможно из-за ограниченности пространства, и вызывает сомнения в необходимости проведения процедуры досмотра в целом.

Для обеспечения безопасности пассажиров в сложившейся ситуации, необходимо учесть особенности работы железнодорожного транспорта при больших пассажиропотоках [14]. В частности может быть рекомендовано:

1. Учесть опыт метрополитенов Москвы и Санкт-Петербурга: досмотр основного пассажиропотока ограничен проходом через рамки металлоискателей, досмотр ручной клади при необходимости производится в ходе дополнительного досмотра, а не у всех пассажиров, что снижает нагрузку на систему ввиду увеличения скорости выходящего потока. Такая процедура не вызывает больших скоплений пассажиров у входа в вестибюли станций метрополитена;

2. Разработать методику обоснования проведения досмотра пассажиров с учетом опасности совершения актов незаконного вмешательства (далее – АНВ) в зоне досмотра;

3. На вокзалах, где невозможно избежать скопления большого количества пассажиров в зоне досмотра, отменить проведение данной процедуры как потенциально опасной из-за возможности совершения АНВ в этой зоне;

4. Подготовить предложения по изменению нормативно-правовой базы в области обеспечения транспортной безопасности на железнодорожном транспорте с учетом изложенных рекомендаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неудобства в приобретении билетов, а равно пользовании услугами вокзалов достаточно сильно сказывались на пассажиропотоке и до приведения зданий в соответствие с Российским законодательством в области транспортной безопасности. При экспертной оценке снижения показателей проведенной в 2008 году установлено, что влияние неудовлетворительной организации эксплуатационной работы вокзалов на снижение пассажирооборота составило около 6 % [15]. Такой эффект от

низкого качества билетно-кассового обслуживания достаточно просто поддается объяснению: увеличение времени на покупку билета ввиду простоя в очередях и длительности самой операции покупки влияет на длительность поездки в целом. В результате, пассажиры уходят на другие виды транспорта, где время поездки меньше.

Организация очередей перед входами в пассажирские здания также негативно влияет на выбор пассажиром вида транспорта. Такое поведение пассажиров вполне логично, именно поэтому к организации пассажиропотоков на вокзалах предъявлялись требования исключения возвратных движений и чрезмерного сосредоточения пассажиров в отдельных местах [16].

На данный момент, проблема, связанная с пропускной способностью вокзалов становится более актуальной. Интеграция железнодорожного транспорта в систему городских перевозок подразумевает значительное увеличение пассажиропотока. К примеру, в Санкт-Петербургской агломерации в перспективе до 2030 года прогнозируется увеличение численности населения на 1,1 млн. чел., что окажет сильное влияние на работу пригородного железнодорожного комплекса [17]. Указанное обстоятельство требует действий по обеспечению эффективности эксплуатационной работы вокзалов. В противном случае, воздействие увеличения времени на посадку в поезд приведет к снижению эффективности работы всего пригородного железнодорожного комплекса Санкт-Петербурга.

Имитационным моделированием работы проектируемого транспортно-пересадочного узла «Волковская» было установлено, что для обеспечения пропускной способности в 2700 пасс./час требуется по крайней мере четыре пункта досмотра [18]. Такая пропускная способность приемлема для промежуточных станций, где в «пиковые» часы отправляется порядка 400...500 пассажиров в поезде с интервалом 10 минут. Но для крупных существующих пассажирских станций этой пропускной способности недостаточно, т.к. в одном электропоезде 8-вагонной составности может уехать более 2000 человек.

С пассажирских станций крупнейших городов нередко отправляются поезда нескольких направлений, что приводит к уменьшению интервалов между отправлением пассажиров и увеличению нагрузки на пассажирские устройства. Следует обратить внимание и учесть, что пригородные пассажиропотоки отличаются сильной неравномерностью, что проявляется в отправлении большей части суточного пассажиропотока в сравнительно небольшой промежуток времени. Выявлено, что около 50% от суточного прибытия пассажиров приходится на утренние «пиковые» часы. Аналогично обстоит ситуация с массовым отправлением в вечернее время [19]. Итогом наложения перечисленных факторов является то, что в существующих пассажирских зданиях оказывается невозможным

размещение ТС ОТБ в количестве, обеспечивающим пропускную способность «пиковых» пассажиропотоков, из-за чего создается потенциальная опасность совершения АНВ в зоне досмотра.

Публикуемые в настоящей статье результаты исследования следует применять при расчете количества ТС ОТБ в ходе модернизации, реконструкции или проектирования пассажирских зданий. Расчет количества ТС ОТБ выполняется требование к проверке пропускной способности всех элементов на пути следования пассажиров [20]. Оценка результатов расчета по данной методике должна включать в себя обоснованность и анализ безопасности проведения мероприятий по досмотру пассажиров, ручной клади, багажа и грузобагажа с учетом потенциальной опасности совершения АНВ в зоне досмотра.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья опубликована при поддержке ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Филиппов М.М., Уздин М.М., Подвязкин К.А. и др. Железные дороги. Общий курс: учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Транспорт, 1968. – 272 с. [Filippov MM, Uzdin MM, Podvyazkin KA, et al. Zheleznnye dorogi. Obshchii kurs: schoolbook. Moscow: Transport; 1968. (In Russ.)].
2. Шнейдер М.А., Проскурякова Е.А. Рынок пригородных железнодорожных перевозок: управление и экономика (монография) – СПб.: НП-Принт, 2012. – 288 с. [Shneider MA, Proskuryakova EA. Rynok prigorodnykh zheleznodorozhnykh perevozok: upravlenie i ekonomika (monograph). St. Petersburg: NP-Print; 2012. (In Russ.)].
3. Никифоров Б.Д., Пашинин С.А., Скабалланович В.С. и др. Техническая эксплуатация железных дорог: учеб. пособие. – М.: Транспорт, 1982. – 343 с. [Nikiforov BD, Pashinin SA, Skaballanovich VS, et al. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya zheleznykh dorog. Moscow: Transport; 1982. (In Russ.)].
4. Буканов М.А. Педь Л.И., Шрамов А.А. Справочник дежурного по станции. – М.: Транспорт, третье издание, перераб. и доп., 1987. – 239 с. [Bukanov MA, Ped' LI, Shramov AA. Spravochnik dezhurnogo po stantsii. Moscow: Transport; 1987. (In Russ.)].
5. Федеральный закон Российской Федерации №16-ФЗ от 9 февраля 2007 г. «О транспортной безопасности». [Federal Law of Russian Federation №16-FZ of 9

