

ISSN 2413-9203

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

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

transst.ru

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

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

«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: info@trassyst.ru
WEB: www.trassyst.ru
Телефон: +7 (812) 6198152; +7 (911) 2384445

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

СВИДЕТЕЛЬСТВО о регистрации средства массовой информации

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

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://trassyst.ru/>
Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://trassyst.ru/trassyst/about/submissions>

ПОДПИСКА

Журнал распространяется через Интернет без ограничений и по адресно-целевой подписке через редакцию

**ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ
И ТЕХНОЛОГИИ**

Том 6, № 1

2020

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

Зайцев Анатолий Александрович,
д.э.н., профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА, НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

Антонов Юрий Федорович, 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;

Глухих Василий Андреевич, академик РАН, д.т.н., профессор, Научный руководитель НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия;

Ключисис Йоханнес, доктор наук 2-й степени, полный профессор Деггендорфской 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;

Мильников Сергей Владимирович, к.биол.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;

Никитин Виктор Валерьевич, д.т.н., профессор Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия;

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

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

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

Соколова Яна Викторовна, к.э.н., MBA, Заместитель руководителя Научно-образовательного центра инновационных пассажирских перевозок ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;

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

Хан Хённг-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

“TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY”

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: info@trassyst.ru
Website: www.trassyst.ru
Phone: +7 (812) 6198152; +7 (911) 2384445

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

AIMS & SCOPE

Network electronic journal “Transportation Systems and Technology” 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://trassyst.ru/>

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

SUBSCRIPTION

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

TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY

Vol. 6, Issue 1

2020

ELECTRONIC PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL**EDITOR-IN-CHIEF**

Anatoly Zaitsev, Dr. Economics, Professor, PSTU, St. Petersburg, Russia

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF, THE SCIENTIFIC EDITOR

Yuri Antonov, Dr.Sc., Professor PSTU, 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;

Vasily Glukhikh, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc..., Professor, Scientific Adviser at JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», St. Petersburg, 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 R. 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;

Viktor Nikitin, Dr.Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;

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

Viktor Podsorin, 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;

Yana Sokolova, PhD, MBA, Deputy Head Scientific-Educational Center for Innovative Passenger Transport Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;

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 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Раянов Т.А. Обзор новых типов датчиков крутящего момента	5	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering Raianov T.A. Overview of new Types of Torque Sensors	
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Квитко К.Б. Сравнительный анализ международных транспортных систем: инфраструктура, рейтинги, транспортные коридоры	15	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Kvitko K.B. Comparative Analysis of International Transport Systems: Infrastructure, Ratings, Transportation Corridors	
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ		ORIGINAL STUDIES	
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Кашуба А.В. Оптимизационный метод формирования геометрических размеров зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя	30	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering Kashuba A.V. Optimization Method for Calculating the Geometrical Dimensions of the tooth Zone of the Switched Reluctance Motor	
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Ким К.К., Крон И.Р., Вешкин В.В. К выбору схемы статорной обмотки тягового линейного синхронного двигателя системы MAGLEV	48	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering Kim K.K., Kron I.R., Veshkin V.V. To the Choice of the Maglev System Traction Linear Synchronous Motor Stator Winding Scheme	
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Хея А, Хирата К, Нигучи Н. Линейный привод Вернье с двумя двигателями	63	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering Heya A, Hirata K, Niguchi N. Linear Vernier Actuator with Two Movers	
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Хомутов С.О., Серебряков Н.А. Создание нейросетевой математической модели краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей	80	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering Khomutov S.O., Serebryakov N.A. Creation of a Short-Term Load Forecasting Neural Network Model of Electrical Engineering Complex of Section Regional Electric Grid	

<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника</p> <p>Терёхин И.А., Кремлев И.А., Тарабин И.В., Абишов Е.Г.</p> <p>Совершенствование методики определения опасного напряжения в смежных линиях связи при магнитном влиянии тяговой сети переменного тока</p>	92	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p>Terekhin I.A., Kremlev I.A., Tarabin I.V., Abishov E.G.</p> <p>Tax Improvement of the Method of Determining Dangerous Voltage in Adjacent Lines of Communication Under Magnetic Influence of a Tracing AC System</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника</p> <p>Троицкий П.С.</p> <p>Алгоритм подбора моторных и прицепных вагонов в грузовом поезде моторвагонной тяги по критерию энергетической эффективности</p>	104	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p>Troitskiy P.S.</p> <p>Algorithm for selecting motor and trailer cars in a freight train of motor-car traction according to the energy efficiency criterion</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника</p> <p>Чехова А.А., Соломин А.В.</p> <p>Тяговый линейный асинхронный двигатель для городского Маглев транспорта</p>	120	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field - Electrical Engineering</p> <p>Chekhova A.A., Solomin A.V.</p> <p>Traction Linear Induction Motor of Urban Maglev Transport</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p>Журавлева Н.А., Кльештик Т.</p> <p>Проблемы финансирования проектов развития транспортной инфраструктуры и основные инвестиционные тренды 2020 года</p>	129	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p>Zhuravleva N.A., Kliestik T.</p> <p>The Problems of Financing Transport Infrastructure Development Projects and Main Investments Trends in 2020</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p>Подсорин В.А., Овсианникова Е.Н.</p> <p>Обновление основных средств транспортной компании с учетом динамики конъюнктуры рынка</p>	146	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p>Podsorin V.A., Ovsiannikova E.N.</p> <p>The transport company capital assets modernization according to market condition dynamics</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p>Смирнов С.А., Смирнова О.Ю., Соколова Я.В.</p> <p>Методика оценки эффектов от реализации проектов строительства новых линий пассажирского магнитолевитационного транспорта</p>	161	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p>Smirnov S.A., Smirnova O.Yu., Sokolova Ia.V.</p> <p>Approach of Evaluation the Effects from Implementation the Projects of Construction New Passenger Maglev Lines</p>

РУБРИКА 2: Научные и технические разработки
Направление – Электротехника

УДК [UDC] 62-531.7
DOI 10.17816/transsyst2020615-14

© **Т. А. Раянов**

Санкт-Петербургский Государственный университет
морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
(Санкт-Петербург, Россия)

ОБЗОР НОВЫХ ТИПОВ ДАТЧИКОВ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

В последнее время огромную популярность получили современные системы измерения крутящего момента они применяются в автомобильном, железнодорожном, авиационном и судовом транспорте, а также в целлюлозной, бумажной, металлургической промышленности. Данные метрологические системы обеспечивают точное измерение значения крутящего момента в сложных эксплуатационных условиях, а также в агрессивных средах. Благодаря внедрению микропроцессоров в данные устройства стало возможным увеличивать быстродействие, появилось возможность подключать следящие автоматические системы крутящего момента по сетевому интерфейсу к единому центру автоматического управления и производить дистанционное управление датчиками крутящего момента.

При помощи использования современного программного обеспечения повышается коммуникабельность автоматических систем измерения крутящего момента. Разрабатываются различные программные модели для автоматических систем измерения крутящим моментом которые имеют возможность, либо частично имитировать данную систему, либо работать в качестве устройства-помощника адаптируя системы автоматического измерения к различным неопределенностям таким как температура окружающей среды и свойства ферромагнитных материалов. Повышается безопасность эксплуатации транспортных систем, грузоподъемных устройств и производственных установок.

Целью данной статьи является обзор и анализ новых типов датчиков крутящего момента от известных мировых производителей.

Рассмотрены конструкции и состав современных измерительных систем проанализированы их преимущества и недостатки. Приведено техническое описание по каждому из преобразователей крутящего момента.

Ключевые слова: крутящий момент, бесконтактные вращающиеся датчики, магнитоупругий эффект, измерительный фланец, программное обеспечение, индуктивное напряжение, изменение магнитного поля

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field - Electrical Engineering

© **T. A. Raianov**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
(St. Petersburg, Russia)

OVERVIEW OF NEW TYPES OF TORQUE FORCE SENSORS

In recent years, modern torque measurement systems have become very popular. they are used in road, rail, aviation and ship transport, as well as in the pulp, paper, and metallurgical industries. These metrological systems provide accurate torque measurement in difficult operating conditions as well as in aggressive environments. Thanks to the introduction of microprocessors in these devices, it became possible to increase the speed, it became possible to connect automatic torque tracking systems via a network interface to a single automatic control center and to perform remote control of torque sensors. With the use of modern software increases communication automatic torque measurement systems. Various software models are being developed for automatic torque measurement systems that have the ability to either partially simulate this system or work as an assistant device adapting automatic measurement systems to various uncertainties such as ambient temperature and properties of ferromagnetic materials. Safety of operation of transport systems, load-lifting devices and production facilities is increased.

The purpose of this article is to review and analyze new types of torque sensors well-known manufacturers. The design and composition of modern measuring systems are considered and their advantages and disadvantages are analyzed. The technical description for each of the torque converters is given.

Keywords: torque, non-contact rotating sensors, magnetoelastic effect, measuring flange, software, inductive voltage, magnetic field change

ВВЕДЕНИЕ

Измерение крутящего момента важно и полезно в производственной сфере, но в то же время мониторинг и измерение этого параметра должны быть точными и экономичными. Несмотря на то, что тензометрические датчики крутящего момента обеспечивают высокую точность, дороговизна и громоздкость таких приборов ограничивают их использование главным образом в исследовательских лабораториях и конструкторских бюро, а также при тестировании изделий на качество для проверки стандартов. Кроме того, такие датчики требуют высокого уровня обслуживания, что делает их непригодными для массовой интеграции в производственные системы. Были опробованы недорогие методы измерения крутящего момента в производственной среде, включая не прямые системы, которые,

например, контролируют изменения в потреблении электроэнергии. Но такие методы обычно обеспечивают низкое разрешение и недостаточно точны для практического применения [1].

Современные системы автоматического измерения крутящего момента имеют существенное отличие от тех систем, которые использовались несколько десятилетий назад, так как появилось возможность внедрения в них микропроцессорных систем автоматического управления. Использование микропроцессорных систем автоматического управления дало возможность дистанционного управления следящими системами автоматического управления, из-за появления у измерительных систем крутящего момента возможностей персонального компьютера. Стало возможным использования сетевых промышленных интерфейсов и протоколов таких как Modbus, Profibus DP и Industrial Ethernet. У любой современной системы имеется свой IP адрес по которому можно отследить устройство и оценить его техническое состояние находясь на огромных расстояниях от него [2]. Появилось возможность записывать все показания измерений в специальный жесткий диск чтобы потом по этим значениям оценивать оставшееся эксплуатационное время у гребного вала или производственной установки. Это все заставляет оптимистично смотреть на дальнейшее развитие систем автоматического измерения крутящего момента [3].

ДАТЧИКИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ФЛАНЦЕВОГО ТИПА ФИРМЫ MAGTROL

Датчик крутящего момента Magtrol фланцевого типа со своей компактностью, отсутствием подшипников и необходимости обслуживания имеет ряд преимуществ для применения при измерении момента. Непосредственное жесткое закрепления датчика на валу или фланце допускает использование муфты только с одной стороны. Это позволяет облегчить установку в испытательной системе, укоротить общую длину испытательного стенда и снизить расходы [4].

Телеметрическая система датчика TF позволяет с высокой точностью передать сигнал, основанный на тензометрической технологии. Усилитель сигнала, установленный на измеряющем валу, усиливает измеренный сигнал, модулируя его до высокой частоты, передает его индуктивно (через ВЧ передатчик) на преобразователь. В преобразователе оцифрованный сигнал момента переходит в аналоговый выходной сигнал ± 5 В. Частота вращения может быть измерена и преобразована датчиком частоты через TTL выходной сигнал. Благодаря бесконтактному исполнению датчика момента, допустимый промежуток между измерительным фланцем и ВЧ передатчиком до 5 мм (в основном 1–3 мм)

позволяет производить прием сигнала независимо от осевых и радиальных перемещений. Еще одним преимуществом датчика TF является отсутствие интерференции сигнала и в отличие от других датчиков, TF не нуждается в круговой антенне на измерительном фланце. Дополнительно, датчик может быть закрыт кожухом, который не будет влиять на измеряемый сигнал

Датчики крутящего момента фланцевого типа могут измерять статический и динамический моменты на стационарном или вращающемся валу. В основном они используются на испытательных стендах двигателей внутреннего сгорания, электродвигателей и редукторов, а также могут быть установлены в линию для непосредственного контроля момента трансмиссии, приводов, ветрогенераторов, газовых турбин, судовых двигателей и др. (Рис. 1), [4].



Рис. 1. Комплект датчика крутящего момента серии TF

Датчик имеет следующий состав и характеристики:

- 1) Измерительный фланец;
- 2) ВЧ Передатчик;
- 3) Преобразователь;
- 4) Коаксиальный кабель (4 м).

Преимущества:

- 1) Бесконтактная передача сигнала, телеметрическая связь;
- 2) Крутящий момент: от 20 Нм до 150000 Нм;
- 3) Высокая точность: от 0,1 % до 0,25 %;
- 4) Компактный, прост в установке;
- 5) Высокая жесткость при кручении;
- 6) Не нуждается в обслуживании, так как отсутствуют подшипники и трущиеся детали;
- 7) Превосходная помехозащищенность и класс защиты: IP42 (опция IP 54).

Недостатки:

- 1) Не высокая максимальная скорость контролируемого вала;
- 2) При малых скоростях для определения момента диаметр вала должен быть мал;
- 3) Изнашиваемость контактных колец и, как следствие, недолгий срок службы датчика при использовании на больших скоростях;
- 4) Со временем снижается точность измерения сопротивления;

**СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА
НА БАЗЕ ДАТЧИКА RS420 ФИРМЫ DATUM**

Техническое описание системы измерения крутящего момента на базе датчика RS420.

Комплектация системы:

1. Цифровой датчик крутящего момента бесподшипниковый бесконтактный RS420 с диапазоном измерений до 2000 Н*м;
2. Модуль интерфейса датчика с аналоговым выходом и индикатором (RS232 и USB опционально);
3. Кабель USB 2 м для подключения к ПК;
4. Кабель соединительный 1 м (опционально до 10 м);
5. Сетевой адаптер 15–24В постоянного тока;
6. Программное обеспечение TorqueLog;
7. Калибровочный сертификат.

Характеристики датчика RS420:

Вращающийся цифровой бесконтактный бесподшипниковый датчик крутящего момента серии RS420 работает с использованием полномостовой тензорезисторной схемы.

Съём сигнала и питание тензомоста, установленного на роторе, происходит бесконтактным индуктивным способом. Благодаря установленному на валу преобразователе, сигнал передается на статор в цифровом формате, что позволяет избежать влияния сторонних воздействий и осуществить высокоточные измерения.

Статор устанавливается с зазором 3–5 мм по отношению к валу. Передача сигнала осуществляется по стандартному цифровому интерфейсу RS232 или USB, что позволяет транслировать калиброванные данные непосредственно с модуля на валу и избежать помех от внешних источников и интерференционных эффектов [5].

Аналоговые выходы интерфейса 0–10В или 4–20мА позволяют построить на датчике систему управления приводом. Встроенный в интерфейс индикатор отображает текущее значение крутящего момента (скорость и мощность опционально). При необходимости датчик можно использовать как с непосредственным подключением к ПК с предустановленным ПО TorqueLog, так и с различными индикаторами серий 300, 310, 370 (заказываются отдельно) (Рис. 2), [5].

Основные характеристики и преимущества датчика M425

1. Диапазоны от 0–5 Нм до 0–60,000 Нм;
2. Высокая дискретизация крутящего момента;
3. Высокая скорость передачи данных;
4. Опции точности и разрешения;
5. Бесконтактная передача данных;
6. Измерение статического и динамического момента;
7. Стабильная работа;
8. Магнитный датчик скорости – не подвержен загрязнению;
9. Легко интегрируется;
10. Надежная конструкция;
11. Выбор частоты опроса: 1–4000 опросов в секунду;
12. Низкое энергопотребление.

Недостатки:

1. при малых скоростях для определения момента диаметр вала должен быть мал;
2. со временем точность изменения сопротивления снижается;
3. фольговые датчики имеют малую механическую прочность;
4. проволочные датчики чувствительны к температуре [7].



Рис. 2. Подключение модульного интерфейса к датчику крутящего момента М425

КОЛЬЦЕВОЙ МАГНИТОУПРУГИЙ ДАТЧИК КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ФИРМЫ АВВ

В судостроении и судоходстве существует необходимость измерять такие важные параметры, как накопленная энергия, расход накопленной энергии, удельный расход энергии на 1 кВт/ч мощности, изменения (тенденции) и т.д. Таким образом, обеспечивается надежная информация для мониторинга, оценки и сокращения операционных расходов [6].

Главным элементом системы Torductor® 500 является датчик крутящего момента. Этот датчик базируется на технологии АВВ Pressductor®, использующей принцип изменения магнитного поля (Рис. 3), [6].



Рис. 3. Главный компонент системы измерения крутящего момента на валу и эффективности расхода топлива Torductor® 500

Torductor® главным образом предназначен для измерения крутящего момента. Он измеряет крутящий момент на вращающемся гребном валу, а также частоту его вращения, и вычисляет мощность на валу и энергию, производимую валом. Если в наличии имеются еще и топливные расходомеры, их можно подключить к системе Torductor® и таким образом вычислять удельный расход топлива.

Применение:

Измерение крутящего момента на валу и топливной эффективности позволяет получать данные в режиме реального времени. В результате вы можете:

- контролировать и оценивать состояние настройки главных двигателей,
- контролировать и оценивать работу всей двигательной установки,
- оптимизировать скорость и шаг винта при разных нагрузках,
- контролировать загрязнение корпуса судна/винта и прогнозировать сроки их технического обслуживания для очистки,
- защитить вал винта от превышения крутящего момента.

Преимущества:

- 1) Измерение крутящего момента производится со следующими преимуществами;
- 2) Превосходная долговременная стабильность: 0,5 % за 10 лет;
- 3) Отсутствует механический контакт с валом;
- 4) Не нужны хрупкие оптические приборы, что делает систему нечувствительной к влажности и загрязнениям;

- 5) Отсутствуют движущиеся части в системе, что исключает износ или смещение элементов;
- 6) Датчику требуется всего лишь 25 см свободной длины постоянного трубчатого или сплошного сечения;
- 7) Непревзойденная надежность и долговременная стабильность позиционирования.

Недостатки:

- 1) Невозможность определения направления приложения момента;
- 2) При проектировании необходимо учитывать материал вала [7].

ВЫВОДЫ

На основе проведенного обзора были проделаны следующие выводы по современным датчикам крутящего момента:

1. Системы, в которых в качестве первичного измерительного преобразователя используются тензорезисторы, имеют низкую надежность и ремонтпригодность в судовых условиях эксплуатации.

2. Системы с индуктивными преобразователями в свою очередь имеют низкую помехоустойчивость, обусловленную чувствительностью к вибрации и изменениям температуры.

3. Опыт эксплуатации кольцевых магнитоупругих преобразователей в системах измерения крутящего момента и крутильных колебаний, доказал их надежность и эффективность, обусловленную простотой, малой инерционностью, стабильностью характеристик и бесконтактным методом съема сигнала [8].