- February 2007. “O transportnoj bezopasnosti” (In Russ.)). Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66069/ Дата обращения: 05.12.2021.
6. Приказ Минтранса России №227 от 23.07.2015 г. «Об утверждении Правил проведения досмотра, дополнительного досмотра, повторного досмотра в целях обеспечения транспортной безопасности». [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation №227 of 23 July 2015. “Ob utverzhdenii Pravil provedeniya dosmotra, dopolnitel'nogo dosmotra, povtornogo dosmotra v celjah obespecheniya transportnoj bezopasnosti”. (In Russ.)]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_196007/ Дата обращения: 05.12.2021.
 7. Зубков И.И., Угрюмов А.К., Романов А.П. Организация движения на железнодорожном транспорте: Учебник для технич. школ ж.-д. транспорта. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1981. – 232 с. [Zubkov II, Ugryumov AK, Romanov AP. Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte: schoolbook. 5th ed. Moscow: Transport; 1981. (In Russ.)].
 8. Постановление Правительства Российской Федерации №1633 от 8 октября 2020 г. «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта». [Resolution of the Government of the Russian Federation №1633 of 8 October 2020. “Ob utverzhdenii trebovanij po obespecheniju transportnoj bezopasnosti, v tom chisle trebovanij k antiterroristicheskoy zashhishhennosti ob#ektov (territorij), uchityvajushhih urovni bezopasnosti dlja razlichnyh kategorij ob#ektov transportnoj infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta”. (In Russ.)]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365316/ Дата обращения: 05.12.2021.
 9. Платонов Г.А., Файнберг М.А., Штильман М.С. Поезда, пассажиры..., и математика. – М.: Транспорт, 1977. – 240 с. [Platonov GA, Fainberg MA, Shtil'man MS. *Poezda, passazhiry..., i matematika*. Moscow: Transport; 1977. (In Russ.)].
 10. Гмурман В.Е. Введение в теорию вероятностей и математическую статистику: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1963. – 239 с. [Gmurman VE. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostei i matematicheskuyu statistiku*: schoolbook. Moscow: Vysshaya shkola; 1963. (In Russ.)].
 11. Дегтярев В.Г. Специальные разделы математики для транспортных специальностей: учеб. пособие. – СПб.: ПГУПС, 2007. – 79 с. [Degtyarev VG. *Spetsial'nye razdely matematiki dlya transportnykh spetsial'nostei*: schoolbook. St. Petersburg: PGUPS; 2007. (In Russ.)].
 12. Шумов С.Н., Лобачев А.В., Муштренко С.В. К вопросу обеспечения транспортной безопасности на объектах железнодорожного транспорта // Специальная техника и технологии транспорта. – СПб.: ВИ ЖДВ и ВОСО, 2021. – №11(49). – С. 91–96. [To the question of ensuring transportation security at railway facilities. *Special technic and transport technology*. 2021;11(49):91-96. (Russ., Engl.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46712247>. Ссылка активна на 23.01.2022.
 13. Филиппов А.Г., Смирнов С.С., Язев Д.В., Александров И.П. Определение потребных размеров движения пригородных поездов с учетом суточной и внутрисуточной неравномерностей распределения пассажиропотока //

- Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 528–536. [Determination of the required amount of traffic of suburban trains, taking into account all-day and intraday irregularities in passenger traffic distribution. *Proceedings of Petersburg State Transport University* 2021;18(4):528-536. (Russ., Engl.). doi: 10.20295/1815-588X-2021-4-528-536
14. Тунева Т.С. Транспортная безопасность на железнодорожном транспорте: проблематика и пути решения / Материалы IV Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности». 30 марта 2021 года; СПб. М.: Институт развития дополнительного профессионального образования, 2021. – Т. 1. – С. 147–148. [Tuneva T.S. Transport safety on railway transport. Problems and solutions. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Theoretical and applied problems of integrated safety”*. 2021 Mar 30; St. Petersburg. Moscow: IAPPE; 2021. p. 147-148. (In Russ., Engl.). Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46284777>. Ссылка активна на 23.01.2022.
 15. Грачев А.А., Котенко А.Г., Кудрявцев В.А. и др. Проектирование технологий организации пригородных перевозок: учеб. пособие. – СПб.: ПГУПС, 2009. – 54 с. [Grachev AA, Kotenko AG, Kudryavtsev VA, et al. *Proektirovanie tekhnologii organizatsii prigorodnykh perevozok*. St. Petersburg: PGUPS; 2009. (In Russ.)].
 16. Верховых Г.В., Зайцев А.А., Котенко А.Г. и др. Железнодорожные пассажирские перевозки / под ред. Г.В. Верховых. – СПб: СЗРЦ «РУСИЧ», «Паллада-медиа», 2012. – 520 с. [Verkhovyykh GV, Zaitsev AA, Kotenko AG. *Zheleznodorozhnye passazhirskie perevozki*. Verkhovyykh GV, editor. St. Petersburg: “RUSICH”, “Pallada-media”; 2012. 520 p. (In Russ.)].
 17. Четчуев М.В., Костенко В.В., Хомич Д.И. Санкт-Петербургский железнодорожный узел: перспективы развития // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 86. – С. 8–10. [Chetchuev MV, Kostenko VV, Khomich DI. *Sankt-Peterburgskii zheleznodorozhnyi uzel: perspektivy razvitiya*. *Transport Rossiiskoi Federatsii*. 2020;1(86):8-10. (In Russ.)].
 18. Марченко М.А., Костенко В.В. Моделирование работы проектируемого транспортно-пересадочного узла Волковская // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. трудов LXXXI Всероссийской научно-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб: ПГУПС, 2021. – С. 256–260. [Marchenko MA, Kostenko VV. *Modelirovanie raboty proektiruемого transporno-peresadochnogo uzla Volkovskaya* In: *Proceedings of the LXXXI Vserossiiskoi nauchno-tekhnich. konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. St. Petersburg: PGUPS; 2021. pp. 256-260. (In Russ.)].
 19. Кочнев Ф.П. Оптимальные параметры пригородных пассажирских перевозок. – М.: Транспорт, 1975. – 304 с. [Kochnev FP. *Optimal'nye parametry prigorodnykh passazhirskikh perevozok*. Moscow: Transport; 1975. (In Russ.)].
 20. Правдин Н.В. Пассажирские станции. – М.: Транспорт, второе издание, перераб. и доп., 1973. – 272 с. [Pravdin NV. *Passazhirskie stantsii*. 2nd ed. Moscow: Transport; 1973. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Филиппов Антон Геннадьевич, к.т.н.;

eLibrary SPIN: 9847-9306; ORCID: 0000-0002-4404-6591;

E-mail: tigropard10@mail.ru

Смирнов Сергей Сергеевич, студент;

eLibrary SPIN: 5446-6499; ORCID: 0000-0002-9633-1861;

E-mail: sss1999@inbox.ru

Полиэкттов Дмитрий Александрович, студент;

eLibrary SPIN: 5294-4880; ORCID: 0000-0001-6104-104X;

E-mail: dipol_polipiter@mail.ru

Васильев Григорий Леонидович, студент;

ORCID: 0000-0003-3644-4271;

E-mail: grigoriy_vasiliev@mail.ru

Information about the authors:

Anton G. Filippov, Ph.D. in Technology;

eLibrary SPIN: 9847-9306; ORCID: 0000-0002-4404-6591;

E-mail: tigropard10@mail.ru

Sergey S. Smirnov, student;

eLibrary SPIN: 5446-6499; ORCID: 0000-0002-9633-1861;

E-mail: sss1999@inbox.ru

Dmitrii A. Poliektov, student;

eLibrary SPIN: 5294-4880; ORCID: 0000-0001-6104-104X;

E-mail: dipol_polipiter@mail.ru

Grigoriy L. Vasiliev, student;

ORCID: 0000-0003-3644-4271;

E-mail: grigoriy_vasiliev@mail.ru

Цитировать:

Филиппов А.Г., Смирнов С.С., Полиэкттов Д.А., Васильев Г.Л. Установление зависимости потребного количества устройств досмотра от их пропускной способности и пассажиропотока // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 99–114. doi: 10.17816/transsyst20228199-114

To cite this article:

Filippov AG, Smirnov SS, Poliektov DA, Vasiliev GL. The correlation between the number of security scanning devices, their capacity and passenger traffic. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(1):99-114. doi: 10.17816/transsyst20228199-114

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Транспортные системы

УДК [UDC] 656.21

DOI 10.17816/transsyst202281115-123

© **А.В. Сугоровский**

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ОБОСНОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПУТЕЙ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель: предложить определение методом имитационного моделирования технического оснащения и технологического обеспечения путей необщего пользования.

Методы: для достижения поставленной цели использованы методы теории вероятностей и математической статистики.

Результаты: в результате обработки эмпирических данных с использованием пакета прикладной программы Статистика (Statistica) получены выборочное среднее, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации. В ходе различных экспериментов с моделью функционирования транспортной системы определены необходимые для освоения перспективных объёмов работы: путевое развитие и количество маневровых локомотивов.

Заключение: определение потребного развития железнодорожной инфраструктуры других путей необщего пользования можно вести предложенным порядком.

Ключевые слова: железнодорожный путь, путевое развитие, железнодорожная станция, имитационное моделирование, реконструкция.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Transport systems

© **A.V. Sugorovsky**

Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I

(St. Petersburg, Russia)

JUSTIFICATION OF THE DEVELOPMENT OF THE RAILWAY INFRASTRUCTURE OF NON-PUBLIC TRACKS USING THE METHOD OF SIMULATION MODELING

Aim: to propose a definition by the method of simulation of technical equipment and technological support of non-public use paths.

Methods: methods of probability theory and mathematical statistics were used to achieve this goal.

Results: as a result of processing empirical data using the Statistics application package, the sample mean, standard deviation and coefficient of variation were obtained. In the course of various experiments with the model of the functioning of the transport system, the necessary volumes of work for the development of promising volumes of work were determined: track development and the number of shunting locomotives.

Conclusion: the determination of the necessary development of the railway infrastructure of other non-public routes can be carried out in the proposed order.

Key words: railway track, track development, railway station, simulation modeling, reconstruction.

ВВЕДЕНИЕ

В результате увеличения объемов добычи полезных ископаемых на путях необщего пользования могут возникать инфраструктурные ограничения: недостаточное путевое развитие железнодорожной станции, техническое оснащение, количество маневровых локомотивов, тогда появляется задача поиска наиболее рационального решения для обеспечения отгрузки готовой продукции с учетом необходимости производства маневровых работ. Порядок определения технического оснащения и технологического обеспечения путей необщего пользования рассмотрен на примере станции «М», на территории которой расположен горно-обогатительный комбинат, решение задачи выполнено методом имитационного моделирования, хорошо зарекомендовавшим себя для различных целей [1–7].

Во-первых, для решения поставленной задачи требуется проанализировать технико-эксплуатационную характеристику станции и планируемый к перевозке грузопоток.

Технико-эксплуатационная характеристика станции «М»

Станция «М» по характеру работы является грузовой, в основном погрузочной промышленной станцией, через которую готовая продукция комбината отправляется на внешнюю сеть железных дорог потребителям.

Основные выполняемые на станции операции следующие:

- прием порожних и груженых передач со станций ОАО «РЖД»;
- сортировка порожних вагонов в соответствии с требованиями отправки разным потребителям;
- подготовка вагонов под погрузку;
- подача вагонов на места погрузки-выгрузки;
- погрузка готовой продукции;
- выгрузка грузов, обеспечивающих работу комбината;
- формирование груженых маршрутов на сеть ОАО «РЖД»;

– передача груженых маршрутов и групп порожних вагонов из-под выгрузки на сеть ОАО «РЖД».

На станцию «М» подают следующие вагоны: порожние под погрузку, груженые под выгрузку и сдвоенные операции. Подача как правило производится сборными передаточными составами (груженые и порожние вагоны) по уведомлению с интервалом между подачами 2 часа.

Груженые вагоны, технически пригодные и размеченные по прибытию на станции «М» под сдвоенные операции под конкретный род груза, после их выгрузки, осматривают и выполняют подготовку под погрузку в коммерческом отношении. Погрузка и выгрузка вагонов производится круглосуточно. Подача вагонов под бункеры производится вагонами вперед со стороны нечетной горловины станции. Погрузка может осуществляться одновременно на двух погрузочных бункерах (1, 2), но только на одном из путей каждого погрузочного бункера. Одновременно загружается и взвешивается только 1 вагон. Среднее время погрузки 1 вагона составляет 3,5 минуты. Продолжительность очистки бункера от груза и зарядки новым грузом составляет 45 минут.

Перед вагоноопрокидывателем находятся тензометрические весы, на которых производится взвешивание груженых вагонов. Фронт одновременной постановки составляет 9 вагонов, единовременной выгрузки 1 вагон. Подача вагонов на вагоноопрокидыватель производится вагонами вперед со стороны тупика. Заезд вагонотолкателя с платформой прикрытия или маневрового локомотива (с двумя вагонами прикрытия) под вагоны производится из тупика. Перед выгрузкой груженых вагонов производится их взвешивание на тензометрических весах, расположенных перед вагоноопрокидывателем, в движении. В зимнее время для разогрева вагонов со смерзающимися грузами используется теплогенераторная установка. После разогрева вагона в течение 5–20 минут вагон ставится под выгрузку и производится разогрев следующего вагона. Вместимость бункера разогрева – 3 вагона. Фронт разогрева – 1 вагон.

Формирование и отправление груженых передаточных составов (маршрутов), а также отдельных групп вагонов, не годных под погрузку, или груженых иными грузами, выполняется с приемоотправочных путей станции «М».

Прогнозный объем работы

На станции «М» расположено погрузочно-выгрузочное предприятие с объемом работы 450 вагонов в сутки (8 составов). В 2022 году планируется увеличение отгрузки готовой продукции и достижение уровня 620 вагонов в сутки (11 составов).