4. Появилась возможность использования сетевого промышленного интерфейса что в свою очередь дает возможность дистанционного управления системами автоматического измерения крутящего момента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Олещук В.А., Верещагина А.С. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учеб. пособие. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2015. – 92 с. [Oleshuk VA, Vereshagina AS. Methods and means of measurement, testing and control: schoolbook. Komsomolsk-on-Amur: KnAGTU, 2015. 92 p. (In Russ.)].
2. Левинтов С.Д., Борисов А.М. Бесконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 88 с. [Levintov SD, Borisov AM. *Beskontaktnye magnitouprugie datchiki krutyashchego momenta*. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 88 p. (In Russ.)].
3. Борисов А.М., Нестеров А.С. Средства автоматизации и управления: учеб. пособие. – Челябинск: ЮУрГУ, 2007. – 207 с. [Borisov AM, Nesterov AS. *Sredstva avtomatizacii i upravleniya: schoolbook*. Chelyabinsk: SUSU, 2007. 207 p. (In Russ.)].

4. Ловейкін В.С, Паламарчук Д.А, Іщук В.В. Експериментальне дослідження руху шарнірно-зчленованої стрілової системи крана при зміні вильоту вантажу // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2011. – №. 77. – С. 38–43. [Lovejkin VS, Palamarchuk DA, Ishchuk VV. Eksperimental'ne doslidzhennya ruhu sharnirno-zchlenovanoї strilovoї sistemi kрана pri zmini vil'otu vantazhu. *Girnichі, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini*. 2011;(77):38-43. (In Ukr.)].
5. Ясинский В.А. Модернизация испытательного стенда электроприводов: дипломный проект. Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт кибернетики (ИК), Кафедра вычислительной техники (ВТ); науч. рук. А. Н. Мальчуков. – Томск, 2016. – 250 с. [Yasinsky VA. *Modernizaciya ispytatel'nogo stenda elektroprivodov: diplomnyj proekt*. National research Tomsk Polytechnic University(TPU), Institute of Cybernetics (IC), Department of computer engineering (VT); scientific. Tomsk, 2016. 250 p. (In Russ.)].
6. Wallin C, Ling H, Rasool A. Evaluation of torque pulses in industrial applications using the torquesensor torductor (R)-S //SIcon/01. Sensors for Industry Conference. Proceedings of the First ISA/IEEE. Sensors for Industry Conference (Cat. No. 01EX459). IEEE, 2001. pp. 95-100. doi 10.1109/SFICON.2001.968506
7. Гуманюк М.Н. Магнитоупругие датчики. – Киев: Техніка, 1968. – 157 с. [Gumanyuk MN. *Magnitouprugie datchiki*. Kiev: Tehnika, 1968. 157 p. (In Russ.)].
8. Жадобин Н.Е, Алексеев Н.А, Крылов А.П. Электронные и микропроцессорные системы управления судовых энергетических и электроэнергетических установок: учеб. пособие. – М.: Проспект, 2010. – 528 с. [Zhadobin NE, Alekseev NA, Krylov AP. *Elektronnye i mikroprocessornye sistemy upravleniya sudovyh energeticheskikh i elektroenergeticheskikh ustanovok: schoolbook*. Moscow: Prospect, 2010. 528 p. (In Russ.)].

Сведения об авторе:

Раянов Тимур Александрович; аспирант;
eLibrary SPIN: 9507-8454; ORCID: 0000-0002-6423-0978;
E-mail: rayanov.timur@yandex.ru

Information about the author:

Raianov Timur Alexndrovich; postgraduate student;
eLibrary SPIN: 9507-8454; ORCID: 0000-0002-6423-0978;
E-mail: rayanov.timur@yandex.ru

Цитировать:

Раянов Т.А. Обзор новых типов датчиков крутящего момента // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 5–14. doi: 10.17816/transsyst2020615-14

To cite this article:

Raianov TA. Overview of new Types of Torque Sensors. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):5-14. doi: 10.17816/transsyst2020615-14

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 332.1

DOI 10.17816/transsyst20206115-29

© **К. Б. Квитко**

Вологодский научный центр РАН

(Вологда, Россия)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ: ИНФРАСТРУКТУРА, РЕЙТИНГИ, ТРАНСПОРТНЫЕ КОРИДОРЫ

Развитие мирового транспорта как и другие отрасли экономики зависит от глобализации и международной интеграции. Поэтому выбор траектории для интенсивного развития транспортной сферы, кластеризации на транспорте возможен по результатам сравнительного анализа транспортных систем разных стран мира. Целью данной работы является проведение сравнительного анализа объединенных по территориальному признаку транспортных систем мира для выявления схожих и отличительных характеристик с российской системой транспорта, которые станут предпосылками для внедрения зарубежного опыта транспортной кластеризации. В рамках данной работы проанализированы транспортные системы Европы, Азии, Северной Америки и России на предмет исследования инфраструктуры, деятельности транспортных и логистических предприятий и распространенности международных транспортных коридоров. Основными результатами проведенного анализа стала характеристика каждой объединенной транспортной системы и системы РФ, по специализации и характеру системы (открытая и закрытая), заинтересованности иностранных инвесторов поддерживать транспортную отрасль страны. Результаты, полученные в ходе работы, вносят вклад в развитие исследований отечественных ученых в области транспорта и систематизируют мировую статистику о транспортных системах государств, объединенных по территориальному признаку, и являющихся элементами глобальной транспортной системы. Проведенное исследование должно быть полезным для ученых, исследователей, занимающихся вопросами и проблемами развития транспортной отрасли, кластеризации на транспорте и управления транспортными системами.

Ключевые слова: транспортная система, транспортная инфраструктура, транспортное предприятие, логистическое предприятие, международный транспортный коридор, транспортно-логистический кластер

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© **K. B. Kvitko**Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences
(Vologda, Russia)**COMPARATIVE ANALYSIS OF INTERNATIONAL
TRANSPORT SYSTEMS: INFRASTRUCTURE, RATINGS,
TRANSPORT CORRIDORS**

The development of world transport depends on globalization and international integration, as well as other sectors of the economy. Therefore, the choice of the trajectory for the intensive development of the transport sector, clustering in transport is possible according to the results of a comparative analysis of transport systems around the world. The purpose of the article is to conduct a comparative analysis of the world-wide transport systems united by territorial criteria to identify similar and distinctive characteristics with the Russian transport system, which will become the prerequisites for the introduction of foreign experience in transport clustering. In the framework of this work, the transport systems of Europe, Asia, North America and Russia are analyzed for the study of infrastructure, the activities of transport and logistics enterprises and the prevalence of international transport corridors. The main results of the analysis were the characteristics of each integrated transport system and the RF system, by specialization and nature of the system (open and closed), the interest of foreign investors in supporting the country's transport industry. The results obtained in the course of work contribute to the development of research by Russian scientists in the field of transport and systematize world statistics on the transport systems of states united by territorial principle, which are elements of the global transport system. The study should be useful for scientists, researchers involved in issues and problems of the development of the transport industry, clustering in transport and transport system management.

Keys words: transport system, transport infrastructure, transport company, logistics company, international transport corridor, logistics cluster

ВВЕДЕНИЕ

Транспортная система государства является опорой сбалансированного развития экономики страны, поскольку транспорт обеспечивает связь между отраслями народного хозяйства.

Российская транспортная система обладает уникальным географическим положением, располагаясь между двумя мировыми экономическими центрами – Европой и Азией, что является конкурентным преимуществом для России [1]. Такое преимущественное транзитное расположение позволяет аккумулировать ресурсы международных транспортных коридоров (МТК), улучшить качество российского наземного грузового сообщения и совершить качественный скачок в развитии транспортной отрасли [2–4].

Однако отечественная транспортная система уступает зарубежным по обороту, качеству инфраструктуры и возможностям внедрения интеллектуальных транспортных систем. Причинами этого в совокупности являются политические ограничения транзита через территорию РФ, разрозненная деятельность транспортных и логистических предприятий, недостаточная экономическая поддержка инфраструктурных проектов [5].

Интенсивному развитию транспортной сферы страны может способствовать определение специализации транспортной системы, ее сильные и слабые стороны, чтобы действовать сфокусировано и осуществить опережающий скачок в развитии транспортной отрасли. Для этого проведен сравнительный анализ объединенных по территориальному признаку транспортных систем государств, чьи интеграционные связи оказывают существенное влияние на развитие мировой транспортной сферы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является проведение сравнительного анализа объединенных транспортных систем мира для выявления схожих и отличительных характеристик с российской системой транспорта, которые станут предпосылками для внедрения зарубежного опыта транспортной кластеризации в РФ.

Для реализации поставленной цели выполнены следующие задачи:

- определены объединенные транспортные системы мира;
- сформирован перечень показателей сравнительного анализа объединенных транспортных систем;
- по результатам анализа определены схожие и отличительные характеристики объединенных транспортных систем мира с российской системой транспорта.

Объектами сравнительного анализа стали три объединенные по территориальному признаку транспортные системы Европы, Азии и Северной Америки и транспортная система России.

К транспортной системе Европы отнесены инфраструктура, деятельность транспортных предприятий стран Европейского союза и государств, территориально расположенных в европейской части материка. В транспортную систему Азии вошли инфраструктура и транспортные предприятия Китая и Японии. Североамериканская транспортная система включает в себя инфраструктуру и предприятия США и Канады. Российская транспортная система рассматривается обособлено от инфраструктуры других государств, поскольку имеет особое геополитическое положение.

Методология сравнительного анализа объединенных транспортных систем мира основана на показателях, характеризующих транспортную систему, которая представляет собой совокупность транспортной инфраструктуры (1), предприятий (2), средств и управления транспортом (3), для обеспечения согласованного развития и функционирования всех видов транспорта с целью максимального удовлетворения транспортных потребностей при минимальных затратах [5]. Чтобы целостно проанализировать объединенные транспортные системы необходимо подобрать показатели, характеризующие все три части этой совокупности.

Характеристика транспортной инфраструктуры осуществлена по адаптированной методике [7] исходя из доступности данных мировой статистики [8–20]. Транспортная инфраструктура исследовалась по следующим параметрам:

- годовой грузооборот (морской, железнодорожный, автомобильный, трубопроводный транспорт);
- протяженность инфраструктуры (железнодорожный скоростной и нескоростной транспорт, автомобильный скоростной и нескоростной транспорт);
- объем прямых иностранных инвестиций в транспортную отрасль.

Исследование транспортных и логистических предприятий объединенных транспортных систем проведено на базе изучения рейтингов мировых транспортных компаний по объему грузооборота в год [21] и логистических компаний по объему годовой выручки [22]. Также проанализирован рейтинг российских транспортно-логистических компаний [23].

Анализ средств и управления транспортом в рамках объединенных транспортных систем реализовано через изучение международных транспортных коридоров, поскольку МТК представляет собой часть национальной или международной транспортной системы, включающей различные виды транспорта при развитой транспортной инфраструктуре международного класса с унифицированными требованиями к технике, технологии, информации, правовым взаимоотношениям и т.п. [24]. Исследование МТК, проходящих через объединенную транспортную систему формирует представление об открытости системы, объеме грузооборота и о тяготении системы к тому или иному виду транспорта.

АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Анализ транспортной инфраструктуры объединенных транспортных систем проведен на базе исследования годового грузооборота и протяженности инфраструктуры на автомобильном, железнодорожном, трубопроводном и морском транспорте. Для характеристики открытости

системы проанализированы прямые иностранные инвестиции в транспортную отрасль.

Исследование показателей, характеризующих транспортную инфраструктуру, проведено на базе международной статистики, находящейся в открытом доступе. Данные собраны за разные периоды времени и приведены к 2017 г. для объективного сопоставления (Табл. 1).

По показателю грузооборота практически по всем видам транспорта лидирует азиатская и североамериканская транспортная система, европейская система уступает им, но также сбалансированно развивает все виды транспорта.

Таблица 1. Анализ транспортной инфраструктуры

№	Показатель	Европа	Северная Америка	Азия	РФ
Годовой грузооборот [8-13]					
1	Автомобильный транспорт, млрд т-км	1 877,6	3 125,7	6 318	255
2	Железнодорожный транспорт, тыс. т/км	689,3	2 773,5	2 400	2493
3	Трубопроводный транспорт, млрд т-км	107,6	1 095	419,6	2615
4	Морской транспорт, млрд т-км	1,7	5	12,96	0,05
Протяженность инфраструктуры на 10 000 км ² территории [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден., 15]					
5	Автомобильные дороги, тыс км	5,75	3,92	6,09	0,97
6	Высокоскоростные автомобильные дороги, тыс. км (скорость от 120 км/ч)	0,08	0,06	0,15	0,00003
7	Железные дороги, тыс км	0,29	0,15	0,15	0,05
8	Высокоскоростные железные дороги, тыс км (скорость от 250 км/ч)	0,06	-	0,04	-
Объем прямых иностранных инвестиций (ПИИ) в транспортную отрасль [16-20]					
9	Объем ПИИ, млн. долл./год	17231,1	81,8	5473,8	10919
Источник: составлено автором на основе материалов [7-19]					

Для российской транспортной системы характерны лидирующие показатели грузооборота по трубопроводному и железнодорожному транспорту, но низкие показатели по автомобильному и морскому транспорту.

По протяженности инфраструктуры у каждой из транспортных систем наблюдается своя особенность. Европейская и азиатская системы сбалансировано развивают автомобильное и железнодорожное сообщение, содержащее также инфраструктуру для скоростного движения. В обеих системах треть железнодорожных путей включают инфраструктуру для сообщения со скоростью выше 250 км/ч. Высокоскоростные автомобильные трассы занимают в Азии 9 %, в Европе – 1,4 % от автодорожной инфраструктуры. Лидером автодорожной инфраструктуры как для скоростного движения (от 120 км/ч), так и для не скоростного,

является Северная Америка. Также североамериканская транспортная система имеет самую протяженную железнодорожную инфраструктуру.

Российская транспортная система по протяженности инфраструктуры уступает зарубежным. Протяженность автодорожной инфраструктуры в РФ в четыре раз меньше, чем в Северной Америке, скоростные автомобильные трассы занимают 0,9 % автодорожной инфраструктуры. Протяженность железнодорожных путей уступает в 3 раза азиатской и североамериканской, в 6 раз европейской транспортной системе, высокоскоростное железнодорожное сообщение в РФ в настоящий момент не реализовано.

Однако для иностранных инвесторов российская транспортная система считается более привлекательной, чем североамериканская и азиатская. Лидером по объему прямых иностранных инвестиций в транспортную отрасль является европейская транспортная система.

АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ И ЛОГИСТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ

Анализ транспортных и логистических предприятий мира проведен на основе рейтинга TOP-50 крупных транспортных компаний, осуществляющих международные перевозки, на 2018 г. по данным Alphaliner [21] (Табл. 2) и рейтинга TOP-50 3PL-операторов на 2017 г. по данным SJ ConsultingGroup [22] (Табл. 3). Поскольку российские транспортно-логистические компании не вошли в рейтинг TOP-50 3PL-операторов на 2017 г., проанализирован рейтинг российских транспортно-логистических компаний на 2018 г. по данным агентства INFOLine-Аналитика [23] (Табл. 4).

Из пятидесяти крупных транспортных компаний, осуществляющих международные перевозки, по объему грузооборота в год (TEU¹) на 2018 г. по данным Alphaliner 10 компаний из Европы (Дания, Швейцария, Франция, Германия, Израиль, Турция, Италия, Нидерланды), 4 компании из Северной Америки (США), 1 компания из Южной Америки (Бразилия), 4 компании стран Арабского Востока (ОАЭ, Иран) и 31 компания из Азии (Китай, Япония, Тайвань, Сингапур, Южная Корея, Таиланд, Индонезия). Российские компании в рейтинг ТОП-50 не вошли, самой крупной российской транспортной компанией, осуществляющей международные перевозки, по данным Alphaliner стала компания FESCO – ее объем грузооборота за 2018 год составил 15 457 TEU (54 место рейтинга).

¹ TEU – условная единица вместимости двадцатифутового контейнера, приблизительно равен 21,6 т

Таблица 2. Рейтинг транспортных компаний, осуществляющих международные перевозки на 2018 г. по данным Alphaliner

Место	Название	Страна	TEU
1	Maersk	Дания	4 185 231
2	Mediterranean Shg Co	Швейцария	3 657 272
3	COSCO Group	Китай	2 962 452
4	CMA CGM Group	Франция	2 687 996
5	Hapag-Lloyd	Германия	1 688 396
...
46	Namsung Shipping	Южная Корея	25 243
47	Temas Line	Индонезия	23 396
Место	Название	Страна	TEU
48	Transworld Group Singapore	Сингапур	20 990
49	Crowley Liner Services	США	20 062
50	Log-In Logistica	Бразилия	18 013
Источник: составлено автором на основе материалов [21]			

Анализ рейтинга TOP-50 3PL-операторов на 2017 г. по данным SJ ConsultingGroup позволили выявить противоположную картину. Крупнейшие логистические компании мира больше сосредоточены в Европе (18 из 50) и в Северной Америке (18 из 50 компаний относятся к США). Одиннадцать компаний относятся к азиатскому сектору рынка (Китай, Япония, Кувейт, Южная Корея), также в рейтинг вошли по одной компании из Австралии и Южной Африки.

Таблица 3. Рейтинг TOP-50 3PL-операторов на 2017 г. по данным SJ ConsultingGroup

Место	Название компании	Страна	Выручка, млн. долл.
1	DHL Logistics	Германия	30775
2	Kuehne & Nagel	Швеция	22572
3	DB Schenker Logistics	Германия	17783
4	C.H. Robinson Worldwide	США	13503
5	DSV	Дания	11355
...
46	OIA Global	США	1266
47	Logwin AG	Люксембург	1262
48	Werner	США	1248
49	Mainfreight	Новая Зеландия	1227
50	Yamato-BIZ Logistics	Япония	1189
Источник: составлено автором на основе материалов [22]			

Таблица 4. Рейтинг российских транспортно-логистических компаний на 2018 г по данным агентства INFOLine-Аналитика

Место	Компания	Основное операционное подразделение	Выручка, млн. долл.	Объем грузоперевозок, млн. т
1	ОАО «РЖД	«РЖД Логистика»	2,62	63,2
2	ОТЛК ЕРА	ОТЛК ЕРА	1,46	1,68
3	DHL Group	«DHL Россия»	1,44	1,4
4	FM Logistics	«ФМ Лодистик Восток»	1,12	2,6
5	«Елтранс+»	«Елтранс+»	0,81	0,15
6	ГК Major	«Мэйджор Карго Сервис»	0,80	0,46
7	«Кюне+Нагель»	«Кюне+Нагель»	0,72	0,39
Место	Компания	Основное операционное подразделение	Выручка, млн. долл.	Объем грузоперевозок, млн. т
8	«СпецТрансГрупп»	«СпецТрансГрупп»	0,54	0,02
9	GEFCO	«Жефко»	0,50	1,8
10	Itella Russia	«Ителла»	0,50	0,66

Источник: составлено автором на основе материалов [23]

Анализ рейтинга российских транспортно-логистических компаний на 2018 г по данным агентства INFOLine-Аналитика (Табл. 4) показал, что, несмотря на высокие показатели годового грузооборота российских транспортно-логистических компаний, объемы выручки за год значительно уступают зарубежным (аутсайдер рейтинга Рейтинг TOP-50 3PL-операторов [22] имеет годовую выручку, которая больше годовой выручки «РЖД Логистика» в 453,8 раза).

АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРОВ

Дополнительным импульсом развития транспортной системы государства является наличие международного транспортного коридора (МТК), представляющего собой часть национальной или международной транспортной системы, включающей различные виды транспорта, работающие на одном направлении, с учетом стратегических грузо- и пассажиропотоков при развитой транспортной инфраструктуре международного класса с унифицированными требованиями к технике, технологии, информации, правовым взаимоотношениям и т.п. [24].