Отправка грузов, предъявляемых к перевозке, в большей степени осуществляется маршрутными и групповыми отправками. Маршрутизация составляет 95% от общего объема перевозимых грузов. Прибытие

порожних и груженых вагонов в адрес грузополучателя в большей степени осуществляется в многогруппных поездах при их формировании на территории Российской Федерации. В последние годы структура заадресовки порожнего подвижного состава, поступающего в адрес комбината, изменилась. В настоящее время вагонопоток приоритетно формируется на припортовых и сортировочных станциях Октябрьской железной дороги. Несмотря на то, что перспективные размеры отгрузки готовой продукции не превышают проектную мощность комбината, с учетом тенденции последних лет, когда возрастают объемы сортировочной работы с порожними вагонами, необходимо определение технического оснащения и технологического обеспечения потребного для освоения перспективной погрузки готовой продукции и возросшей, в связи с изменением рынка готовой продукции, маневровой работы по расформированию порожних передач которое целесообразно вести методом имитационного моделирования, учитывающим подробную технологию работы станции, включая маневровые передвижения [8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей статье применен метод имитационного моделирования. Имитационное моделирование дает возможность исследовать процесс функционирования системы транспортного обслуживания станции «М» посредством варьирования основной характеристики устройств – количества каналов: путей, погрузочных устройств станции и маневровых локомотивов.

Построение имитационной модели выполнено с использованием разработанного в проектном институте «Ленгипротранс» главным специалистом по организации движения и экономическим расчетам Ю.А. Бобровым и ведущим инженером-программистом В.А. Лосевой специализированного программного комплекса «Аврора». В модель заложена достаточно подробная технология работы станции, что важно для возможности учета рисков изменения порядка обслуживания, логистики и конкурентно-способности предприятия [9–16]. При этом рассчитаны: загрузка погрузочных бункеров 1 и 2, нечетной горловины, приемоотправочных и вытяжных путей станции «М», а также сортировочных путей маневрового района, занятие соединительного пути со станцией ОАО «РЖД» и загрузка работы маневровых локомотивов станции.

В объектные модели включены следующие категории и устройства:

Категории:

- порожние маршруты;
- сборные составы.

Устройства:

- маневровые локомотивы станции;
- вытяжной путь проектируемого маневрового района;
- вытяжной путь 2Т;
- вытяжные пути М5 и М3;
- погрузочный бункер 1;
- вагоноопрокидыватель;
- приемоотправочный путь 16;
- приемоотправочный путь 15;
- пути 4п и 5п перед погрузочным бункером;
- пути 1п и 2п перед погрузочным бункером;
- приемоотправочный путь 3;
- приемоотправочный путь 6;
- приемоотправочный путь 7;
- приемоотправочный путь 8;
- приемоотправочный путь 9;
- нечетная горловина станции «М»;
- погрузочный бункер 2;
- соединительный путь между станцией ОАО «РЖД» и станцией «М»;
- соединительный путь на маневровый район;
- пути маневрового района;
- сортировочные пути маневрового района (проектируемые).

Зная реальное время занятия путей и устройств, можно определить требуемое и достаточное техническое и технологическое обеспечение железнодорожной станции, необходимое для ее стабильной работы. Задание диапазона продолжительности занятия путей позволяет избежать ошибок не учета максимального времени занятия пути и в тоже время отсутствует избыточность.

В результате обработки эмпирических данных с использованием пакета прикладной программы Статистика (Statistica), разработанного компанией StatSoft, получены выборочное среднее – 67 мин, среднеквадратическое отклонение – 14 мин и коэффициент вариации – 0,21 (выборка однородная) [17, 18].

Таким образом, в имитационную модель функционирования инфраструктуры железнодорожной станции может быть введено время занятия путей маневрового района равное 67 минутам с отклонением от среднего значения 14 минут. Накопление вагонов на сортировочных путях маневрового района моделируется в программе, время занятия остальных путей не отличается от нормативного и принято в соответствии с технологическим процессом станции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате различных экспериментов с моделью транспортной системы станции «М», установлено, что для освоения перспективного поездопотока необходимо построить шесть путей маневрового района. В ходе дальнейших экспериментов определено необходимое количество маневровых локомотивов станции «М». В Табл. 1 и на Рис. приведены результаты экспериментов по моделированию работы транспортной системы станции «М» при различном соотношении составов без переработки и с переработкой.

Таблица 1. Результаты экспериментов по моделированию работы транспортной системы станции «М»

Количество локомотивов	Обработано составов		
	Всего	Без переработки	С переработкой (расформировано)
7	11	0	11
7	11	1	10
7	11	2	9
7	10	0	10
7	10	1	9
7	10	2	8
6	9	0	9
6	9	1	8
6	9	2	7

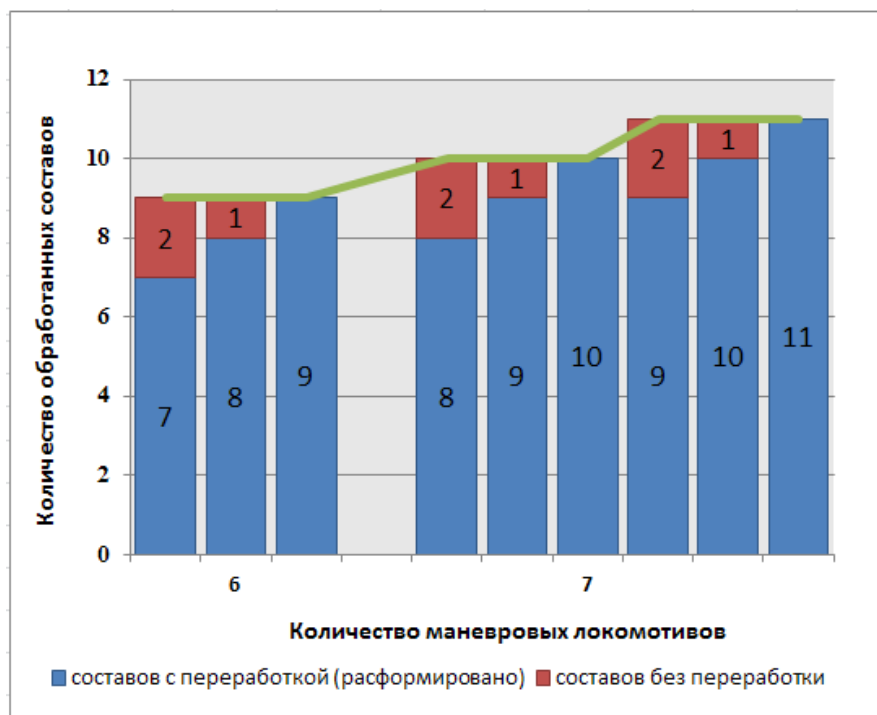


Рис. Результаты экспериментов по моделированию работы транспортной системы станции «М»

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате выполнения различных экспериментов с имитационной моделью работы станции «М», выявлено, что для ее стабильной работы на заданные объемы работы потребуется строительство шести новых путей, а также потребуется еще один маневровый локомотив. Разработанная имитационная модель позволяет ответить еще на многие вопросы, связанные с эксплуатацией станции, для чего могут быть проведены дополнительные серии экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье предложен порядок определения технического оснащения и технологического обеспечения путей необщего пользования, на примере станции «М». Определение потребного развития железнодорожной инфраструктуры других путей необщего пользования может вестись, вышеизложенным порядком.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Benin A, Guzijan-Dilber M, Diachenko L, Semenov A. Finite element simulation of a motorway bridge collapse using the concrete damage plasticity model. *E3S Web of Conferences*. 2020;157:06018. doi: 10.1051/e3sconf/202015706018
2. Maznev AS, Kiselev IG, Ivanov IA, Kiselev AA. A Simulation Model of a Servo System of a Regenerative-Resistor Braking of a DC Electric Train. *Russian Electrical Engineering*. 2018;89(10):592-597. doi: 10.3103/S1068371218100061
3. Nikitin VV, Sychugov AN, Rolle IA, Vikulov IP. Calculations of the Parameters and Simulation of the Operation of Nonlinear Surge Arresters for AC Rolling Stock. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(2):87-92. doi: 10.3103/S1068371220020078
4. Perminov N, Perminov A. Simulation of strain-stress behavior of a tunnel collector in the combined anthropogenic effects conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;456(1):012083. doi: 10.1088/1757-899X/456/1/012083
5. Zhuravleva N, Guliy I, Shavshukov V. Simulation modeling of changes in demand for rail transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;403(1):012230. doi: 10.1088/1755-1315/403/1/012230
6. Perminov, N. Unsteady interaction simulation of a large RC shell with heterogeneous soil milieu for a gradually increasing caisson structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018;456(1):012059. doi:

- 10.1088/1757-899X/456/1/012059
7. Zaitsev AA, Rolle IA., Evstaf'eva MV, et al. Determination of the Energy Indices of Alternating Current Electric Rolling Stock Using Computer Simulation. *Russian Electrical Engineering*, 2018;89(10):612-616. doi: 10.3103/S1068371218100115
 8. Грошев Г.М., Котенко А.Г., Сугоровский А.В., Сугоровский А.В. Регулирование подвода транзитных и разборочных грузовых поездов к техническим станциям // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 094–104. [Groshev GM, Kotenko AG, Sugorovsky AV, Sugorovsky AV. Regulation of the supply of transit and de-construction of freight trains to the technical stations. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(1):094-104. (Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst2018041094-104
 9. Fan Q, Jin Y, Wang W, Yan X. A performance-driven multi-algorithm selection strategy for energy consumption optimization of sea-rail intermodal transportation. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2019;(44):1-17. ISSN 2210-6502. doi: 10.1016/S2210650218300701
 10. Caterina C, Cristian G, Giovanni L, et al. Integration of BPMN Modeling and Multi-actor AHP-aided Evaluation to Improve Port Rail Operations. *Transportation Research Procedia*. 2021;(52):139-146. doi: 10.1016/S2352146521000296
 11. Zhang Q, Wang W, Peng Y, Guo Z. Impact of rail transport services on port competition based on a spatial duopoly model. *Ocean & Coastal Management*. 2017;(148):113-130, ISSN 0964-5691. doi: 10.1016/S0964569116304148
 12. Ferrari P. Some necessary conditions for the success of innovations in rail freight transport, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2018;(118):747-758. ISSN 0965-8564. doi: 10.1016/S0965856418307286
 13. Kurtuluş E, Çetin İB. Analysis of modal shift potential towards intermodal transportation in short-distance inland container transport. *Transport Policy*. 2020;(89):24-37. doi: 10.1016/S0967070X19300022
 14. Jose Prata, Elisabete Arsenio, Assessing intermodal freight transport scenarios bringing the perspective of key stakeholders, *Transportation Research Procedia*, Volume 25, 2017, Pages 900-915, ISSN 2352-1465. doi: 10.1016/S235214651730772X
 15. Adler N, Brudner A, Proost S. A review of transport market modeling using game-theoretic principles, *European Journal of Operational Research*. 2021;291(3):808-829, ISSN 0377-2217. doi: 10.1016/S0377221720309668
 16. Pokrovskaya O, Reshetko N, Kirpicheva M, et al. The study of logistics risks in optimizing the company's transportation process (2019) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 698(6)066060. doi: 10.1088/1757-899X/698/6/066060
 17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник для студентов высших технических учебных заведений / Е.С. Вентцель. – двенадцатое издание, стереотипное. – М.: Юстиция, 2018. – 658 с. – ISBN 9785436519272. [Ventcel' ES. Teoriya veroyatnostej: Uchebnik dlya studentov vysshih tekhnicheskikh uchebnyh zavedenij. Moscow: Yusticiya; 2018. 658 p. (In Russ.)].
 18. Рублева Г.В. Математическая статистика: статистические критерии проверки гипотез: учеб.-метод. пособие для студентов очной формы обучения технических и инженерных специальностей. – Тюмень: ТюмГУ, 2014. – 50 с. [Rubleva GV. Matematicheskaya statistika: statisticheskie kriterii proverki gipotez: ucheb.-metod. posobie dlya studentov ochnoj formy obucheniya tekhnicheskikh i inzhenernyh special'nostej. Tyumen': TyumGU; 2014. 50 p. (In Russ.)].

Сведения об авторах:**Сугоровский Артем Васильевич**, к.т.н.;

телефон: +7(960)2855139; адрес: 196608, Санкт-Петербург, г. Пушкин ул.

Оранжерейная, д. 73;

eLibrary SPIN: 5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;

E-mail: c123945@yandex.ru

Information about the authors:**Artyom V. Sugorovsky**, Candidate of Engineering Science;

phone: +7(960)2855139; address: 196608, Санкт-Петербург, г. Пушкин ул.

Оранжерейная, д. 73;

eLibrary SPIN: 5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;

E-mail: c123945@yandex.ru

Цитировать:

Сугоровский А.В. Обоснование развития железнодорожной инфраструктуры путей необщего пользования с применением метода имитационного моделирования // Транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 115–123. doi: 10.17816/transsyst202281115-123

To cite this article:

Sugorovsky AV. Justification of the development of the railway infrastructure of non-public tracks using the method of simulation modeling. *Transportation Systems and Technology*. 2022;8(1):115-123. doi: 10.17816/transsyst202281115-123

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.078

DOI 10.17816/transsyst202281124-132

© **Е.М. Волкова**

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

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ КАРШЕРИНГА В ГОРОДСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ РОССИЙСКИХ МЕГАПОЛИСОВ

Обоснование: Обострение транспортной проблемы в российских мегаполисах во многом является следствием как продолжающейся автомобилизации, так и неэффективной транспортной политики субъектов РФ. Вместе с тем городские рынки транспортных услуг претерпевают значительные изменения в структуре, связанные с появлением и развитием бизнес-моделей совместного потребления. Различные формы совместного потребления могли бы стать органичной частью городских транспортных систем, однако для этого необходима совместная инициатива участников рынка и его регуляторов.

Цель: дать оценку состояния и определить перспективы развития российского рынка каршеринга в целом, а также наиболее крупных его сегментах (рынок каршеринга в Москве).

Методы: методы статистического анализа, графического представления информации, сводка, методы анализа отраслевых рынков (индекс концентрации, индекс Херфиндала – Хиршмана).

Результаты: в статье идентифицированы барьеры, препятствующие развитию транспортного шеринга в российских городах, и предложены организационные формы интеграции бизнес-моделей совместного потребления в городские транспортные системы.