Существующие международные транспортные коридоры опираются на систему из одного-двух видов транспорта. Морской транспорт является основой Южного морского пути – крупнейшего МТК, проходящего через Суэцкий канал и соединяющего Азию, Европу и Северную Америку.

Северный морской путь, который соединяет европейскую часть России и Азию, в четыре раза короче пути через Суэцкий канал, является вторым международным транспортным коридором, опирающимся на морской транспорт.

Авиационный транспорт представлен в мировом грузовом сообщении в формате шести направлений транзитных воздушных трасс, связывающих Европу и Азию: Азиатское (проходит только через Азию), Трансазиатское (Азия, РФ, Европа), Транссибирское (Азия, РФ, Европа), Трансполярное (Азия, РФ, Европа), Кроссполярное (Азия, РФ) и Трансвосточное (Азия, РФ) направления [25]. Северная Америка не включена в маршруты шести направлений транзитных воздушных трасс.

Железнодорожный и автомобильный транспорт являются основными для пятнадцати международных транспортных коридоров, десять из которых расположены на европейской части материка и пять связывают Европу с Азией.

Десять Панъевропейских транспортных коридоров имеют следующие маршруты:

- I: Хельсинки – Таллин – Рига – Каунас – Варшава;
- II: Берлин – Варшава – Минск – Москва – Нижний Новгород;
- III: Берлин – Дрезден – Вроцлав – Львов – Киев;
- IV: Берлин / Нюрнберг – Прага – Будапешт – Констанца / Салоники / Стамбул;
- V: Венеция – Триест / Копер – Любляна – Будапешт – Ужгород – Львов;
- VI: Гданьск – Варшава – Катовице – Жилина;
- VII: Дунай (водный путь ниже Вены);
- VIII: Дурес – Тирана – Скопье – София – Варна;
- IX: Хельсинки – Санкт-Петербург – Москва – Псков – Киев – Кишинев – Бухарест – Димитровград – Александруполис;
- X: Зальцбург – Любляна – Загреб – Белград – Ниш – Скопье – Велес – Салоники.

МТК Панъевропейский коридор VII отличается от остальных девяти коридоров тем, что содержит не только железнодорожную и автодорожную транспортную инфраструктуру, но и включает участки пути по внутренним водам Дуная.

Евразийское международное транспортное сообщение, основано на железнодорожном сообщении и имеет следующие маршруты:

- Транссибирская магистраль (Брест – Минск – граница Финляндии – граница Украины – Москва – Екатеринбург – Новосибирск – Владивосток – Улан-Батор – Пекин);
- Северный трансазиатский коридор (Чоп – Киев – Москва – Челябинск – Достык – Алашанькоу – Ляньюньган);

- Центральный трансазиатский коридор (Киев – Волгоград – Алматы – Актогай – Достык – Алашанькоу – Ляньюньган);
- Южный трансазиатский коридор (Стамбул – Анкара – Табриз – Тегеран – Машад – Серакс – Ташкент – Алматы – Актогай – Достык – Алашанькоу – Ляньюньган);
- TRACECA (Transport Corridor Europe-Caucasus-Asia) (Констанца – Варна – Ильичевск – Потти – Батуми – Баку – Ташкент – Алматы – Актогай-Достык – Алашанькоу – Ляньюньган).

Через территорию России проходит три Панъевропейских МТК (I, II и IX) и три евроазиатских транспортных коридора (Транссибирская магистраль, Северный трансазиатский коридор и Центральный трансазиатский коридор) [26].

Двадцать три существующих международных транспортных коридора следующим образом проходят через объединенные транспортные системы Европы, Азии и Северной Америки и транспортную систему России (Табл. 5):

Таблица 5. МТК в мировых транспортных системах

Вид транспорта МТК	Европа 19/23	Азия 13/23	Северная Америка 1/23	РФ 12/23
Морской (2)	1	2	1	1
Авиационный (6)	3	6	0	5
Железнодорожный и автомобильный (15)	15	5	0	6

ВЫВОДЫ

1. Европейская транспортная система имеет сбалансировано развитую инфраструктуру, активно развивает высокоскоростное железнодорожное сообщение. Несмотря на меньшие по объему показатели грузооборота, европейская транспортная система является самой привлекательной для иностранных инвесторов. Транспортно-логистические предприятия Европы имеют большую долю в логистической деятельности. Благоприятные условия для этого создают девятнадцать из двадцати трех международных транспортных коридоров, которые проходят через европейскую территорию.

2. Азиатская транспортная система характеризуется высоким грузооборотом на морском, автомобильном и железнодорожном транспорте, широко развитой инфраструктурой автомобильных и железных дорог. Высокоскоростное железнодорожное сообщение в

азиатской системе самое развитое и быстрое в мире. Азиатские транспортные компании в основном специализируются на перевозке контейнерных грузов. Тринадцать из двадцати трех международных коридоров проходят через азиатскую систему, что позволяет ей сохраняться открытой для мирового сообщения.

3. Североамериканская транспортная система отличается рекордными показателями грузооборота по железнодорожному транспорту, сбалансировано развитой транспортной инфраструктурой. Высокоскоростное автомобильное сообщение лучше всего в мире развито в Северной Америке. Предприятия транспортной отрасли, также как и европейские, больше тяготеют к логистической деятельности. Североамериканская транспортная система обладает признаками закрытой системы – она не привлекательна для иностранных инвесторов, лишь один международный транспортный коридор (путь через Суэцкий канал) проходит через Северную Америку.

4. Российская транспортная система характеризуется слабо развитой морской и автомобильной инфраструктурой, но имеет специализацию на железнодорожном и трубопроводном транспорте. Отсутствие высокоскоростного железнодорожного сообщения и самые низкие в мире показатели протяженности скоростной автодорожной инфраструктуры свидетельствуют о низком уровне развития транспортной инфраструктуры в РФ. Российская транспортная система является открытой – через нее проходит двенадцать из двадцати трех международных транспортных коридора, иностранные инвесторы готовы вкладываться в транспортную инфраструктуру РФ охотнее, чем в азиатский и североамериканский, поскольку это обеспечит лучшее качество, надежность и снижение показателей времени и стоимости доставки. Сейчас транспортно-логистические предприятия РФ уступают зарубежным коллегам по грузообороту и показателям выручки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Транспортная система РФ, специализируясь на трубопроводном и железнодорожном транспорте, может применять опыт азиатских и европейских коллег по развитию коммуникации и интеграции железнодорожного транспорта с другими видами, аккумулируя грузопоток и получая транзит от зарубежных коллег со схожей специализацией транспортных систем. Однако, при реализации только одних крупных инфраструктурных проектов с государственным и государственно-частным партнерством, модернизация транспортной инфраструктуры страны будет проходить с гораздо меньшими темпами, чем у иностранных партнеров и Россия останется в черед «догоняющих» технологических

лидеров. Для реализации интенсивного вектора развития транспортной отрасли в РФ важно развивать малый и средний бизнес – транспортные и логистические предприятия, которые, объединившись в транспортно-логистические кластеры, способны реализовать инновационные технологии на транспорте, гибко реагировать на изменения рынка и политические условия, создавать и модернизировать транспортную инфраструктуру региона, где они расположены. Вклад не только в инфраструктуру, но и в кадры, и в экономические институты приведет к росту конкурентоспособности российских транспортных и логистических предприятий на мировом уровне, увеличению грузопотока и сформирует новый импульс развития транспорта в России.

Результаты, полученные в ходе исследования, вносят вклад в развитие исследований отечественных ученых в области транспортной и систематизируют мировую статистику о транспортных системах государств, объединенных по территориальному признаку.

Проведенное исследование должно быть полезным для ученых, исследователей, занимающихся вопросами и проблемами развития транспортной отрасли, кластеризации на транспорте и управления транспортными системами.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов исследований.

Библиографический список / References

1. Соколова Я.В. Алгоритм структурирования крупного инфраструктурного проекта в форме государственно-частного партнерства // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – №1. – С. 005-018. [Sokolova YV. The algorithm of structuring a large infrastructure project in the form of public-private partnership. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(1):005-018. (In Russ., In Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst2018041005-018
2. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Оценка эффективности видов наземного транспорта для массовых грузовых перевозок // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – №4. – С. 204-220. [Smirnov SA, Smirnova OY. Evaluation of effectiveness of different transport modes for regular mass freight transportation. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(4):204-220. (In Russ., In Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201734204-220
3. Михальченко А.А., Савченко А.В. Создание конкурентных преимуществ транспортной системы Республики Беларусь в международных транспортных коридорах // Развитие теории и практики автомобильных перевозок, транспортной логистики. – 2017. – С. 178–186. [Mihal'chenko AA, Savchenko AV. Sozдание konkurentnyh preimushchestv transportnoj sistemy Respubliki Belarus' v mezhdunarodnyh transportnyh koridorah. *Razvitie teorii i praktiki avtomobil'nyh perevozk, transportnoj logistiki*. 2017:178-186. (In Russ)].

4. Budrin AG, Budrina EV, Lebedeva AS, Rogavichene LI, Kvitko KB. Intelligent Transport Systems as an Integration Platform for Creating a Network of Regional Transport and Logistics Complexes. 2019 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS) [Internet]. IEEE; 2019 Sep; Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/itqmis.2019.8928343>.
5. Гасратов Э.И. Транспортная система России: состояние и перспективы развития // Известия СПбГЭУ. – 2017. – № 1–2(103). – С.138–136. [Gasratov EI. Transportnaya sistema Rossii: sostoyanie i perspektivy razvitiya. *Izvestiya SPbGEU*. 2017;1-2(103):138-136. (In Russ.)].
6. Краткий экономический словарь. – М., 1987. [Kratkij ekonomicheskij slovar'. Moscow; 1978. (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.ekoslovar.ru/102.html>. Ссылка активна на 20.06.2019.
7. Андрианов Ю.В., Комаров В.В. Объекты транспортной инфраструктуры: категориально-понятийный аппарат // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – № 5(66). – С. 51–55. [Andrianov YV, Komarov VV. Transport infrastructure objects: framework of categories and concepts. *Transport Russian Federation*. 2016;5(66):51-55. (In Russ.)].
8. Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). [Organizaciya ekonomicheskogo sotrudnichestva i razvitiya (OESR). [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://stats.oecd.org/BrandedView.aspx?oecd_bv_id=trsprrt-data-en&doi=g2g5557d-en#. Ссылка активна на 19.06.2019.
9. The worldwide railway organization (UIC). [Internet]. [cited 2019 June 16]. Available from: <https://uic.org/>.
10. Рейтинг Топ-15 контейнерных портов Европы 2017. PortEconomics. [Rejting Top-15 kontejnernih portov Evropy 2017. PortEconomics [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://ports.com.ua/articles/top-15-konteynerykh-portov-evropy>. Ссылка активна на 17.06.2019.
11. Грузооборот портов Китая за 2017 год вырос на 6,4 % – до 8,62 млрд тонн. Информационно-аналитическое агентство «ПортНьюс» 25.01.2018. [Gruzooborot portov Kitaya za 2017 god vyros na 6,4 % - do 8,62 mlrd tonn. Informacionno-analiticheskoe agentstvo “PortN'yus” 25.01.2018. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <http://portnews.ru/news/252451/>. Ссылка активна на 19.06.2019.
12. 国土交通省 (法人番号 2000012100001). [Internet]. [cited 2019 June 19]. Available from: http://www.mlit.go.jp/statistics/details/port_list.html [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (corporate number 2000012100001) (In Jap.)].
13. Транспорт в России. 2018: Стат.сб./Росстат. – М., 2018. – Т. 65. – 101 с. [Transport v Rossii. *Stat.sb.Rosstat. T. 65*. Moscow; 2018. 101 p. (In Russ.)].
14. The World Factbook (CIA). [Internet]. [cited 2019 June 16]. Available from: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2085rank.html>.
15. Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 N 1090 (ред. от 04.12.2018) «О Правилах дорожного движения». [Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 23.10.1993 N 1090 (red. ot 04.12.2018) “O Pravilah dorozhnogo dvizheniya” [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/. Ссылка активна на 15.10.2019.
16. Canada’s State of Trade: Trade and Investment Update – 2018. [Internet]. [cited 2019 August 08]. Available from: https://www.international.gc.ca/economist-economiste/assets/pdfs/performance/state_2018_point/SoT_PsC_2018-Eng.pdf.

17. Global Investment Grows America's Economy. [Internet]. [cited 2019 August 08]. Available from: <https://ofii.org/sites/default/files/FDIUS%202017.pdf>.
18. 2017 年度中国 对外直接投资统计公报. 中华人民共和国商务部 [2017 annual China foreign direct investment statistics bulletin. Ministry of Commerce of PRC [Internet]. [cited 2019 June 19]. Available from: <http://images.mofcom.gov.cn/hzs/201810/20181029160118046.pdf> (in Chinese)].
19. JETRO Invest 2018. [Internet]. [cited 2019 August 08]. Available from: https://www.jetro.go.jp/ext_images/invest/ijre/report2018/pdf/report2018_1.pdf
20. OECD International Direct Investment Statistics 2018 [Internet]. [cited 2019 August 08]. Available from: https://read.oecd-ilibrary.org/finance-and-investment/oecd-international-direct-investment-statistics-2018_bb55ccaf-en#page1
21. Рейтинг крупных транспортных компаний, осуществляющих международные перевозки на 2018 г. Alphaliner. [Rejting krupnyh transportnyh kompanij, osushchestvlyayushchih mezhdunarodnye perevozki na 2018 g. Alphaliner. [Internet]. [cited 2019 September 25]. (In Russ.). Доступно по: <https://alphaliner.axsmarine.com/PublicTop100/>. Ссылка активна на 25.09.2019.
22. Рейтинг TOP-50 3PL-операторов на 2017 г. SJ ConsultingGroup. [Rejting TOP-50 3PL-operatorov na 2017 g. SJ ConsultingGroup. [Internet]. (In Russ.). Доступно по: <http://jindel.com/wp-content/uploads/2018/06/2017-Top-50-Logistics-Providers-April-2018.pdf>. Ссылка активна на 25.09.2019.
23. Рейтинг российских транспортно-логистических компаний на 2018 г. INFOLine-Аналитика. [Rejting rossijskih transportno-logisticheskikh kompanij na 2018 g. INFOLine-Analitika.. [Internet]. (In Russ.). Доступно по: <https://infoline.spb.ru/news/?news=160781>. Ссылка активна на 25.09.2019.
24. Галабурда В.Г., Соколов Ю.И., Королькова Н.В. Управление транспортной системой: Учебник. – М.: МЦ ЖДТ, 2016. – 343 с. [Galaburda VG, Sokolov YI, Korol'kova NV. *Upravlenie transportnoj sistemoj: Manual*. Moscow: MC ZHDT; 2016. 343 p. (In Russ.)].
25. Чижков Ю.В. Международные транспортные коридоры - коммуникационный каркас экономики // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2015. – №5(60). – С. 9–15. [Chizhkov YV. Interational transport corridors as a communication frame of economy. *Transport Russian Federation*. 2015;5(60):9-15. (In Russ.)].
26. Герами В.Д., Колик А.В. Управление транспортными системами. Транспортное обеспечение логистики: учебник и практикум для академического бакалавриата. – М.: Юрайт, 2017. – 438 с. [Gerami VD, Kolik AV. *Upravlenie transportnymi sistemami. Transportnoe obespechenie logistiki: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata*. Moscow: Yurajt; 2017. 438 p. (In Russ.)].

Сведения об авторе:**Квитко Катерина Борисовна**, аспирант;

eLibrary SPIN: 3109-1917; ORCID: 0000-0003-4396-2755;

E-mail: kbkvitko@mail.ru

Information about the author:**Katerina B. Kvitko**, postgraduate student;

eLibrary SPIN: 3109-1917; ORCID: 0000-0003-4396-2755;

E-mail: kbkvitko@mail.ru

Цитировать:

Квитко К.Б. Сравнительный анализ международных транспортных систем: инфраструктура, рейтинги, транспортные коридоры // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 15–29. doi: 10.17816/transsyst20206115-29

To cite this article:

Kvitko KB. Comparative Analysis of International Transport Systems: Infrastructure, Ratings, Transportation Corridors. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):15-29. doi: 10.17816/transsyst20206115-29

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.318.43
DOI 10.17816/transsyst20206130-47

© А. В. Кашуба

Ростовский государственный университет путей сообщения
(Ростов-на-Дону, Россия)

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Обоснование: Вентильно-индукторная электрическая машина (ВИМ) является перспективным типом электромеханического преобразователя энергии. Она используется как в двигательном (ВИД), так и в генераторном (ВИГ) режимах. ВИД могут применяться не только в механизмах с вращательным движением, но и в качестве линейных двигателей, в том числе в магнитолевитационных транспортных системах.

Вопросам проектирования ВИД посвящено достаточно много публикаций. В развитие этого направления предлагается дальнейшее совершенствование процесса проектирования ВИД с использованием оптимизационного метода формирования геометрических размеров зубцовой зоны.

Цель: Снижение пульсаций электромагнитного момента ВИД посредством оптимизации геометрических размеров зубцовой зоны.

Материалы и методы: Для моделирования магнитных полей использовалась программа FEMM 4.2. Реализация оптимизационного алгоритма, а также обработка результатов полевых расчетов осуществлялись в программе MATLAB. За основу для разработки оптимизационного алгоритма был взят метод оптимизации Монте-Карло (метод случайного поиска), а его усовершенствование было достигнуто с помощью математических методов, основанных на теории вероятности.

Результаты: В результате проведения оптимизационных расчетов была получена геометрия зубцовой зоны, обеспечивающая снижение пульсаций электромагнитного момента ВИД со 122 % до 40 %.

Заключение: Приведенные в статье исследования позволяют сделать вывод об эффективности применения при проектировании ВИД оптимизационного алгоритма, а также о целесообразности снятия ограничений на форму зубца ВИД и переходе на криволинейную форму, определяемую в процессе решения задачи оптимизации по заданному критерию.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, пусковой режим, пульсации момента, оптимизация, магнитная система, неравномерный воздушный зазор, криволинейная форма зубца.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© **A.V. Kashuba**

Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

OPTIMIZATION METHOD FOR CALCULATING THE GEOMETRICAL DIMENSIONS OF THE TOOTH ZONE OF THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Background: Switched reluctance motor (SRM) is a promising type of electromechanical energy converter. It is used in both motor and generator modes. SRM can be used not only in mechanisms with rotational motion, but also as linear motors, including maglev transport systems.

A lot of publications are devoted to SRM design issues. In development of this direction, further improvement of the SRM design process is proposed using the optimization method of forming the geometrical dimensions of the tooth zone.

Aim: Reducing of electromagnetic torque ripple SRM by optimizing the geometrical dimensions of the tooth zone.

Materials and Methods: To simulate magnetic fields, the FEMM 4.2 program was used. The implementation of the optimization algorithm and the processing of the results of field calculations, was carried out in the MATLAB program. The Monte Carlo optimization methods (they rely on random sampling) was taken as the basis for developing the optimization algorithm, and its improvement was achieved using mathematical methods based on probability theory.

Results: As a result of the optimization calculations, the tooth zone geometry was obtained, which provides a reduction in the pulsation of the SRM electromagnetic torque ripple from 122 % to 40 %.

Conclusion: The studies presented in the paper indicate the effectiveness of using the optimization algorithm in designing SRM, as well as the feasibility of removing restrictions on the shape of the tooth SRM and the use of a curved tooth shape, which is determined in the process of solving the optimization problem by a determined criterion.

Keywords: switched reluctance motor, starting mode, torque ripple, optimization, magnetic system, irregular air gap, curved tooth shape.