Заключение: Полученные результаты могут быть использованы органами государственной власти, ответственными за транспортное обслуживание населения и разработку транспортной политики в субъектах РФ, а также транспортными организациями, осуществляющими мультимодальные перевозки пассажиров в российских мегаполисах.

Ключевые слова: городские транспортные системы, рыночная концентрация, каршеринг, совместное потребление, пассажирские перевозки, городской общественный транспорт.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© **Elena M. Volkova**

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

PROBLEMS OF CARSHARING INTEGRATION IN URBAN TRANSPORT SYSTEMS OF RUSSIAN MEGACITIES

Background: Transport problems of Russian megacities are mostly consequences of motorization increasing and inefficient transport policy provided by local transport authorities. At the same time, the structure of urban transport markets is changing because of new business models of transport sharing emerging and development. Different models of sharing could be an important part of urban transport systems, but it requires initiative both of transport companies and local transport authorities.

Aim: to assess the state and determine the prospects for the development of the Russian carsharing market as a whole, as well as its largest segment (the carsharing market in Moscow).

Methods: methods of statistical analysis, graphical representation of information, summary, methods of analysis of industry markets (concentration index, Herfindahl – Hirschman index).

Results: In this article barriers for the development of transport sharing in Russian cities are identified, and forms of sharing integration in urban transport cities are developed.

Conclusion: The results obtained can be used by local authorities responsible for public transport services and the development of transport policy in Russian cities, as well as transport organizations engaged in multimodal transportation of passengers in megacities.

Key words: urban transport systems, market concentration, carsharing, shared consumption, passenger transportation, urban public transport.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития городских транспортных систем характеризуется целым рядом проблем, связанных с ростом численности городского населения, темпов жилищного строительства и одновременным ростом автомобилизации (Рис. 1). Как следствие, снижается спрос на услуги общественного транспорта. В свою очередь, это порождает различные мероприятия, связанные с оптимизацией парка подвижного состава, маршрутов общественного транспорта. Таким образом, действующая система общественного транспорта перегружена в часы «пик» при сохранении или росте потерь времени в заторах на автодорогах.

Похожая ситуация характерна и для западных мегаполисов, где предпринимаются систематические мероприятия, стимулирующие переключения пассажиров с личного транспорта на общественный. К ним можно отнести такие, как:

- ограничительные мероприятия по въезду в центр города;
- организация бесплатных перехватывающих парковок близ станций метрополитена;
- стимулирование совместных поездок, в том числе развитие транспортного шеринга.

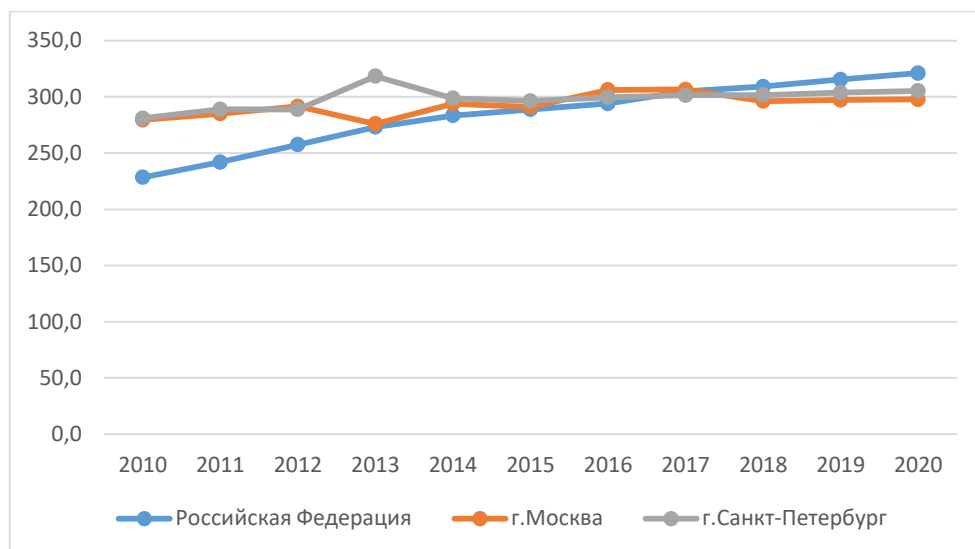


Рис. 1. Динамика числа личных автомобилей в РФ (ед. на 1000 чел. населения)

Источник: разработано автором по данным [1]

Последняя мера может способствовать не только снижению уровня автомобилизации, но и построению гармоничной бесшовной транспортной системы в мегаполисах. Понятие бесшовной (гладкой) транспортной системы по-разному определяется во многих отечественных и зарубежных публикациях [2]. Специалисты сходятся во мнении, что бесшовная транспортная система предполагает согласованную кооперацию видов транспорта в мультимодальных поездках при обеспечении одинаково высокого уровня транспортного обслуживания населения и снижении денежных и временных затрат на пассажирские перевозки.

КАРШЕРИНГ КАК ЧАСТЬ БЕСШОВНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ МЕГАПОЛИСОВ

Для построения бесшовной транспортной системы необходимы усилия как различных транспортных компаний, так и регуляторов городского общественного транспорта. Эти усилия должны быть направлены в том числе на своевременный учет происходящих в городских транспортных системах изменений и успешную интеграцию новых видов транспорта и бизнес-моделей. Так, в последние годы в российских мегаполисах получают развитие формы совместного потребления транспортных услуг: каршеринг, байкшеринг, скутер-шеринг, совместные поездки. Наиболее распространен каршеринг, который начал развиваться в США еще в 1990-х гг [3]. Сегмент совместного потребления транспортных услуг стал частью транспортных систем американских и западных мегаполисов, однако мировой опыт показывает, что при отсутствии эффективного управления он способен создавать новые

проблемы. Напротив, существуют практики удачного встраивания транспортного шеринга в системы общественного транспорта. Так, в ряде исследований рассматриваются кейсы по целенаправленному размещению стоянок каршеринга в местах с невысокой транспортной доступностью по инициативе местных администраций [4]. Отмечается, что государственные органы, ответственные за организацию транспортного обслуживания населения, становятся партнёрами компаний, предоставляющих услуги шеринга [5–7]. Это даёт им право определять рациональное размещение стоянок и размер парка транспортных средств в различных районах города. В свою очередь, каршеринг или байкшеринг выполняют две полезных функции для городской транспортной системы [8]. Во-первых, они начинают выполнять функцию «первой мили» или «последней мили» в городских пассажирских перевозках, повышая транспортную доступность станций метрополитена или пассажирских хабов [9–11]. Во-вторых, доказано, что активное использование каршеринга способствует снижению темпов автомобилизации и, как следствие, загрузки улично-дорожной сети. Особенно это справедливо для совместных поездок (райдшеринг, райдхейлинг) [12, 13]. Таким образом, при грамотном управлении и транспортном планировании компании, предоставляющие услуги совместного потребления, становятся неотъемлемой частью городской транспортной системы и способствуют росту эффективности её функционирования.