ВВЕДЕНИЕ

Вентильно-индукторная электрическая машина (ВИМ) является одним из перспективных типов электромеханических преобразователей энергии. Она используется как в двигательном (ВИД), так и в генераторном режимах (ВИГ).

ВИД имеет возможность работать только в составе электропривода, который представляет собой сочетание следующих основных элементов

(Рис. 1): ВИД, нагрузка (исполнительный орган), система управления электроприводом и силовой преобразователь частоты питающих импульсов. Чаще всего ВИД используется в безредукторных приводах, но в отдельных случаях целесообразно использовать редуктор.

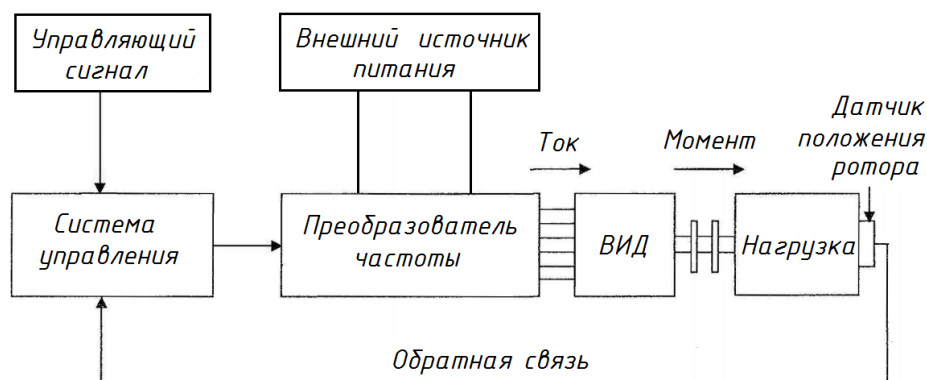


Рис. 1. Структурная схема ВИД [1, 2]

ВИД в составе электропривода выполняет главную функцию – преобразование электрической энергии в механическую. ВИД состоит из статора и пассивного ротора. Шихтованный магнитопровод статора имеет полюса, охваченные фазными катушками сосредоточенного типа. Ротор не содержит обмотки и постоянных магнитов, а только пакет пластин электротехнической стали в аксиальном направлении с выступающими зубцами в радиальном направлении, которые служат для замыкания магнитного потока.

ВИД могут иметь различные варианты исполнения [1]: как однофазные, так и многофазные. Наиболее популярные варианты трехфазного исполнения ВИД представлены на Рис. 2.

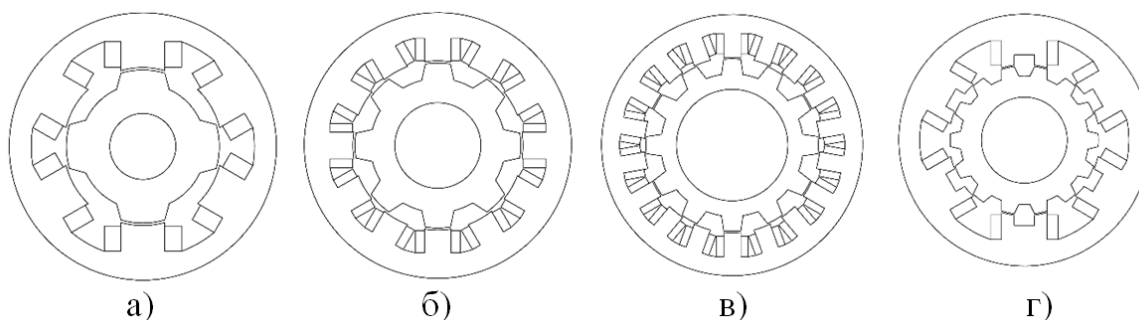


Рис. 2. Схематические изображения магнитной системы различных вариантов трехфазного исполнения ВИД:

- а) конфигурация 6/4;
- б) конфигурация 12/8;
- в) конфигурация 18/12;
- г) конфигурация 12/14

При условном обозначении конфигурации зубцовой зоны числитель дроби указывает на число полюсов статора, знаменатель – на число зубцов ротора.

Принцип действия ВИД основан на свойстве ферромагнитных тел ориентироваться во внешнем магнитном поле таким образом, чтобы пронизывающий их магнитный поток принимал максимальное значение [1]. При подаче питания на фазные обмотки в нужный момент времени и при своевременном снятии питания становится возможным обеспечить непрерывное однонаправленное вращение ротора. Подача и снятие питания осуществляются по сигналу, поступающему от датчика положения ротора.

В двигательном режиме работы питание фазы должно осуществляться при координатах ротора, соответствующих сближению зубцов, (возрастание индуктивности фазы, $dL/d\theta > 0$, Рис. 3), в генераторном режиме – наоборот, при отдалении зубцов друг от друга, что соответствует убыванию индуктивности фазы ($dL/d\theta < 0$, Рис. 3).

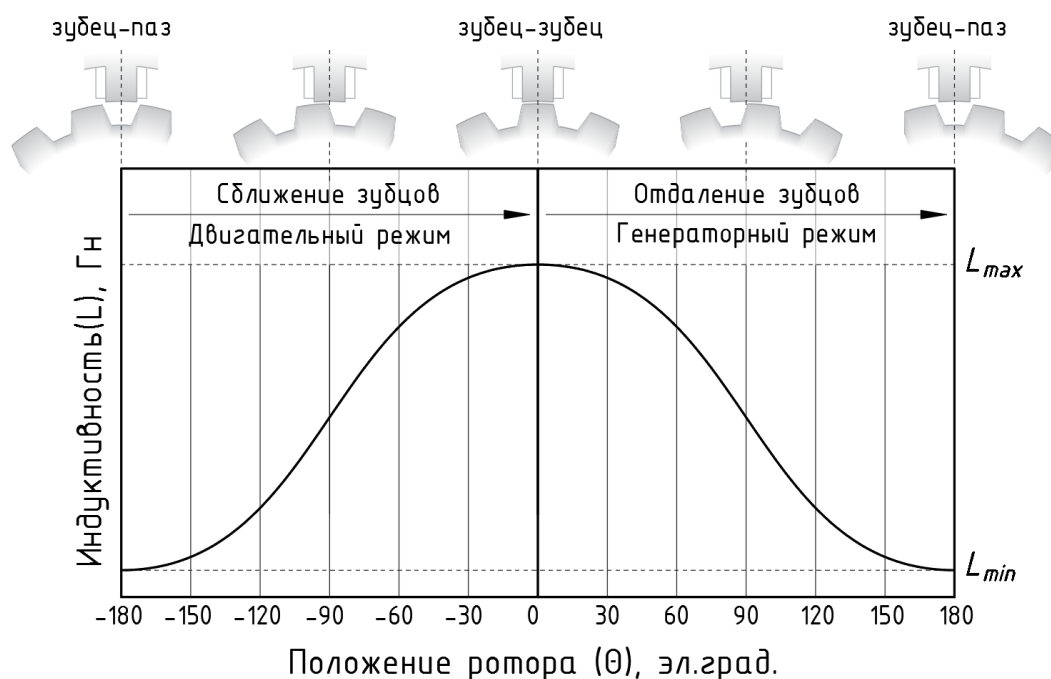


Рис. 3. Характерная для ВИМ зависимость индуктивности одной фазы от положения ротора

ВИД, как и двигатели других типов, могут применяться не только в механизмах с вращательным движением, но и в качестве линейных двигателей для различных транспортных систем, в том числе магнитолевитационных [3]. В магнитолевитационном транспорте наибольшее распространение получили линейные синхронные (ЛСД) и асинхронные (ЛАД) двигатели [4–7]. Линейные ВИД также имеют

перспективы применения в этом виде транспорта. Взаимное притяжение зубцов подвижной и неподвижной части линейных ВИД позволяет реализовывать как тяговое усилие, так и обезвешивание экипажной части, решать вопросы его вертикальной стабилизации.

Вентильно-индукторные двигатели обладают рядом достоинств по сравнению с электрическими машинами других типов [1, 2, 8]:

- простота конструкции;
- высокая надежность;
- технологичность изготовления активной части;
- отсутствие скользящего контакта и коллекторного узла;
- возможность регулирования частоты вращения в широком диапазоне.

Однако для дальнейшего совершенствования характеристик ВИД необходимо решить ряд задач, в числе которых снижение пульсаций электромагнитного момента. Существует немало электроприводов, к двигателям которых предъявляются требования пониженных пульсаций момента:

- тяговый привод транспортных средств [8–13] (пульсации момента в пусковом режиме могут вызвать нестабильность трогания с места транспортного средства и боксование);
- приводы, исполнительный орган которых непосредственно или косвенно взаимодействует с человеком: например, электроусилитель руля автомобиля [9, 14–16] (нестабильность крутящего момента порождает неприятные для человека вибрации).

При снижении пульсаций момента ВИД существенно расширяется их область применения в перечисленных выше электроприводах.

Основные способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента ВИД можно разделить на основные группы:

- введение специальных алгоритмов в систему управления ВИД [12, 17, 18];
- увеличение числа фаз машины [19];
- выполнение магнитопроводов ВИД специальной формы (возможны варианты как со скосом зубцов [4, 9-12], так и без скоса [13, 20]).

Данная работа посвящена последнему способу из перечисленных выше: выполнение магнитопроводов ВИД специальной формы (без скоса), определяемой в процессе решения задачи оптимизации по заданному критерию.

Изготовление магнитопроводов по рассчитанным оптимальным геометрическим размерам не усложняет конструкцию машины и технологию её изготовления.

В статье рассмотрены вопросы формирования геометрии зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя с применением оптимизации по критерию: минимум пульсаций электромагнитного момента.

В предложенном алгоритме учтены также возможности оптимизации активной части ВИД по двум и более критериям. Выражение целевой функции может содержать различные переменные, отражающие приоритет той или иной эксплуатационной характеристики машины в зависимости от требований технического задания, например, средний уровень электромагнитного момента, КПД, нагрев, материалоемкость, стоимость изготовления, и др. Однако в таком случае многокритериальная оптимизация может потребовать проводить компьютерное моделирование в разных программных средах, что, безусловно, скажется на продолжительности проведения расчетов.

В данной статье рассмотрена оптимизация по одному критерию. Ценность изложенных исследований заключается в том, что полученные результаты оптимизации позволяют обозначить предельные возможности по снижению пульсаций момента ВИД за счет изменения геометрии магнитопровода и сформулировать общие рекомендации для выбора геометрических размеров зубцовой зоны при проектировании ВИД.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

В основу разработанного алгоритма оптимизации положен существующий метод оптимизации Монте-Карло (метод случайного поиска). Основным отличием разработанного алгоритма является плавный переход в процессе оптимизационных расчетов от случайной величины с равномерной плотностью вероятности к случайной величине с нормальным распределением плотности вероятности.

Суть разработанного алгоритма заключается в следующем (Рис. 4). На начальном этапе оптимизации всем оптимизируемым параметрам присваиваются случайные значения («вбросы») с равномерной плотностью вероятности. После нескольких «вбросов» координаты «лучшей точки» служат математическим ожиданием μ для случайной величины уже с нормальным распределением (1). После каждого вычисления целевой функции дисперсия случайной величины уменьшается, математическое ожидание – корректируется. Таким образом, обеспечивается самоадаптация поиска экстремума. По истечении всех отведенных вычислений целевой функции за результат оптимизации принимаются координаты «лучшей точки» из всех имеющихся.

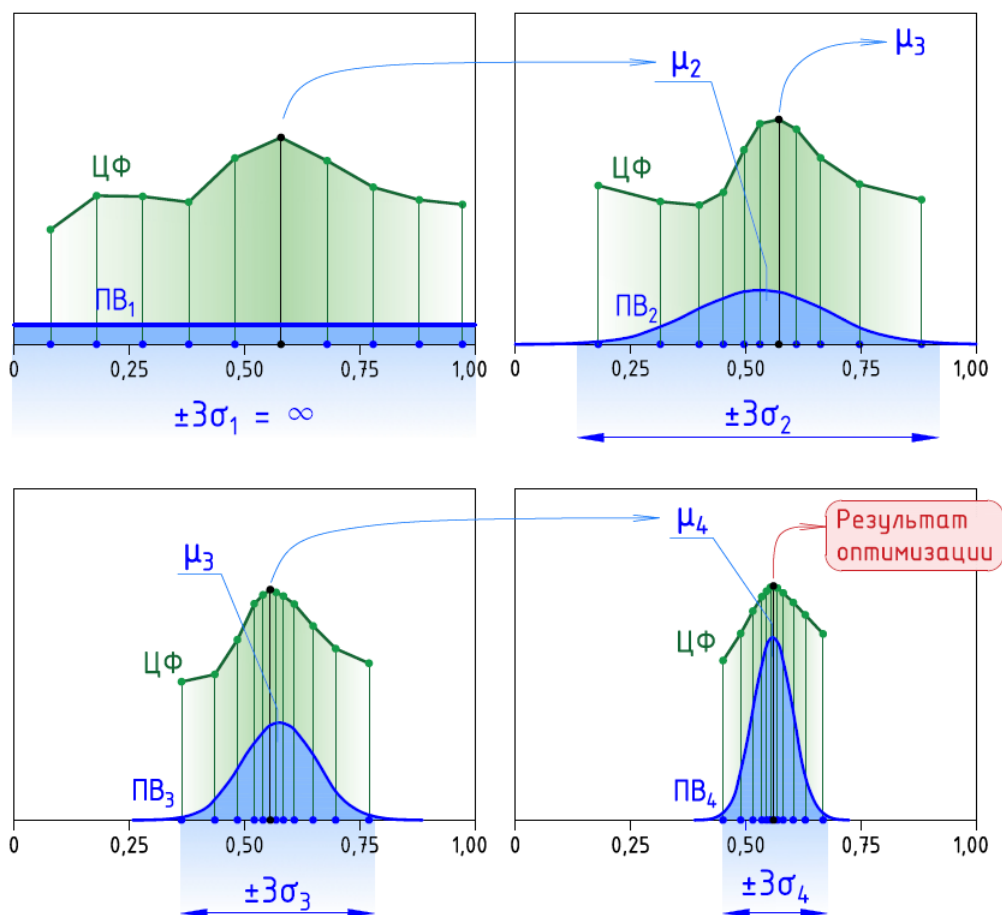
$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}, \quad (1)$$

где μ – математическое ожидание;
 σ – среднеквадратическое отклонение;
 σ^2 – дисперсия случайной величины.

Разработанный на основе метода Монте-Карло алгоритм позволяет находить глобальный экстремум целевой функции с точностью, достаточной для ряда практических задач, связанных с проектированием ВИД, за сравнительно небольшое время.

ЦФ – целевая функция
 ПВ – плотность вероятности случайной величины
 μ – математическое ожидание случайной величины

$\pm 3\sigma$ – область наиболее вероятного (99,7 %) значения случайной величины, имеющей нормальное распределение



Ось абсцисс: значения оптимизируемого параметра
 (относительные единицы: 0–min; 1–max)

Рис. 4. Иллюстрация принципа разработанного алгоритма оптимизации

В рамках данного исследования целевая функция в задаче оптимизации выражается следующим образом:

$$Ц(\Delta M) = \Delta M = \frac{\max(M_{\text{э}}) - \min(M_{\text{э}})}{\frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{э}} dt} \cdot 100\% \rightarrow \min,$$

где $Ц$ – целевая функция;

ΔM – величина пульсаций электромагнитного момента, %;

$M_{\text{э}}$ – мгновенное значение электромагнитного момента, Нм;

T – интервал повторяемости электромагнитного момента, эл.град;
для трехфазных ВИД при парной коммутации $T = 120$ эл.град.

Пульсации особенно нежелательны при пуске двигателя и при вращении на низких частотах. Поэтому для оптимизации геометрических размеров была выбрана форма тока, характерная для пускового режима ВИД (прямоугольная форма тока): питание подается на фазу в рассогласованном положении, а снятие питание происходит в согласованном положении для каждой фазы.

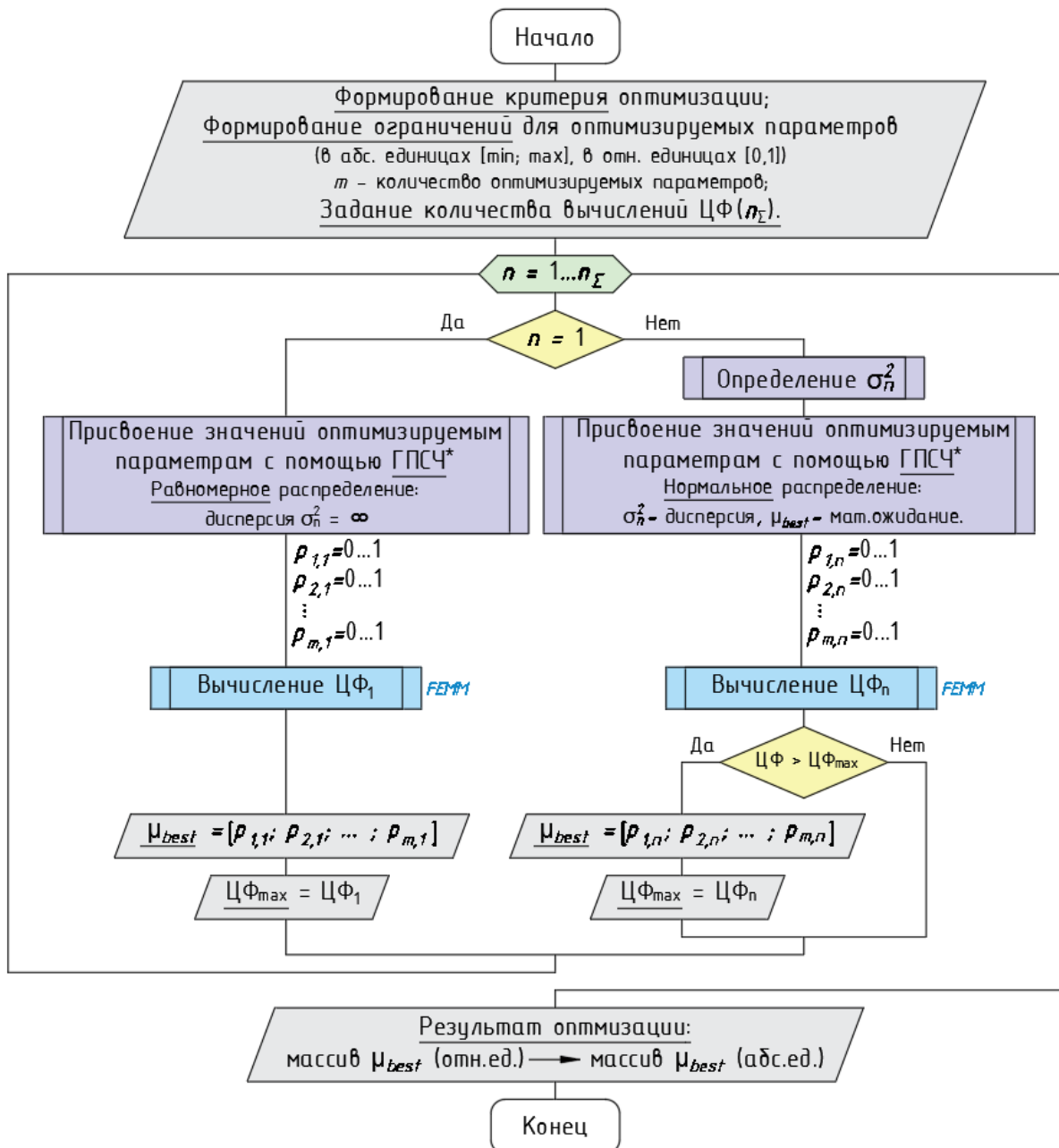
Предлагаемый алгоритм оптимизации активной части может быть использован не только применительно к ВИД вращательного движения, но и к вариантам линейного исполнения.