Перечисленные выше транспортные проблемы актуальны для российских мегаполисов. Вместе с тем в некоторых городах развивается сегмент транспортного шеринга. В связи с этим представляет интерес анализ этого сегмента с целью определения дальнейших перспектив его развития и места в городских транспортных системах российских мегаполисов.

АНАЛИЗ СЕГМЕНТА КАРШЕРИНГА В СУБЪЕКТАХ РФ

Следует отметить, что российский рынок каршеринга сравнительно невелик. По данным портала Rentcarus.ru в городах России на начало 2022 года насчитывается всего 35 компаний каршеринга. Особенностью российского рынка каршеринга является неравномерность его территориального развития. Хотя компании каршеринга присутствуют в 25 крупных городах России, большая их часть сосредоточена в Москве и Санкт-Петербурге (Табл. 1).

В Табл. 1 не рассчитано итоговое число компаний, поскольку многие крупные участники рынка предлагают свои услуги в нескольких городах одновременно.

Таблица 1. География оказания услуг каршеринга в субъектах РФ

Субъект РФ	Число компаний каршеринга
Москва	21
Санкт-Петербург	9
Адлер	4
Сочи	4
Уфа	3
Волгоград	2
Екатеринбург	2
Калининград	2
Краснодар	2
Красноярск	2
Новосибирск	2
Воронеж	1
Геленджик	1
Грозный	1
Иркутск	1
Казань	1
Крым	1
Липецк	1
Нижний Новгород	1
Пермь	1
Ростов-на-Дону	1
Самара	1
Тула	1
Челябинск	1

Источник: составлено автором по данным портала www.Rentcarus.ru [14]

Еще одна особенность российского сегмента каршеринга – значительная разница в размерах компаний, предоставляющих данные услуги. Если судить по размеру автопарка, можно выделить несколько известных компаний, у которых он варьирует от 1000 ед. до 10000 ед. Это, например, компании Яндекс.Драйв, Делимобиль, BelkaCar, СитиДрайв. Они представлены во многих городах помимо Москвы и Санкт-Петербурга. С другой стороны, существуют компании, практически не имеющие собственного автопарка и предлагающие свои услуги только в одном городе. Это, например, компании Vi-bi.car (Волгоград), KarKar (Калининград), Чайкакар (Крым), Vorona Car (Пермь). Таких компаний значительно больше, чем крупных. Исходя из этого можно предположить, что в сегменте каршеринга в столичных мегаполисах рыночная структура близка к олигополии, а в остальных городах рынок может быть монополизирован или также близок к олигополю. Проверим данную гипотезу на примере Москвы, где сегмент каршеринга развит гораздо лучше, чем в других городах, и имеет наиболее высокий конкурентный потенциал.

Для оценки рыночной концентрации в сегменте каршеринга г. Москвы будем использовать стандартные методы анализа отраслевых рынков – расчет коэффициентов CR3, CR5, HHI. В связи с отсутствием открытых данных об объемах перевозок и выручке компаний рыночная доля будет определяться исходя из размера их собственного автопарка (Рис. 2).

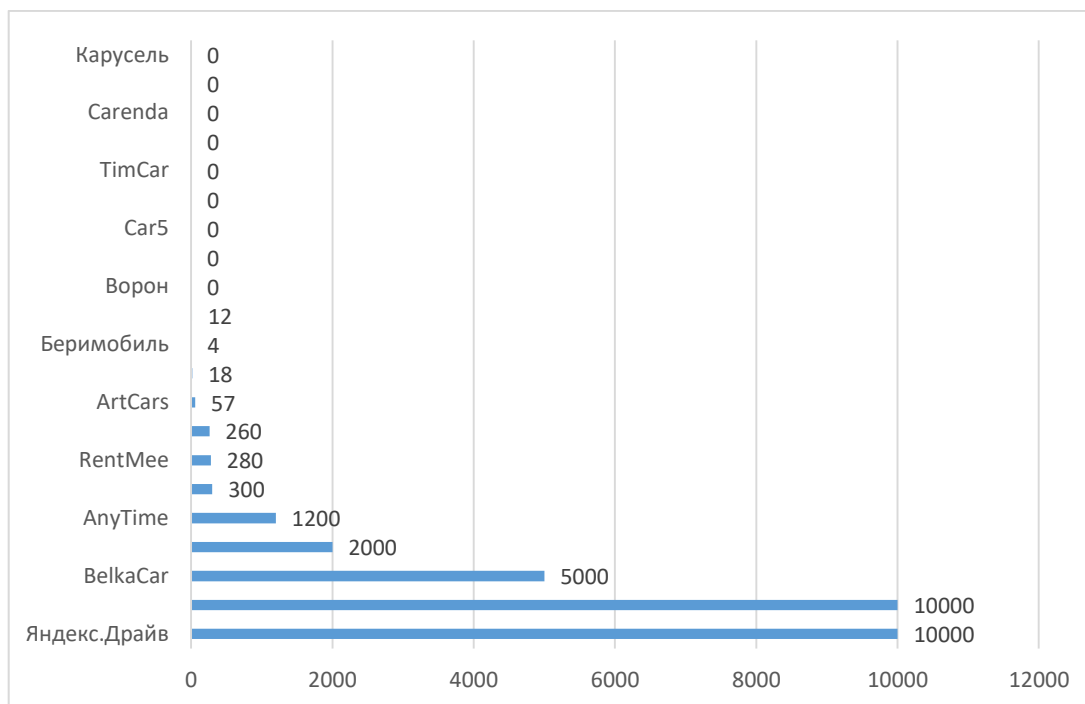


Рис. 2. Распределение автопарка каршеринга (ед.) по компаниям, предоставляющим услуги в Москве

Источник: разработано автором по данным портала www.Rentcarus.ru [5]

Как видно из Рис. 2, автопарк распределяется между компаниями достаточно неравномерно, причем 9 компаний из 21 вообще не имеют собственного автопарка. По данным рис. 2 в таблице 2 рассчитана доля рынка каждой компании и коэффициенты концентрации, а также индекс Херфиндаля – Хиршмана.

Таблица 2. Оценка уровня концентрации рынка каршеринга в Москве

Компания	Доля рынка δ_i , %	Накопленная доля рынка $\sum \delta_i$, %	Квадрат доли рынка, δ_i^2
Яндекс.Драйв	34,33	34,33	1178,39
Делимобиль	34,33	68,66	1178,39
BelkaCar	17,16	CR₃=85,82	294,60
Ситидрайв	6,87	92,68	47,14
AnyTime	4,12	CR₅=96,80	16,97
Bumerang	1,03	97,83	1,06

Компания	Доля рынка δ_i , %	Накопленная доля рынка $\sum \delta_i$, %	Квадрат доли рынка, δ_i^2
RentMee	0,96	98,80	0,92
Car4You	0,89	99,69	0,80
ArtCars	0,20	99,88	0,04
Zvevdacar	0,06	99,95	0,00
Беримобиль	0,01	99,96	0,00
Наш	0,04	100,00	0,00
Ворон	0,00	100,00	0,00
CarSmile	0,00	100,00	0,00
Car5	0,00	100,00	0,00
EasyRide	0,00	100,00	0,00
TimCar	0,00	100,00	0,00
Carlion	0,00	100,00	0,00
Carenda	0,00	100,00	0,00
MatreshCar	0,00	100,00	0,00
Карусель	0,00	100,00	0,00
Итого	100,0		<i>HHI = 2718,31</i>