В случае оптимизации геометрических размеров тягового линейного магнитолевитационного транспорта целесообразно формировать комплексный критерий оптимизации, учитывающий требования: плавности хода, высокого значения КПД, минимального веса.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ

Численная реализация разработанного алгоритма выполнена на языке программирования MATLAB. Блок-схема алгоритма оптимизации изображена на Рис. 5.

В рамках данного исследования в качестве исходного варианта для оптимизации был взят трехфазный ВИД конфигурации 6/4, выполненный в корпусе асинхронного двигателя АИР-80, и спроектированный с применением энергетического подхода [1, 2, 8].



*ГПСЧ - генератор псевдослучайных чисел

Рис. 5. Блок-схема разработанного алгоритма оптимизации

В статье рассмотрено два примера оптимизации геометрических размеров ВИД 6/4:

1. Оптимизация геометрических размеров ротора ВИД с традиционной формой зубцов ротора: подразумевает наличие прямолинейных и дугообразных участков контура магнитопровода (Рис. 6);

В первом примере в качестве оптимизируемых параметров приняты:

- ширина зубца ротора (по вершинам) $b1r$;
- наклон боковой поверхности зубца $b2r$;
- радиус, образующий глубину паза $R2r$.

2. Оптимизация геометрических размеров ротора ВИД с криволинейной формой зубцов ротора: контур магнитопровода представляет собой произвольную изогнутую кривую (Рис. 7).

Во втором примере в качестве оптимизируемых параметров выступают уже соотношения, указывающие какую часть общей длины определяющего отрезка занимает магнитопровод ($p_1 - p_1$). Предлагаемое расположение определяющих отрезков обеспечивает гладкость контура магнитопровода в вершине зубца (p_1 , красный цвет) и в центре паза (p_{21} , синий цвет).

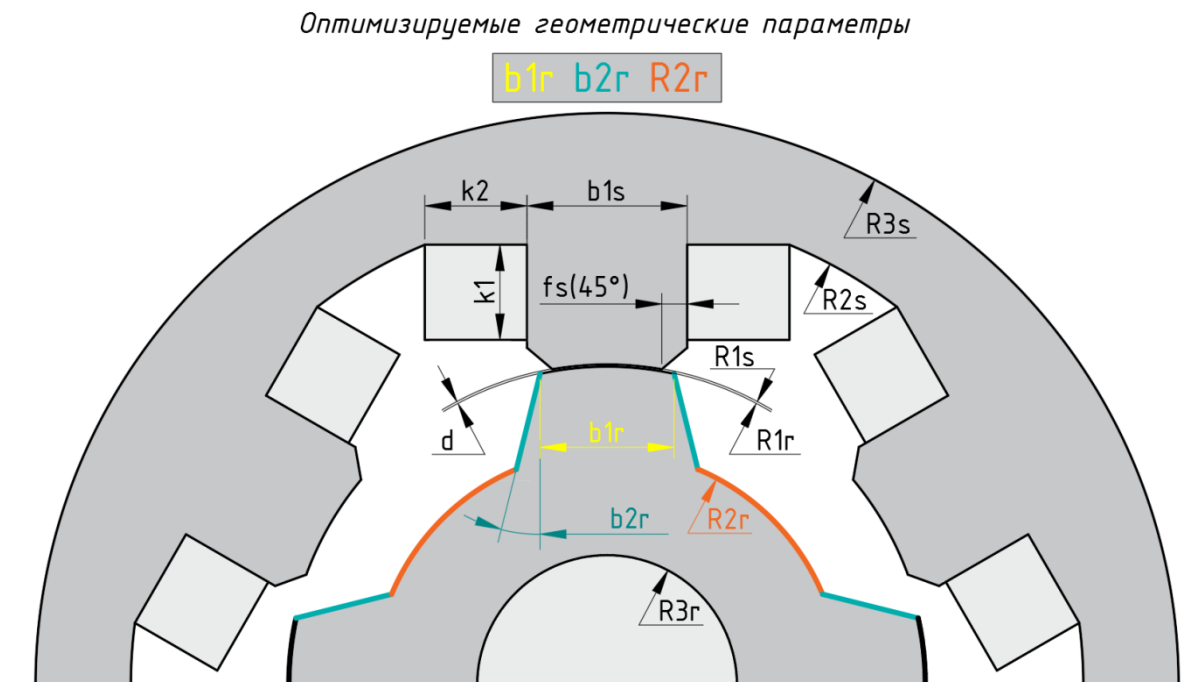


Рис. 6. Геометрия магнитной системы и оптимизируемые геометрические размеры (пример № 1)

Остальные геометрические размеры (указаны без выделения цветом в обоих случаях) в оптимизации не участвуют. В Табл. приведены числовые значения указанных на Рис. 6 и Рис. 7 размеров.

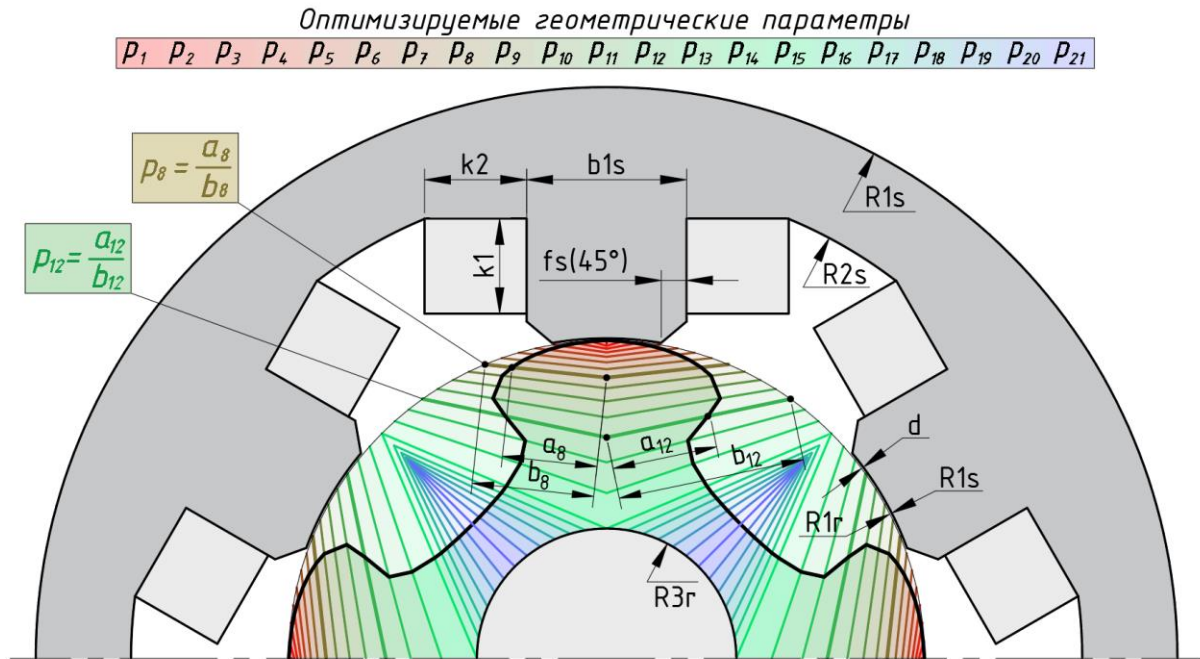


Рис. 7. Геометрия магнитной системы и оптимизируемые геометрические размеры (пример № 2)

Таблица. Геометрические размеры магнитной системы исходного двигателя и ограничения для оптимизации

Геометрический размер	Единицы измерения	Исходный вариант	Ограничения для оптимизации	
			Пример №1	Пример №2
$b1r$	мм	15,5	10 ... 35	–
$b2r$	град.	15	–10 ... 20	–
$R2r$	мм	29	17 ... 32	–
p_1 ⋮ p_{21}	о.е.	–	–	0 ... 1
d	мм	0,25	<i>const</i>	$d_{min} = d$
$b1s$	мм	18,5	<i>const</i>	<i>const</i>
f_s	мм	2,9	<i>const</i>	<i>const</i>
$k1$	мм	11	<i>const</i>	<i>const</i>
$k2$	мм	11,8	<i>const</i>	<i>const</i>
$R1s$	мм	37	<i>const</i>	<i>const</i>
$R2s$	мм	55	<i>const</i>	<i>const</i>
$R3s$	мм	66	<i>const</i>	<i>const</i>
$R1r$	мм	36,75	<i>const</i>	<i>const</i>
$R3r$	мм	15	<i>const</i>	<i>const</i>
Длина пакета магнитопровода	мм	110	<i>const</i>	<i>const</i>

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

В ходе проведения оптимизации геометрических размеров в обоих примерах вызов целевой функции осуществлялся 600 раз. Один вызов целевой функции представляет собой 14 расчетов магнитного поля в программе FEMM [21] для разных положений ротора. На Рис. 8 показан результат оптимизации для двух примеров в виде геометрии магнитной системы.

Как видно из Рис. 8 для двух примеров оптимизации имеются общие геометрические особенности:

- более широкий зубец ротора по сравнению с исходным вариантом;
- более глубокий паз ротора по сравнению с исходным вариантом;
- верхняя часть зубца ротора шире нижней части.

Учитывая, что для двух примеров оптимизации используются принципиально разные способы построения геометрии, указанные выше геометрические особенности могут служить рекомендациями для снижения пульсаций момента ВИД 6/4 в пусковом режиме.

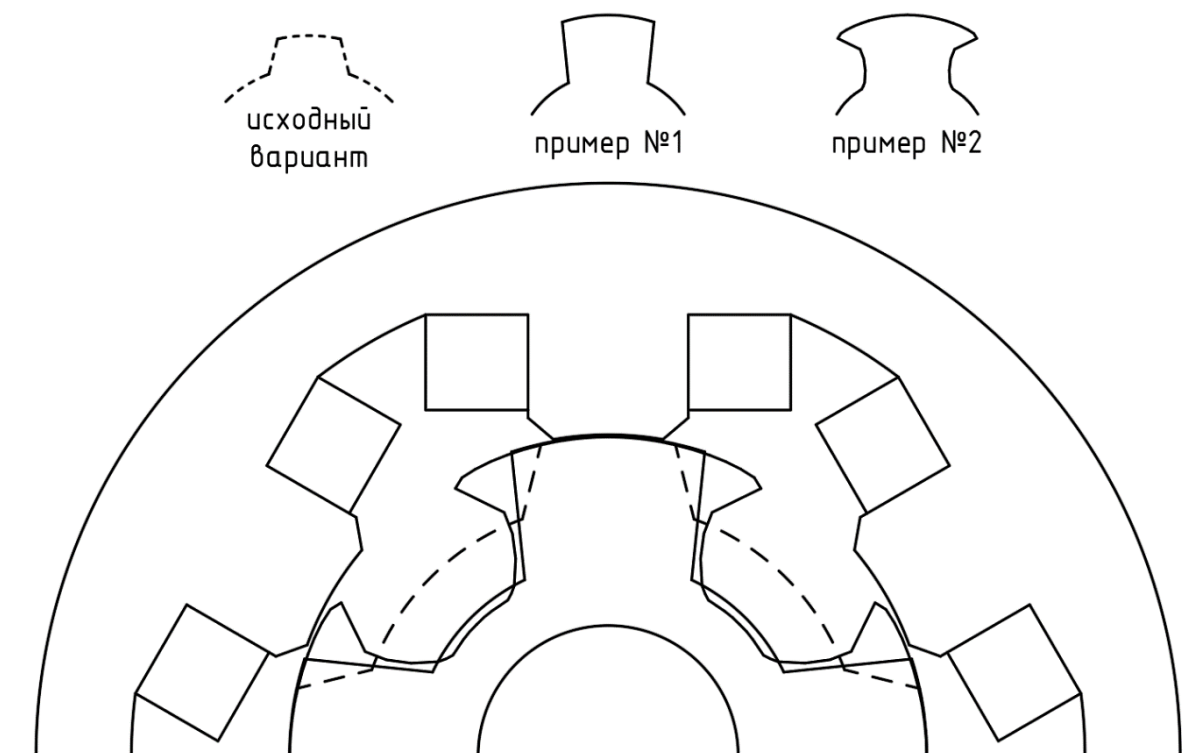


Рис. 8. Геометрические размеры магнитной системы исходного двигателя и сравнение с результатами оптимизации

На Рис. 9 и 10 показана картина распределения магнитного поля для двух результатов оптимизации.

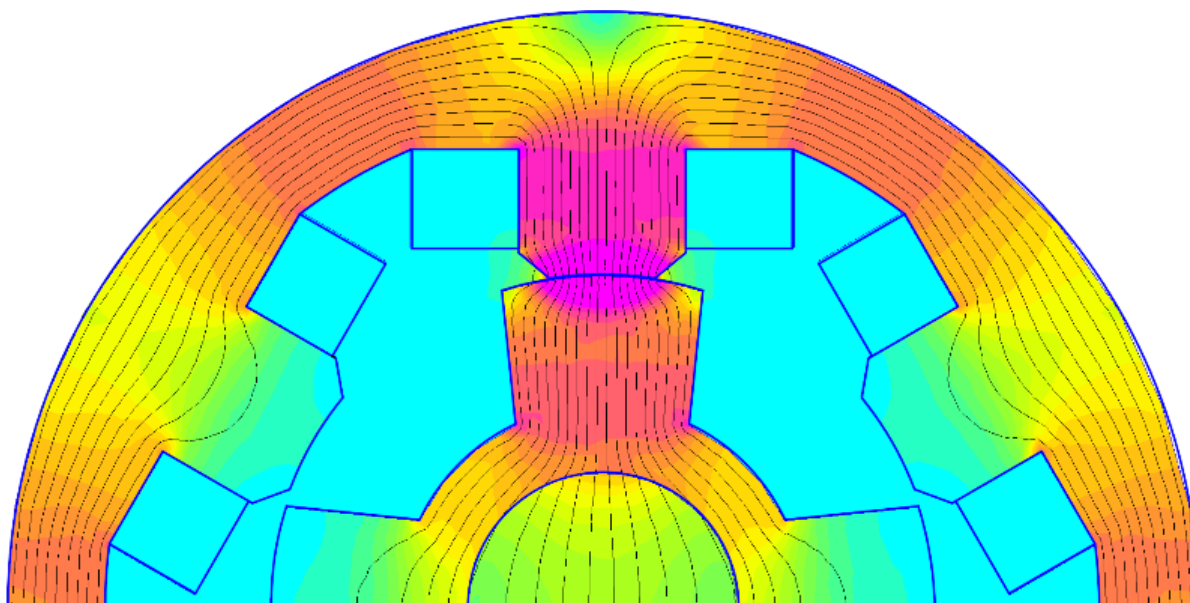


Рис. 9. Магнитное поле для геометрии, полученной в результате оптимизации (пример № 1), скриншот работы программы FEMM [21]

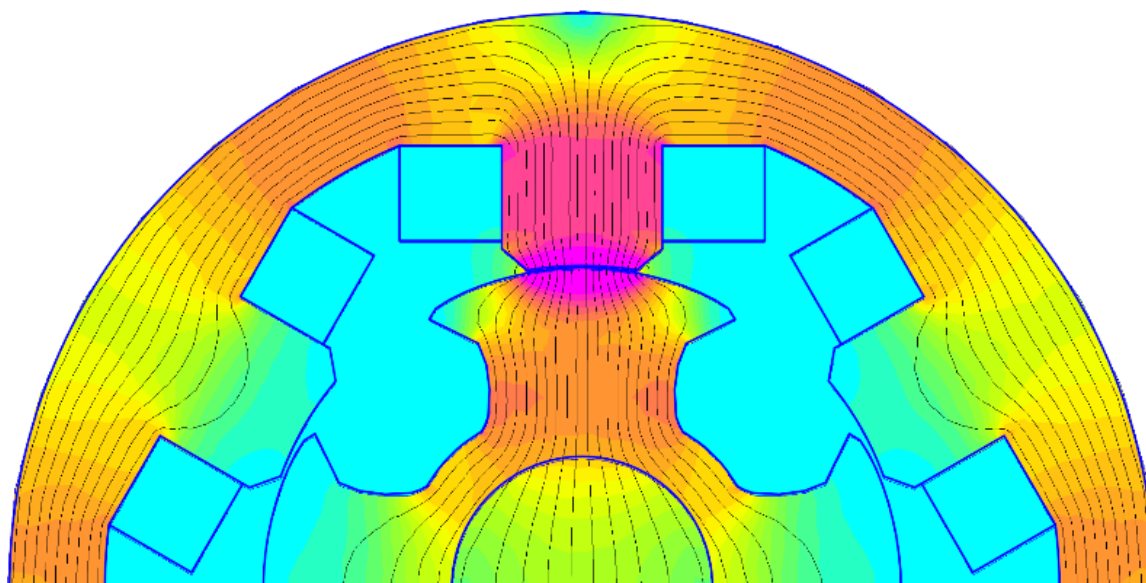


Рис. 10. Магнитное поле для геометрии, полученной в результате оптимизации (пример № 2), скриншот работы программы FEMM [21]

Отдельный интерес в полученной геометрии активной части ВИД (пример № 2) представляет воздушный зазор. Он имеет неравномерный характер и изменяется с минимального значения 0,25 мм до 1,5 мм (Рис. 11).

На Рис. 12 дано сравнение кривых момента для оптимальной геометрии (примеры № 1 и № 2) и исходного варианта.

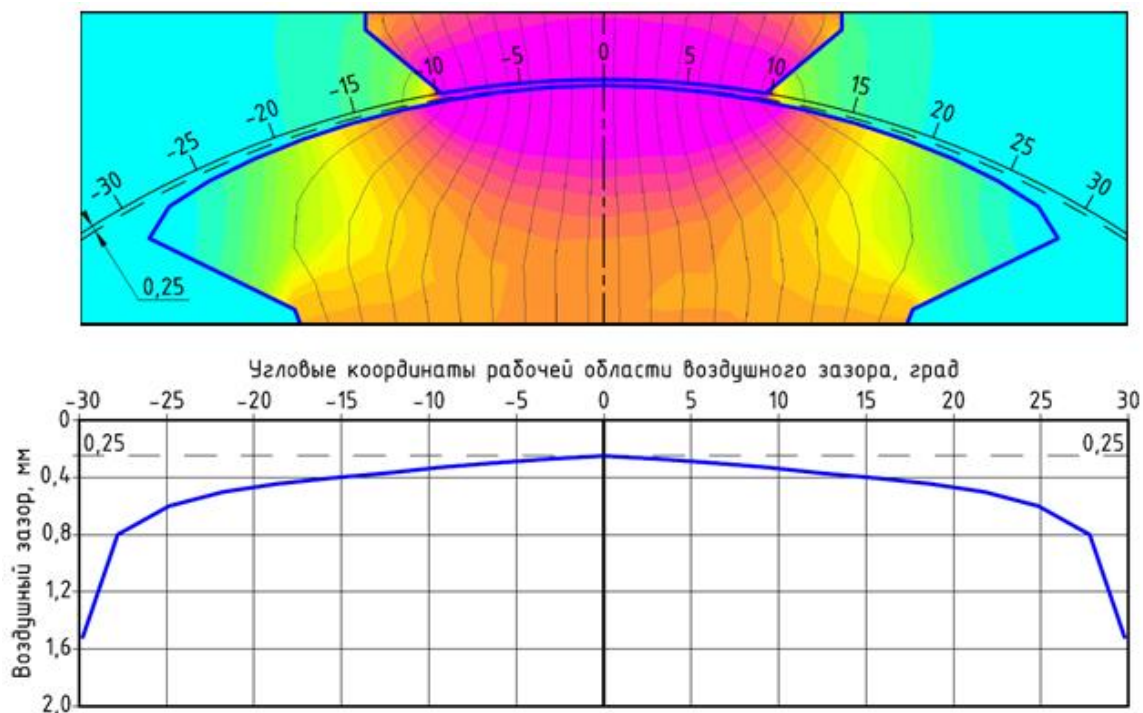


Рис. 11. Неравномерность воздушного зазора (пример № 2)

Справа показаны минимальные, максимальные и средние значения кривой момента за интервал повторяемости (120 эл. град.), а также приведены значения пульсаций для трех вариантов геометрии. Нулевое положение ротора соответствует согласованному положению фазы «А».

В интервале $(-60; 0)$ эл. град. питание подается на фазы «А» и «В». В интервале $(0; 60)$ эл. град. питание подается на фазу «В». Эти законы управления характерны для пускового режима при симметричной парной коммутации ВИД.

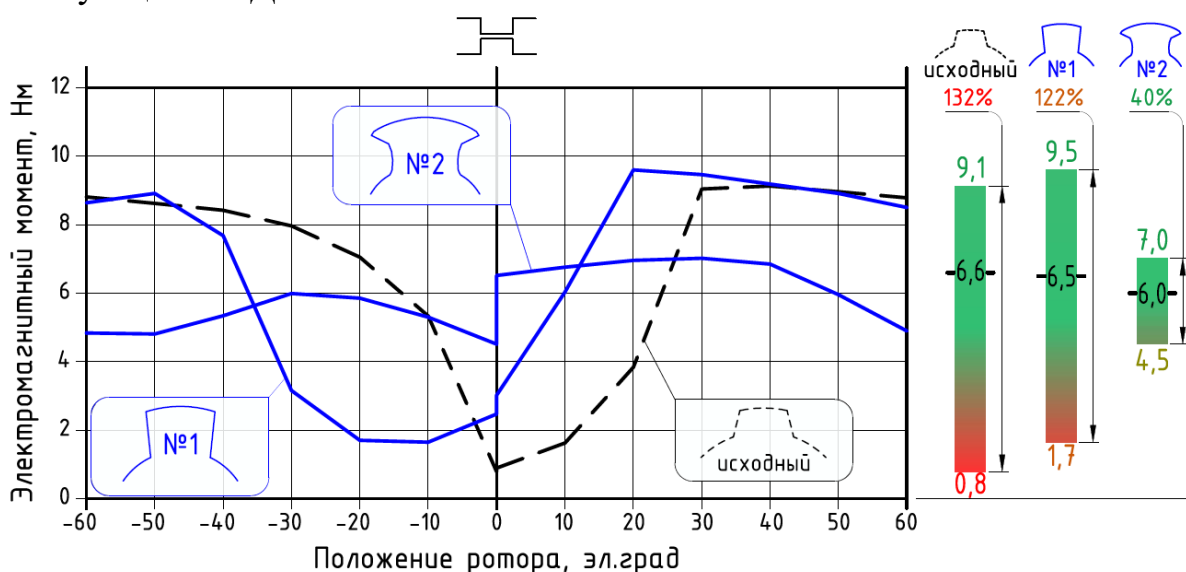


Рис. 12. Сравнение кривых момента, соответствующих пусковому режиму оптимальной геометрии (примеры № 1 и № 2) и исходного варианта

Как видно из Рис. 12, оптимизация *криволинейной* формы зубца ротора ВИД позволяет существенно снизить пульсации момента в пусковом режиме, как по сравнению с исходным вариантом (со 132 % до 40 %), так и по сравнению с оптимизацией *традиционной* формы зубца, задающейся с помощью дуг и отрезков (со 122 % до 40 %). Это объясняется тем, что контур криволинейного зубца расширяет возможности оптимизации. Зубец может принимать практически любую форму, т.к. отсутствуют ограничения, обусловленные его прямолинейностью и дугообразностью. Использование криволинейной формы зубца предопределило формирование неравномерного воздушного зазора в ВИД. Это открывает дополнительные возможности для снижения пульсаций момента ВИД 6/4 в пусковом режиме по сравнению с оптимизацией традиционной формы зубца.

Для обоих случаев (пример 1 и 2) наблюдается некоторое снижение среднего значения электромагнитного момента. Но подобный отрицательный эффект не является характерным [13], и может быть устранен при многокритериальной оптимизации.

Для ВИД с исходной геометрии характерен существенный провал мгновенного значения момента до 0,8 Нм при среднем значении 6,6 Нм. Это обстоятельство ограничивает область применения данного двигателя в приводах, где по условиям эксплуатации возможен высокий момент сопротивления при пуске. Геометрические размеры активной части, полученные в результате оптимизации криволинейной формы зубца, открывают возможности применения ВИД таких приводах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье исследования доказывают эффективность применения оптимизационного алгоритма при проектировании ВИД и подтверждают целесообразность использования криволинейной формы зубцов ВИД.

Использование криволинейной формы зубцов позволило снизить пульсации пускового момента ВИД 6/4 более чем в три раза (со 132 % до 40 %).

Предложенный способ формирования геометрии активной части ВИД может быть использован не только для изменения формы зубцов ротора, но и статора, учитывая ограничения, вносимые расположением обмотки. Это открывает дальнейшие перспективы по снижению пульсаций электромагнитного момента ВИД.

Предлагаемый алгоритм оптимизации может быть применен не только к ВИД вращательного движения, но и к двигателям линейного

исполнения, в том числе для линейных тяговых ВИД магнитолевитационного транспорта.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели: учеб. пособие. – М.: МЭИ, 2003. [Kuznetsov VA, Kuzmichev VA. Ventil'no-induktornyye dvigateli: schoolbook. Moscow: MEI; 2003. (In Russ.)].
2. Miller T. Switched Reluctance Motors And Their Control. Oxford: Magna Physics; 1993.
3. Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Высокоскоростная контейнерная транспортная система // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 5-18. [Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. High-speed container transport system. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):5-18 (In Russ, Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst2018425-18
4. Гулин С.А., Никитин В.В., Середа Г.Е., Середа Е.Г. Системы электроснабжения собственных нужд высокоскоростных магнитолевитационных экипажей с линейным синхронным тяговым приводом // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 70–83. [Gulin SA, Nikitin VV, Sereda GE, Sereda EG. Auxiliary power supply systems for high speed maglev vehicles with linear synchronous traction motors. *Transportation Systems and Technology*. 2017;2(3):70-83. (In Russ, Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20162370-83
5. Поляков В.А., Хачапуридзе Н.М. Интегративная модель тяговой силы магнитолевитирующего поезда // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 58–68. [Polyakov VA, Nachapuridze NM. Integrative model of a magnetically levitated train's traction force. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(1): 58-68. (In Russ, Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20173158-68
6. Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А., и др. Линейные асинхронные двигатели без продольного краевого эффекта // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 60–69. [Solomin VA, Solomin AV, Chekhova AA, et al. Linear Induction Motors without Longitudinal Edge Effect. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):60-69. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20195260-69
7. Соломин В.А., Бичилова А.А., Замшина Л.Л., Трубицина Н.А. Регулируемый линейный асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой для магнитолевитационного транспорта // Транспортные системы и технологии. - 2017. – Т. 3. – №4. – С. 127–149. [Solomin VA, Bichilova AA, Zamshina LL, Trybitsina NA. Adjustable squirrel-cage linear induction motor for magnetic levitation transport. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(4):127-149. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201734127-149
8. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design And Applicationsotor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications.; 2001. doi:10.1201/9781420041644

9. Пахомин С.А. Развитие теории и практики проектирования энергосберегающих вентиляльно-индукторных электроприводов: дис.... д-ра техн. наук. – Новочеркасск, 2001. – 386 с. [Pakhomin SA. Razvitiye teorii i praktiki proyektirovaniya energosberegayushchikh ventil'no-induktornykh elektroprivodov [dissertation]. Novocherkassk; 2001. 386 p. (In Russ)].
10. Щербаков В.Г., Петрушин А.Д., Хоменко Б.И. и др. Тяговые электрические машины: учеб. пособие. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. [Shherbakov VG, Petrushin AD, Homenko BI, et al. *Tyagovye jelektricheskie mashiny*. Moscow: “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte”; 2015. (In Russ.)].
11. Бочаров В.И., Захаров В.И., Коломейцев Л.Ф. и др. Тяговые электродвигатели электровозов / под ред. В.Г. Щербакова. – Новочеркасск: Агенство «Наутилус», 1998. – 672 с. [Bocharov VI, Zaharov VI, Kolomejcev LF, et al. *Tyagovye jelektrodvigateli jelektrovozov*. Shherbakov VG, editor. Novocherkassk: Agenstvo “Nautilus”; 1998. 672 p. (In Russ.)].
12. Шайхиев А.Р. Улучшение тяговых свойств электроподвижного состава с вентиляльно-индукторным тяговым электроприводом с учётом ограничения по сцеплению: дис.... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2004. – 120 с. [Shaikhiyev AR. Uluchsheniye tyagovykh svoystv elektropodvizhnogo sostava s ventil'no-induktornym tyagovym elektroprivodom s uchotom ogranicheniya po stsepleniyu [dissertation]. Rostov-on-Don; 2004. 120 p. (In Russ)].
13. Петрушин А.Д., Щербаков В.Г., Кашуба А.В. Оптимизация магнитной системы вентиляльно-индукторного электродвигателя // Известия высших учебных заведений Электромеханика. – 2017. – № 1. – С. 20–27. [Petrushin AD, Shherbakov VG, Kashuba AV. Magnetic system optimization of switched reluctance motor. *Scientific and Technical Journal Russian Electromechanics*. 2017;4:20-27. (Russ., Engl.). doi: 10.17213/0136-3360-2017-1-20-27
14. Пахомин С.А., Сулейманов У.М., Крайнов Д.В., Дувакин А.В. Вентиально-индукторный электропривод усилителя рулевого управления для автомобилей семейства «Калина» / Труды V Международной (16-й Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. 18-21 сентября 2007; СПб. 2007. – С. 477–479. [Pakhomin SA, Sulejmanov UM, Krajnov DV, Duvakin AV. Ventil'no-induktornyj jelektroprivod usilitelja rulevogo upravlenija dlja avtomobilej semejstva “Kalina”. Proceedings of the Fifth International (Sixteen All-Russian) conference on the electric drive. 2007 Sept 18-21; St. Petersburg. 2007. p. 477-479. (In Russ.)].
15. Сулейманов У.М., Крайнов Д.В. Вентиально-индукторный электропривод электро-мехнического усилителя рулевого управления // Известия высших учебных заведений: Электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 56–59. [Sulejmanov UM, Krajnov DV. The Rectifier-Inductor Electric Drive of the Steering Electromechanical Amplifier. *Scientific and Technical Journal Russian Electromechanics*. 2005;2:56-59 (In Russ., Engl.)].
16. Патент РФ на изобретение № 2158692/ 16.09.1999. Бюл. № 9. Коломейцев Л.Ф., Сулейманов У.М., Пахомин С.А., Арабов Н.Я., Бакулин Н.Ф., Адамов Ц.А. Электроусилитель руля автомобиля. [Pat. RUS № 2158692/ 16.09.99. Byul. № 9. Kolomeytsev LF, Suleymanov UM, Pakhomin SA, Arabov NYa, Bakulin NF, Adamov TsA. Elektrousilitel' rulya avtomobilya. (In Russ.)] Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/215/2158692.html>. Дата

- обращения: 15.03.2020.
17. Sahoo N, Xu J, Panda S. Determination of current waveforms for torque ripple minimisation in switched reluctance motors using iterative learning: an investigation. *IEE Proceedings Electric Power Applications*. 1999;146(4):369. doi: 10.1049/ip-epa:19990384
 18. Карнаухов Н.Ф., Филимонов М.Н., Статовой Д.А., Лыков А.С. Обзор подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования. // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – № 2. – С. 51–58. [Karnauhov NF, Filimonov MN, Statovoj DA, Lykov AS. A review of torque ripple reducing methods based on mathematical simulation. *Vestnik of Don State Technical University*. 2016;(2):51-58. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.12737/19688
 19. Гребенников Н.В. Динамика и энергоэффективность перспективных единиц подвижного состава, оснащаемых вентильно-индукторными электрическими машинами: дис.... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2012. – 148 с. [Gebennikov NV. *Dinamika i energoeffektivnost' perspektivnykh yedinit podvizhnogo sostava, osnashchayemykh ventil'no-induktornymi elektricheskimi mashinami* [dissertation]. Rostov-on-Don; 2012. 148 p. (In Russ.)].
 20. Рымша В.В., Радимов И.Н., Чан Тхи Тху Хьонг. Влияние конфигурации зубцовой зоны статора на электромагнитный момент и радиальные электромагнитные силы вентильно-реактивного электродвигателя // Электротехника і електромеханіка. – 2006. – № 2. – С. 56–58. [Rymsha VV, Radimov IN, Chan TTH. Influence of stator tooth zone configuration on electromagnetic torque and radial electromagnetic forces in a switched reluctance motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2006;2:56-58. (In Russ., Engl.)].
 21. Finite Element Method Magnetics: HomePage [Internet]. [cited 2020 March 15]. Available from: <http://www.femm.info/wiki/HomePage/>.

Сведения об авторах:

Кашуба Александр Викторович, аспирант;

344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;

eLibrary SPIN:4086-1671; ORCID: 0000-0002-6529-1895;

E-mail: kashuba-av@mail.ru

Information about the authors:

Alexander Kashuba; postgraduate;

344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2;

eLibrary SPIN: 4086-1671; ORCID: 0000-0002-6529-1895;

E-mail: kashuba-av@mail.ru

Цитировать:

Кашуба А.В. Оптимизационный метод формирования геометрических размеров зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 30–47. doi: 10.17816/transsyst20206130-47

To cite this article:

Kashuba AV. Optimization Method for calculating the Geometrical Dimensions of the tooth Zone of the Switched Reluctance Motor. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):30-47. doi: 10.17816/transsyst20206130-47

УДК [UDC]629.439
DOI10.17816/transsyst20206148-62

© К. К. Ким, И. Р. Крон, В. В. Вешкин

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

К ВЫБОРУ СХЕМЫ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ ТЯГОВОГО ЛИНЕЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ СИСТЕМЫ MAGLEV

Цель: Анализ электромагнитных процессов в тяговом линейном синхронном двигателе высокоскоростного наземного транспорта (MAGLEV) и обоснование выбора схемы соединения статорной обмотки.

Методы: Аналитическое исследование теоретических соотношений.

Результаты: В ходе исследования установлено, что двухслойная схема соединения статорной обмотки является более предпочтительной.

Заключение: Для системы с однослойной схемой соединения статорной обмотки характерны нагружение соленоидов возбуждения вредными усилиями, неэффективность их защиты от полей высших гармоник статорной обмотки выбором геометрии ее витка и соленоида, образование при поперечном смещении экипажа дополнительной сталкивающей силы. Все эти нежелательные явления отсутствуют при двухслойной схеме.

Ключевые слова: линейный синхронный двигатель, обмотка возбуждения, статорная обмотка, магнитное поле, взаимная индуктивность, однослойная и двухслойная схемы.

© К. К. Kim, I. R. Kron, V. V. Veshkin

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

TO THE CHOICE OF THE MAGLEV SYSTEM TRACTION LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR STATOR WINDING SCHEME

Aim: Analysis of electromagnetic processes in the linear synchronous traction motor of high-speed ground transport (MAGLEV) and the choice of stator winding connection scheme justification.

Methods: An analytical study of theoretical relations.

Results: The study found that a two-layer stator winding connection scheme is more preferable

Conclusion: A system with a single-layer stator winding connection circuit is characterized by loading excitation solenoids with harmful forces, the inefficiency of their protection from the higher harmonics of the stator winding by choosing the geometry of its coil and solenoid, and the formation of additional colliding force during lateral displacement of the underframe. All these undesirable effects are absent in a two-layer scheme.

Keywords: linear synchronous motor, excitation winding, stator winding, magnetic field, mutual inductance, single-layer and two-layer connection schemes.

ВВЕДЕНИЕ

В транспортных системах MAGLEV, где используется электродинамический подвеса экипажа, наиболее рационально использовать тяговый линейный синхронный двигатель со сверхпроводящей обмоткой возбуждения. В отличие от линейного асинхронного двигателя машины, линейный сверхпроводниковый синхронный двигатель изучен менее полно. Отдельные сведения, касающиеся свойств такого двигателя, можно найти в [1–4].

В электромагнитном отношении линейный сверхпроводниковый синхронный двигатель (отсутствуют ферромагнитные сердечники) можно рассматривать как совокупность индуктивно-связанных цепей. Как и в обычной синхронной машине, статорная цепь, образующая путевую структуру, представляет симметричную трехфазную систему, причем она может быть выполнена по принципу однослойной или двухслойной обмоток переменного тока [5]. При этом имеется в виду только схемное сходство этих структур и соответствующих обмоток (активные стороны путевых структур располагаются в одной плоскости).

В реализации синхронного принципа в условиях MAGLEV имеются свои особенности. Наиболее существенные из них – это отсутствие магнитопровода и применение в качестве системы возбуждения сверхпроводящих соленоидов, которые по соображениям надежности не должны быть электрически связаны друг с другом. Кроме того, положение экипажа, а, следовательно, указанных соленоидов относительно статорной обмотки, расположенной на путевом полотне, жестко не фиксировано, что вносит дополнительные степени свободы. Существуют и другие особенности, обусловленные использованием электромагнитных экранов, однако они носят менее существенный характер, и поэтому в дальнейшем рассмотрении не учитываются.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЛИНЕЙНОГО СИНХРОННОГО СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрим магнитное поле данного двигателя. Вклад, вносимый в это поле отдельными источниками: соленоидами возбуждения, фазными обмотками статорной обмотки, можно найти независимо (из-за отсутствия ферромагнитных сердечников система может рассматриваться как линейная). Определим поле возбуждения. Поля, создаваемые фазными обмотками, могут быть найдены по индукции.

Предположим, что сверхпроводящие соленоиды возбуждения одинаковы и расположены в ряд в плоскости $z=0$ (Рис. 1). Расстояние между соседними соленоидами одно и тоже, направление токов в них встречное. Все соленоиды имеют одинаковые МДС. На Рис. 1 соленоиды

показаны в виде прямоугольных рамок с током I_f , равным МДС реального соленоида.