Источник: рассчитано автором

По данным, рассчитанным в Табл. 2, можно заключить, что рынок каршеринга в Москве отличается высокой концентрацией и представляет собой олигополию, поскольку пять крупнейших его участников фактически имеют в собственности почти весь автопарк. Это не только создаёт угрозу согласованного установления цен на услуги каршеринга, но и может в будущем привести к монополизации данного сегмента транспортного рынка как в столице, так и в других субъектах РФ. Кроме того, в материалах открытых источников, транспортных стратегий отсутствует информация о мероприятиях по интеграции каршеринга в транспортные системы российских мегаполисов. В основном данные стратегии посвящены развитию традиционных видов общественного транспорта, а также элементов транспортной инфраструктуры. Это в определенной степени противоречит мировым практикам встраивания новых бизнес-моделей транспортных компаний в городские транспортные системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На наш взгляд, для решения задачи интеграции каршеринга в транспортные системы российских мегаполисов в первую очередь следует законодательно закрепить статус данной услуги и разделить ответственность и риски компании, предоставляющей транспортные средства, и пользователей каршеринга. Пробелы, существующие в нормативно-правовой базе регулирования этих вопросов, поднимаются в

отечественных публикациях, например, в работе [6]. Далее необходим ряд мероприятий по снижению административных барьеров входа на данный сегмент рынка и поддержка участников, в том числе с небольшим автопарком, местными органами государственной власти. Возможна реализация совместных государственно-частных проектов по развитию каршеринга как части мультимодальных пассажирских перевозок в городской транспортной системе. В любом случае важно, чтобы развитие сегмента совместного потребления транспортных услуг происходило при координации и постоянном мониторинге его состояния регуляторами.

В заключение отметим, что любые формы экономики совместного потребления меняют сознание людей, однако их успешное развитие возможно только в подготовленном гражданском обществе с достаточно высоким уровнем самосознания, ответственности и взаимного доверия. В противном случае будущее шеринг-сервисов остаётся вопросом дискуссионным, поскольку они по сути являются технологиями двойного назначения.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. Доступно по: <https://www.gks.ru>. Ссылка активна на 02.02.2022. [Oficialnyj sajt Federalnoj sluzhby gosudarstvennoj statistiki. [Internet]. [cited 2022 February 02]. Available from: <https://www.gks.ru> (In Russ.)].
2. Лapidус Б. М., Лapidус Л. В. Гладкая бесперебойная транспортная система - инновационная модель будущего: природа, сущность, детерминанты качества // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. – 2017. – № 2. – С. 45–63. [Lapidus BM, Lapidus LV. Smooth Seamless Transport System – the Innovative Model of the Future: Nature, Essence, Quality Determinants. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika. 2017;2:45-63. (In Russ.)].
3. Wruk D, Oberg A, Friedrich-Schieback M. Quantifying the Sharing Economy. *GAIA*. 2018;28:184-189. doi: 10.14512/gaia.28.S1.3
4. Duan Q, Ye X, Li J, Wang K. Empirical Modeling Analysis of Potential Commute Demand for Carsharing in Shanghai, China. *Sustainability (Switzerland)*. 2020;12(2). doi:10.3390/su12020620
5. Bellini F, Dulskaja I, Savastano M, D'Ascenzo F. Business Models Innovation for Sustainable Urban Mobility in Small and Medium-sized European Cities. *Management and Marketing*. 2019;14(3):266-277. doi:10.2478/mmcks-2019-0019
6. Gilibert M, Ribas I. Synergies between App-based Car-related Shared Mobility Services for the Development of more Profitable Business Models. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2019;12(3):405-420. doi:10.3926/jiem.2930
7. Farajallah M, Hammond RG, Pénard T. What Drives Pricing Behavior in peer-to-peer Markets? Evidence from the Carsharing Platform BlaBlaCar. *Information*

- Economics and Policy*. 2019;48:15-31. doi:10.1016/j.infoecopol.2019.01.002
8. Laa B, Emberger G. Bike sharing: Regulatory Options for Conflicting Interests – Case Study Vienna. *Transport Policy*. 2020. doi: 10.1016/j.tranpol.2020.03.009
 9. Link C, Strasser C, Hinterreiter M. Free-floating Bikesharing in Vienna – a User Behaviour Analysis. *Transportation Research Part A*. 2020;168:182. doi: 10.1016/j.tra.2020.02.020
 10. Hahn R, Ostertag F, Lehr A, Büttgen M, Benoit S. “I Like It, but I don’t Use It”: Impact of Carsharing Business Models on Usage Intentions in the Sharing Economy. *Business Strategy and the Environment*. 2020;29(3):1404-1418. doi: 10.1002/bse.2441
 11. Alonso-Gonzalez MJ, van Oort N, Cats O, Hoogendoorn-Lanser S, Hoogendoorn S. Value of Time and Reliability for Urban Pooled On-demand Services. *Transportation Research Part C*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102621>
 12. Papu Carrone A, Hoening VM, Jensen AF, Mabi SE, Rich J. Understanding car Sharing Preferences and Mode Substitution Patterns: A Stated Preference Experiment. *Transport Policy*. 2020. doi:10.1016/j.tranpol.2020.03.010
 13. Münzel K, Boon W, Frenken K, Vaskelainen T. Carsharing Business Models in Germany: Characteristics, Success and Future Prospects. *Information Systems and E-Business Management*. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10257-017-0355-x>
 14. Rentcarus: портал про аренду автомобилей. Доступно по: <https://www.rentcarus.ru>. Ссылка активна на 02.02.2022. [Rentcarus: portal pro arendu avtomobilej. [Internet]. [cited 2022 February 02]. Available from: <https://www.rentcarus.ru> (In Russ.)].
 15. Малиновский М.П., Аракелян Т.К. Каршеринг: проблемы участников и сторонних лиц // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2018. – № 3 (17). – С. 2. [Malinovskij MP, Arakelyan TK. Carsharing: Problems of Participants and Third Parties. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2018;3(17):2. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Волкова Елена Михайловна, к.э.н., доцент;
eLibrary SPIN:6886-5796; ORCID: 0000-0003-0620-463X;
E-mail: moonlight34@ya.ru

Information about the authors:

Elena Volkova, Candidate of Economic Sciences, associate professor;
eLibrary SPIN:6886-5796; ORCID: 0000-0003-0620-463X;
E-mail: moonlight34@ya.ru

Цитировать:

Волкова Е.М. Проблемы интеграции каршеринга в городские транспортные системы российских мегаполисов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 132–124. doi: 10.17816/transsyst202281124-132

To cite this article:

Volkova EM. Problems of Carsharing Integration in Urban Transport Systems of Russian Megacities. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(1):124-132. doi: 10.17816/transsyst202281124-132