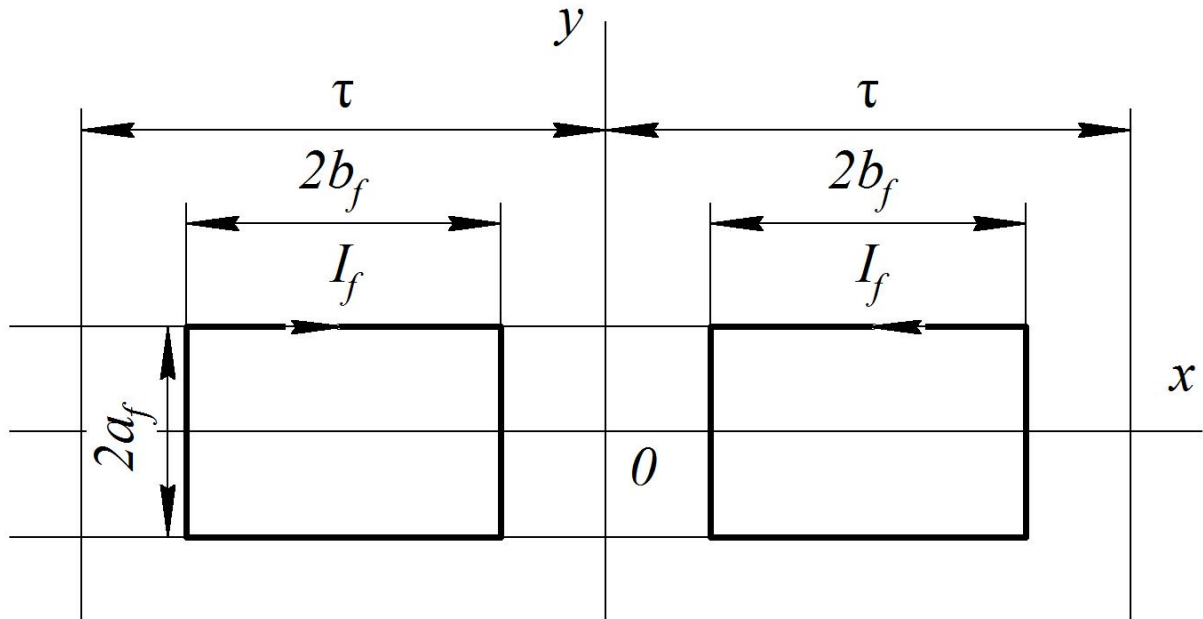


Рис. 1. Схема системы возбуждения.

τ – полюсное деление, $2a_f$ – ширина соленоида, $2b_f$ – его длина, I_f – МДС соленоида

Количество соленоидов возбуждения определяется из условий получения необходимой силы тяги и требуемых КПД и коэффициента мощности [6–9]. Для упрощения рассмотрения концевыми эффектами пренебрегаем, и распределение поля вдоль x считаем периодическим [10].

Заменим систему токовых рамок плоским токовым слоем с плотностью

$$\mathbf{j} = \mathbf{e}_x j_x + \mathbf{e}_y j_y, \quad (1)$$

здесь \mathbf{e}_x и \mathbf{e}_y – орты. Выражения для величин j_x и j_y с использованием теории рядов Фурье можно представить следующим образом

$$j_x = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \int_0^{\infty} j_x^{(0)} \sin \frac{\pi n}{\tau} x \sin ky dk, \quad (2)$$

$$j_y = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \int_0^{\infty} j_y^{(0)} \cos \frac{\pi n}{\tau} x \cos ky dk, \quad (3)$$

$$j_x^{(0)} = -\frac{8I_f}{\pi^2 n} \alpha_f \beta_f \sin \frac{\pi n}{2}, \quad j_y^{(0)} = \frac{\pi n}{\tau k} j_x^{(0)}, \quad (4)$$

$\alpha_f = \sin k a_f, \quad \beta_f = \sin \frac{\pi}{\tau} b_f, \quad k$ – волновой вектор вдоль оси x .

Векторный потенциал \mathbf{A} поля возбуждения вне токового слоя удовлетворяет уравнению Лапласа и имеет вдоль осей x и y представление, подобное плотности тока

$$\mathbf{A} = \mathbf{e}_x A_x + \mathbf{e}_y A_y, \quad (5)$$

$$A_x = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \int_0^{\infty} a_x \sin \frac{\pi n}{\tau} x \sin ky dk, \quad (6)$$

$$A_y = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \int_0^{\infty} a_y \cos \frac{\pi n}{\tau} x \cos ky dk, \quad (7)$$

где

$$a_x = -\frac{4\mu_0 I_f}{\pi^2 k_n n} \alpha_f \beta_f \sin \frac{\pi n}{2} e^{\pm k_n z}, \quad a_y = \frac{\pi n}{\tau k} a_x, \quad (8)$$

$$k_n = \sqrt{(\pi n / \tau)^2 + k^2}.$$

Рассмотрим теперь магнитное поле статорной обмотки, точнее одной фазной обмотки. На Рис. 2 приведена схема фазы «а», при выполнении обмотки по схеме двухслойной, расположенной в плоскости $z' = 0$. На рисунке токовая рамка представляет образ катушечной группы, расположенной на полюсном делении τ . Если число катушек в группе q и соседние катушки сдвинуты на одно и тоже расстояние $(\tau/3q)$, то МДС i'_a токовой рамки равна

$$i'_a = \frac{w\gamma}{2p} i_a, \quad (9)$$

где w – число последовательно соединенных витков в фазе, $2p$ – число полюсов (катушечных групп в фазе), i_a – фазный ток, γ – коэффициент распределения.

$$\gamma = \frac{1}{q} \left| \sum_{m=1,2,\dots}^q e^{\frac{jmn\pi}{3q}} \right|. \quad (10)$$

Пренебрегая вкладом в магнитное поле междукатушечных соединений, роль которого мала, магнитные поля отдельных фаз будут иметь ту же структуру, что и поле возбуждения [11–12]. Поэтому для этих полей соотношения (5)–(8) сохраняют силу. Уточнения, которые следует внести в эти соотношения, чтобы привести их в соответствие с полями фазных обмоток, очевидны. В (6)–(8) необходимо положить: для фазы «а» $x = x'$, $y = y'$, $I_f = i_a'$; для фазы «b» $x = x' - 2\tau/3$, $y = y'$, $I_f = i_b$ и т.д.'

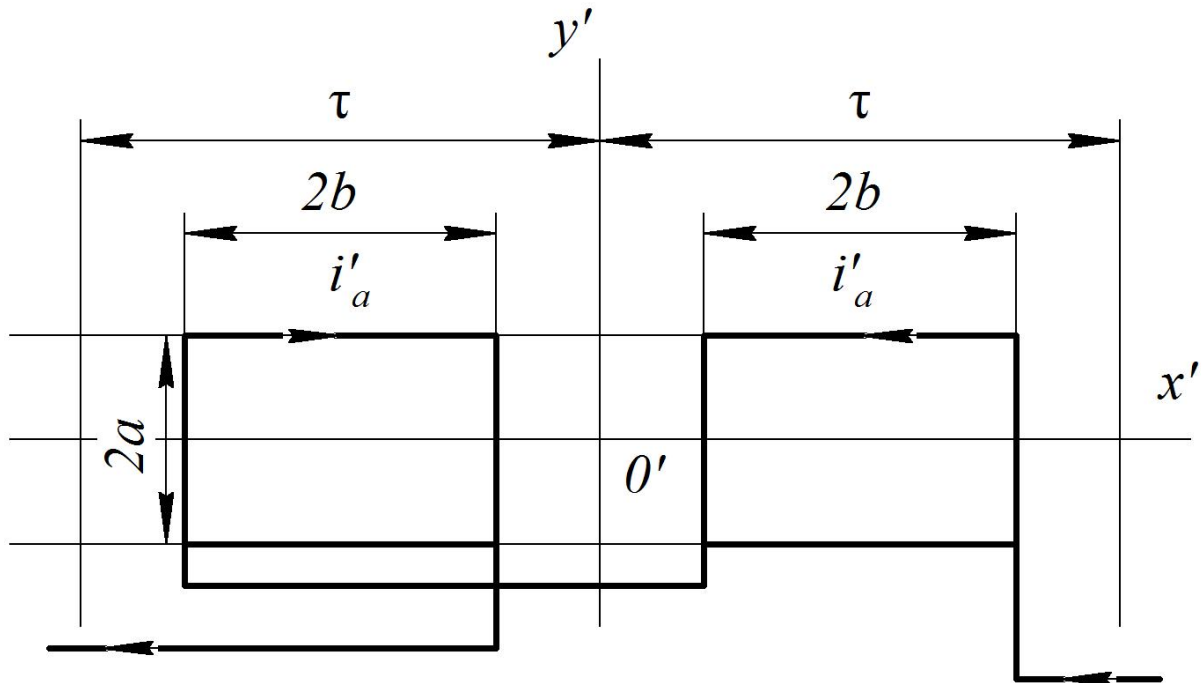


Рис. 2. Схема двухслойной статорной обмотки (фазы a)

τ – полюсное деление;
 $2a$ – ширина витка;
 $2b$ – его длина;
 i'_a – МДС на полюс и фазу

Если статорная обмотка выполнена по принципу однослойной обмотки, то симметрия, характерная для поля двухслойной обмотки отсутствует. Магнитное поле в данном случае можно вычислить тем же способом, что и поле возбуждения. Так для фазы « a » (соответствующая схема представлена на Рис. 3) будем иметь

$$A_x = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \int_0^{\infty} a_{x'} \cos \frac{\pi n}{\tau} \left(x' - \frac{\tau}{2}\right) \sin ky' dk + \int_0^{\infty} a_{x'}^{(0)} \sin ky' dk, \quad (11)$$

$$A_y = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \int_0^{\infty} a_{y'} \sin \frac{\pi n}{\tau} \left(x' - \frac{\tau}{2}\right) \cos ky' dk, \quad (12)$$

$$a_{x'}^{(0)} = -\frac{\mu_0 b i'_a}{\pi n k} \alpha e^{\pm k z'}, \quad a_{x'} = -\frac{2\mu_0 i'_a}{\pi^2 k_n n} \alpha \beta e^{\pm k_n z'}, \quad (13)$$

$$a_{y'} = \frac{\pi n}{\tau k_n} a_{x'}, \quad \alpha = \sin ka, \quad \beta = \sin \frac{\pi n}{\tau} b, \quad i'_a = \frac{wY}{p} i_a. \quad (14)$$

Соотношения для полей других фаз представляются очевидными [13–14].

Известно, что двухслойная обмотка представляет наложение двух однослойных обмоток, сдвинутых на полюсное деление, но с токами противоположного направления. Поэтому суммируя (11) и (12) с соответствующими соотношениями, записанными для второй обмотки, можно сразу получить поле двухслойной обмотки.

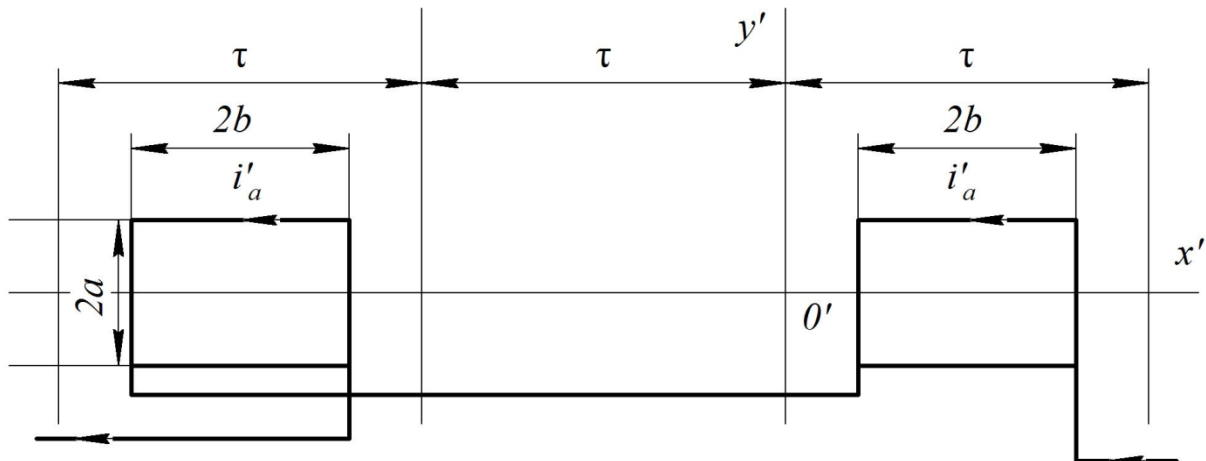


Рис. 3. Схема однослойной статорной обмотки (фазы a)
Обозначения те же, что и на Рис.2

ПАРАМЕТРЫ ЛИНЕЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Электромагнитные процессы в линейном синхронном двигателе определяются следующими параметрами: L, M_{if}, L_c, M_{ci} . Здесь L – индуктивность фазы статорной обмотки, обусловленная полем всех трех фаз, M_{if} – взаимная индуктивность i -ой фазы, обусловленная полем возбуждения, L_c – индуктивность соленоида возбуждения, M_{ci} – взаимная индуктивность соленоида, обусловленная полем i -ой фазы.

Статорная обмотка представляет собой симметричную трехфазную систему, соединенную в звезду. Для такой системы $L = L_0 - M_0$, где L_0 – собственная индуктивность фазы, M_0 – взаимная индуктивность между фазами. Для двухслойной статорной обмотки получим

$$L = \frac{8\mu_0 w^2}{\pi \tau p} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{\tau}{\pi n} \right)^2 + \frac{1}{k^2} \right] \frac{(\alpha\beta\gamma)^2}{k_n} \left(1 + \cos \frac{\pi n}{3} \right) dk. \quad (15)$$

Здесь члены, содержащие $\cos(\pi n/3)$ дают значение M_0 , другие – величину L_0 . В случае однослойной статорной обмотки индуктивность L определяется по той же формуле (15), однако суммирование должно производиться как по нечетным, так и по четным n , что следует из (11) и (12).

Вычислим параметр M_{if} .

Допустим, что координатные системы возбуждения (x, y, z) и статорной обмотки (x', y', z') связаны соотношениями

$$x' = x + \varepsilon_0 + vt, \quad y' = y + \varepsilon_y, \quad z' = z + h, \quad (16)$$

где $\varepsilon_0 = \text{const}$, v – скорость движения экипажа, ε_y – поперечное смещение экипажа, h – его клиренс. В соответствии с (6)–(8) и (16) получим

$$M_{if} = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \int_0^{\infty} M e^{-k_n h} \cos k \varepsilon_y \cos n \varphi_i(t) dk, \quad i = a, b, c, \quad (17)$$

где

$$M = \frac{16\mu_0 w p_f}{\pi \tau} \left[\left(\frac{\tau}{\pi n} \right)^2 + \frac{1}{k^2} \right] \frac{\gamma}{k_n} \alpha \beta \alpha_f \beta_f, \quad (18)$$

$$\varphi_a(t) = \omega t + \psi_f, \quad \varphi_b(t) = \omega t + \psi_f - \frac{2\pi}{3},$$

$$\varphi_c(t) = \omega t + \psi_f + \frac{2\pi}{3}, \quad \omega = \frac{\pi}{\tau} v, \quad \psi_f = \frac{\pi}{\tau} \varepsilon_0, \quad (19)$$

$2p_f$ – количество соленоидов. Соотношения (17)–(19) справедливы для обеих схем путевой структуры [15].

Рассмотрим соленоиды возбуждения как упорядоченную последовательность. В этой последовательности будем различать нечетные и четные соленоиды в соответствии с их нумерацией. Вычислим индуктивность соленоида, обусловленную полем возбуждения (6)–(8). Получим

$$L_c^{(-)} = -L_c^{(+)} = L_c = \frac{16\mu_0}{\pi \tau} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{\tau}{\pi n} \right)^2 + \frac{1}{k^2} \right] \frac{(\alpha_f \beta_f)^2}{k_n} dk. \quad (20)$$

Здесь через $L_c^{(-)}$ и $L_c^{(+)}$ обозначены соответственно индуктивности нечетного и четного соленоидов.

Найдем взаимную индуктивность соленоида, обусловленную полем фазы путевой структуры, В случае двухслойной статорной обмотки будем иметь

$$M_{ci}^{(-)} = -M_{ci}^{(+)} = M_{ci} = \frac{M_{if}}{2p_f}, \quad (21)$$

где взаимные индуктивности $M_{ci}^{(-)}$ и $M_{ci}^{(+)}$ относятся к нечетному и четному

соленоидам. Если статорная обмотка однослойная, то

$$M_{ci} = \frac{4\mu_0 w}{\pi \tau p} \left[bb_f \int_0^{\infty} \frac{\alpha \alpha_f}{k} e^{-kh} \cos k \varepsilon_y dk + \right. \\ \left. + 2 \sum_{n=1,2,\dots} \int_0^{\infty} (\pm 1)^n \left[\left(\frac{\tau}{\pi n} \right)^2 + \frac{1}{k^2} \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{\gamma}{k_n} \alpha \beta \alpha_f \beta_f e^{-k_n h} \cos k \varepsilon_y \cos n \varphi_i(t) dk \right], \quad (22)$$

где верхний и нижний знаки при множителе $(\pm 1)^n$ определяют соответственно знаки при параметрах $M_{ci}^{(-)}$ и $M_{ci}^{(+)}$.

До сих пор соленоиды возбуждения предполагались электрически не связанными. Уберем это ограничение. Считаем, что предполагаемая электрическая связь между соленоидами не нарушает их исходной полярности и сохраняет равенство токов в них. Имея в виду наличие такой связи, можно говорить о цепи возбуждения, вместо системы возбуждения, под которой понималась совокупность тех же соленоидов в отсутствие электрической связи.

Если пренебречь магнитным полем проводов, соединяющих соленоиды, то поле возбуждения будет определяться соотношениями (6)–(8). Следовательно, параметры M_{if} останутся без изменения. Однако, наличие электрической связи позволяет ввести параметры M_{fi} взаимные M_{if} и параметр L_f , определяющий индуктивность цепи возбуждения. Поскольку соседние соленоиды имеют противоположные полярности, то

$$M_{fi} = \left(M_{ci}^{(-)} - M_{ci}^{(+)} \right) p_f.$$

Отсюда, учитывая (21) и (22), получим одинаковое для обеих схем путевой структуры представление параметра M_{fi} , совпадающее с (17)–(19). Аналогично

$$L_f = \left(L_c^{(-)} - L_c^{(+)} \right) p_f.$$

Однако, здесь необходимо иметь в виду следующую особенность, связанную с параметрами M_{fi} .

В случае двухслойной статорной обмотке индуктивности соседних соленоидов, обусловленные фазным полем, отличаются только знаком (21). Соленоиды не чувствуют наличия электрической связи, т.к. последняя не нарушает их полярность, поскольку обе цепи в этом случае имеют одну и ту же пространственную структуру. Таким образом, при двухслойной

статорной обмотке система из электрически несвязанных соленоидов и соответствующая ей цепь адекватны как с точки зрения интегрального электромагнитного взаимодействия (оно определяется параметрами $M_{if}=M_{fi}$), так и магнитного состояния отдельных соленоидов, которое определяется параметрами $L_c = L_f/2pf$ и $M_{ci} = M_{fi}/2pf$.

Если путевая структура однослойная, то как следует из (22), $M_{ci}^{(-)} \neq M_{ci}^{(+)}$. Из-за наличия постоянной вдоль x' компоненты и четных гармоник, реакция поля статорной обмотки по-разному проявляется на нечетных и четных соленоидах и условия постоянства потокосцеплений для этих соленоидов не будут одинаковы. Поэтому в данном случае, кроме параметров $M_{if}=M_{fi}$, определяющих интегральное электромагнитное взаимодействие, необходимо еще привлечь параметры $L_c^{(-)}$, $L_c^{(+)}$, $M_{ci}^{(-)}$ и $M_{ci}^{(+)}$, от которых зависят магнитные состояния нечетных и четных соленоидов.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ И МОЩНОСТИ

Введем в рассмотрение, вместо фазных величин, соответствующие им изображающие векторы напряжения (\mathbf{u}), тока (\mathbf{i}) и потокосцепления (Ψ_{sf}) в смысле Горева [16]. Проекция этих векторов на магнитные оси фаз статорной обмотки дают соответствующие фазные величины. Имеем

$$u = \frac{2}{3} \left[u_a - \frac{1}{2} (u_b + u_c) \right] + \frac{j}{\sqrt{3}} (u_b - u_c),$$

где j – мнимая единица. Аналогичное представление относится и к векторам тока и потокосцепления. Уравнение статорной цепи имеет вид

$$u = ri + L \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi_{sf}}{dt}, \quad \Psi_{sf} = M_{sf} I_f, \quad (23)$$

$$M_{sf} = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \int_0^{\infty} M e^{-[k_n h \mp j n (\omega t + \psi_f)]} \cos k \varepsilon_y dk, \quad (24)$$

где верхний знак при показателе экспоненты относится к первой гармонике, к гармоникам с порядком $(n-1)/3$ и $(n+1)/3$, составляющим целое число, (гармоники с $n/3$ – целое число отсутствуют), M дается (18). Для подводимой (p) и электромагнитной ($p_{эм}$) мощностей и электромагнитной силы (f), действующей на экипаж, получим

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}(ui^*), \quad p_{эм} = \frac{3}{2} \operatorname{Re}(vi I_f \operatorname{grad} M_{sf}^*), \quad (25)$$

$$f = \frac{3}{2} \operatorname{Re}(i I_f \operatorname{grad} M_{sf}^*), \quad (26)$$

* – знак сопряжения*

Рассмотрим стационарный режим.

Как показано ниже, соответствующим выбором длины (b) витка статорной обмотки и длины (b_f) соленоида можно добиться подавления пятой и седьмой гармоник в составе ЭДС возбуждения. Гармоники, кратные трем, отсутствуют в силу соединения «звезда». Поэтому вычисление будем производить для первой гармоники ЭДС возбуждения. В общем случае эта ЭДС равна

$$e = - \left(\frac{\partial \Psi_{sf}}{\partial t} + \frac{\partial \Psi_{sf}}{\partial \varepsilon_y} \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial t} + \frac{\partial \Psi_{sf}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} \right).$$

В стационарных условиях $\frac{\partial \varepsilon_y}{\partial t}$ и $\frac{\partial h}{\partial t}$ равны нулю, кроме того $\mathbf{v} = \mathbf{e}_x v$, $v = \omega \tau / \pi = \text{const}$,

$$e = -E_m e^{j(\omega t + \psi_E)},$$

$$E_m = \omega I_f \int_0^{\infty} M_1 e^{-k_1 h} \cos k \varepsilon_y dk, \quad \psi_E = \psi_f + \frac{\pi}{2}, \quad (27)$$

где M_1 и k_1 даются (18) при $n=1$.

Допустим, что фазные напряжения и токи симметричны, так что им соответствуют векторы

$$\mathbf{u} = U_m e^{j(\omega t + \psi_U)}, \quad \mathbf{i} = I_m e^{j(\omega t + \psi_I)}.$$

Имея в виду это и (27), из (23)–(26) получим

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{r^2 + x^2} [xUE \sin \theta + r(U^2 - UE \cos \theta)], \\ Q &= \frac{3}{r^2 + x^2} [x(U^2 - UE \cos \theta)UE \sin \theta - rUE \sin \theta], \\ P_{\text{ЭМ}} &= \frac{3}{r^2 + x^2} [UE(x \sin \theta + r \cos \theta) - rE^2], \\ f_x &= \frac{3}{v(r^2 + x^2)} [U(x \sin \theta + r \cos \theta) - rE]E, \\ f_y &= \frac{3}{\omega(r^2 + x^2)} [U(x \cos \theta - r \sin \theta) - xE] \frac{\partial E}{\partial \varepsilon_y}, \\ f_z &= \frac{3}{\omega(r^2 + x^2)} [U(x \cos \theta - r \sin \theta) - xE] \frac{\partial E}{\partial h}. \end{aligned}$$

Здесь P и Q – активная и реактивная мощности на входе путевой структуры, $P_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитная мощность, f_x , f_y , f_z – компоненты электромагнитных сил, $\theta = \psi_U - \psi_E$, $x = \omega L$.

ОЦЕНКИ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ

Электромагнитные параметры системы, как показано ранее, зависят от ряда геометрических параметров. Таковыми являются полюсное деление (τ), размеры (a , b) витка статорной обмотки и размеры (a_f , b_f) соленоида возбуждения. Приведем соображения, которые могут быть полезными при оценке некоторых из указанных величин.

Из (18) и (24) следует принципиальная возможность защиты соленоидов возбуждения от действия любых двух гармоник поля статорной обмотки. В отношении одной из них это может быть достигнуто непосредственным ее подавлением, в отношении другой необходимо устранения условия, при котором возможно появление соответствующей гармоники ЭДС в соленоидах. Так для пятой и седьмой гармоник указанное реализуется, если $2b = 4\tau/5$, $2b_f = 6\tau/7$ или $2b = 6\tau/7$, $2b_f = 4\tau/5$. При этих условиях коэффициенты β и β_f , соответствующие отобраным гармоникам, равны нулю и не компенсированными остаются гармоники достаточно высокого порядка, начиная с одиннадцатой. Поля этих гармоник в плоскости соленоидов возбуждения пропорциональны e^{-knh} , где k_n увеличивается с ростом порядка гармоники (начиная с пятой) и следовательно будут малы. В случае однослойной путевой структуры указанное решение не дает желаемого эффекта, поскольку остаются четные гармоники (22), среди которых особенно существенны вторая и четвертая. Отметим также и другие отрицательные свойства этой структуры. Из-за наличия постоянной вдоль x' компоненты поля (11), соленоиды нагружаются вредными (не создающими тяги) усилиями. Кроме того, при $\varepsilon_y \neq 0$, из-за указанной компоненты поля, создается дополнительная сталкивающая сила.

Рассмотрим вопрос, связанный с оценкой величины a_f/a .

Одним из основных параметров, от которых зависят энергетические и силовые характеристики системы является параметр M_{sf} . Этот параметр (18), (24) зависит от размеров соленоида возбуждения и витка статорной обмотки. Представляется разумным выбор a_f/a согласовать с величиной параметра M_{sf} .

Пусть на плоскости $z' = 0$ расположен контур с током (имитация витка статорной обмотки). Рассмотрим поле (z' – компоненту индукции) этого контура на плоскости $z' = h$. Выделим на этой плоскости область S , на границе которой z' -компонента индукции равна нулю. Очевидно, область S будет больше области, ограниченной токовым контуром. Поэтому кажется, что ширина $2a_f$ второго контура (имитация соленоида возбуждения), который мы намерены расположить на плоскости $z' = h$, должна быть больше ширины $2a$ первого контура, если мы желаем получить максимальную взаимную индуктивность между ними.

На Рис.4 даны кривые $m = f(a_f/a)$

$$m = \int_0^{\infty} m_1 e^{-k_1 h} dk, m_1 = \frac{\pi \tau p}{16 \mu_0 w p_f} M_1,$$

где M_1 и k_1 даются (18) и (п.5) при $n=1$ $\gamma=1$. Величина m как это следует из (17) и (18), пропорциональна основной гармонике взаимной индуктивности между системой возбуждения и путевой структурой. На рис. 4 видно, что при $a_f > a$ кривые $m = f(a_f/a)$ «насыщаются» достаточно быстро. Ожидаемое увеличение m , оказывается несущественным, и оценка $a_f/a = 1-1,2$ представляется разумной.

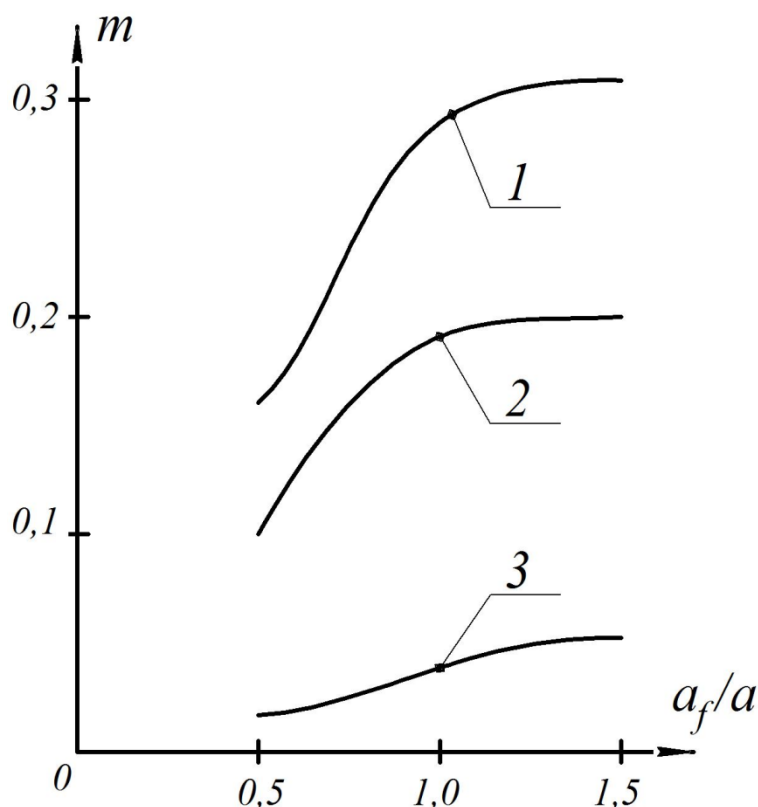


Рис. 4. Зависимость взаимной индуктивности между системой возбуждения и статорной обмоткой от относительной ширины соленоида

Нормирующий множитель $\pi \tau p / 16 \mu_0 w p_f$, $\tau = 0,5$ м, $h = 0,2$ м, $2b = 6\tau/7$, $2b_f = 4\tau/5$
Кривые 1, 2, 3 построены соответственно для $a = 0,25$ м, 1,0 м и 1,5 м

ВЫВОДЫ

Электромагнитные процессы в тяговой системе синхронного типа зависят от схемы статорной обмотки. С точки зрения интегрального электромагнитного взаимодействия системы и надежной работы соленоидов возбуждения желательно, чтобы статорная обмотка и система возбуждения имели сходственное схемное решение, при этом создаваемые ими поля обладают симметрией одного типа. Указанному условию

удовлетворяет двухслойная схема статорной обмотки. Однослойная схема статорной обмотки обладает рядом отрицательных свойств. Для системы с такой структурой характерны нагружение соленоидов возбуждения вредными усилиями, неэффективность их защиты от полей высших гармоник статорной обмотки выбором геометрии ее витка и соленоида, образование при поперечном смещении экипажа дополнительной сталкивающей силы. Все эти нежелательные явления отсутствуют при двухслойной схеме.

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. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости (монография). – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 360 с. [Kim KK. *Sistemy elektrodvizheniya s ispol'zovaniem magnitnogo podvesa i sverhprovodimosti* (monograph). Moscow: Training education center on railway transport Publ.; 2007. 360 p. (In Russ.)].
2. 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.)].
3. Бочаров В.И., Салли И.В., Дзензерский В.А. Транспорт на сверхпроводящих магнитах. – Ростов: Изд-во Ростовского университета, 1988. – 152 с. [Bocharov VI, Salli IV, Dzenzerskij VA. *Transport na sverhprovodjashhih magnetah*. Rostov: Rostov University Publ.; 1988. 152 p. (In Russ.)].
4. Бахвалов Ю.А., Бочаров В.И., Винокуров В.А., Нагорский В.Д. Транспорт с магнитным подвесом. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с. [Bahvalov YuA, Bocharov VI, Vinokurov VA, Nagorskij VD. *Transport s magnitnym podvesom*. Moscow: Mechanical engineering; 1991. 320 p. (In Russ.)].
5. Сика З.К., Куркалов И.И., Петров Б.А. Электродинамическая левитация и линейные синхронные двигатели транспортных систем. – Рига: Зинатне, 1988. – 258 с. [Sika ZK, Kurkalov II, Petrov BA. *Jelektrodinamicheskaja levitacija i linejnye sinhronnye dvigateli transportnyh sistem*. Riga: Zinatne; 1988. 258 p. (In Russ.)].
6. Никитин В.В., Стрепетов В.М. Энергообеспечение бортовых электромагнитов комбинированной системы левитации и тяги на переменном токе // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 25–38. [Nikitin VV, Strepetov VM. Vehicle electromagnets energy supply of A.C. combined levitation and traction system. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(3):25-38. (Russ., Engl.)] doi: 10.17816/transsyst20173325-38
7. Никитин В.В., Стрепетов В.М., Волювач А.С. Анализ вариантов построения

- системы электроснабжения транспортного средства с комбинированной системой левитации и тяги на переменном токе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3–4 – С. 54–62. [Nikitin VV, Strepetov VM, Voljuvach AS. Analiz variantov postroeniya sistemy jelektrosnabzheniya transportnogo sredstva s kombinirovannoj sistemoj levitacii i tjagi na peremennom toke. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2010;3-4:54-62. (In Russ.)].
8. Стрепетов В.М., Никитин В.В. Оценка энергетической эффективности пусковых режимов работы комбинированной системы левитации и тяги на однофазном переменном токе // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. – № 2. – С. 141–146. [Strepetov VM, Nikitin VV. Ocenka jenergeticheskoj jeffektivnosti puskovyh rezhimov raboty kombinirovannoj sistemy levitacii i tjagi na odnofaznom peremennom toke. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2006;2:141-146. (In Russ.)]. Доступно по: http://izvestiapgups.org/assets/pdf/02_2006.pdf. Ссылка активна на 25.02.2020.
 9. Иванов С.Н. Системы управления электротехническими устройствами для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 3. – С. 249–257. [Ivanov SN. Sistemy upravlenija jelektrotehnicheskimi ustrojstvami dlja generacii teplovoj jenerгии i transportirovaniya teplonositelja. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2010;3:249-257. (In Russ.)]. Доступно по: http://izvestiapgups.org/assets/pdf/03_2010.pdf. Ссылка активна на 25.02.2020.
 10. Кузнецов А.А., Мешкова О.Б. Модернизация спектрального оборудования для диагностирования и ремонта подвижного состава // Транспорт Урала. – 2009. – № 2. – С. 86–90. [Kuznecov AA, Meshkova OB. Spectral equipment retrofit for rolling stock diagnosis and repair. *Transport of the Urals*. 2009;(2):86-90. (In Russ., Engl.)]
 11. Кочетков В.М. О левитационном качестве систем электродинамического подвешивания со сплошной путевой структурой // Изв.ВУЗ. Электромеханика. – 1983. – №2. – С. 5–10. [Kochetkov VM. O levitacionnom kachestve sistem jelektrodinamического podveshivaniya so sploshnoj putevoj strukturoj. *Russian Electromechanics*. 1983;2:5–10. (In Russ.)].
 12. Кузнецов А.А., Зверев А.Г., Бураченко К.А., и др. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях с электромеханическими коммутационными элементами / Труды XI Международной научно-практической конференции «Научные приложения с использованием технологий NationalInstruments – 2012» 6–7 декабря 2012 года; – М.: МТУСИ, 2012. – С. 136–139. [Kuznecov AA, Zverev AG, Burachenko KA, et. al. Issledovanie perehodnyh processov v linejnyh jelektricheskikh cepjah s jelektromehaničeskimi kommutacionnymi jelementami. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Nauchnye prilozhenija s ispol'zovaniem tehnologij NationalInstruments – 2012”*. 2012 Dec 6-7, Moscow. MTUCI; 2012. p. 136-139. (In Russ.)].
 13. Borcherts RH, Davis LC, Reitz JR, Wilkie DF. Baseline specifications for a magnetically suspended highspeed vehicle. *Proc. IEEE*. 1973;61(5):569-578. doi: 10.1109/PROC.1973.9113
 14. Gutberlet H. The German magnetic transportation program. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1974;10(3):417-420. doi: 10.1109/tmag.1974.1058431
 15. Reitz JR, Davis LC. Force on a Rectangular Coil Moving above a Conducting Slab. *Journal of Applied Physics*. 1972;43(4):1547-1553. doi: 10.1063/1.1661359

16. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. – Л.–М.: Госэнергоиздат, 1950. – 551 с. [Gorev AA Perekhodnye processy sinhronnoj mashiny. Leningrad–Moscow: Gosenergoizdat; 1950. 551 p. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Ким Константин Константинович, д.т.н., профессор;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Крон Игорь Романович, студент;
eLibrary SPIN: 6604-2966; ORCID: 0000-0003-1690-0524;
E-mail: mechenu@yandex.ru

Вешкин Вадим Витальевич, аспирант;
eLibrary SPIN: 1829-2845; ORCID: 0000-0002-7363-9919;
E-mail: Vadim.veshkin@mail.ru

Information about the authors:

Konstantin K. Kim, Doctor of Technical Sciences, professor;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Igor R. Kron, student;
eLibrary SPIN: 6604-2966; ORCID: 0000-0003-1690-0524;
E-mail: mechenu@yandex.ru

Vadim V. Veshkin, graduate student;
eLibrary SPIN: 1829-2845; ORCID: 0000-0002-7363-9919;
E-mail: Vadim.veshkin@mail.ru

Цитировать:

Ким К.К., Крон И.Р., Вешкин В.В. К выбору схемы статорной обмотки тягового линейного синхронного двигателя системы MAGLEV // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 48–62. doi: DOI 10.17816/transsyst20206148-62

To cite this article:

Kim KK, Kron IR, Veshkin VV. To the Choice of the Maglev System Traction Linear Synchronous Motor Stator Winding Scheme. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):48-62. doi: 10.17816/transsyst20206148-62

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

DOI 10.17816/transsyst20206163-79

© A. Heya, K. Hirata, N. Niguchi

Osaka University

(Osaka, Japan)

LINEAR VERNIER ACTUATOR WITH TWO MOVERS

Background: Linear motion devices for industrial machines and robots are expected to realize their high efficiency drive and simple structure. Usually, a feed screw mechanism composed of a rotary motor and a ball-screw or slide-screw is employed. However, it has some problems such as the decrease of the drive efficiency, flexibility against external forces, noise, etc. Various linear actuators and motors have been developed utilizing the feature of a direct drive.

Aim: In this paper, we propose a novel linear actuator which 2 movers can be independently controlled using 3-phase and 6-phase superimposed currents for decreasing the size and weight of the system. The proposed linear actuator is driven by the operating principle of a vernier motor which is expected to achieve a high thrust force density per permanent magnet volume.

Methods: The operating principle and the static thrust force characteristics of the proposed linear actuator are verified by an electromagnetic field analysis using 3-D finite element method, and the back electromotive force characteristics are also analyzed. In addition, the dynamic characteristics under position feedback control are analyzed. The control system uses a vector control using PID controller, and the control input is given by the 3-phase and 6-phase superimposed currents.

Results: The static force characteristics were investigated. From the analyzed results, the force interference between the two movers was small. Moreover, the interference of the back electromotive force of the 3-phase and 6-phase movers were not observed. The movers could be independently driven under position feedback control using 3-phase and 6-phase superimposed currents. The dynamic characteristics analyses showed that the mover well followed a target position. From a step response, the time constant and the response of the position feedback system were investigated.

Conclusion: This paper presents a linear vernier actuator with two movers. The basic structure and operating principle of the actuator were described. Moreover, the static characteristics and the dynamic characteristics under position feedback control were analyzed. It was found that the movers can be independently driven.

Keywords: Linear actuator, Vernier motor, Electromagnetic actuator, 3-D FEM, Superimposed current.

INTRODUCTION

Linear motion devices for industrial machines and robots are expected to realize their high efficiency drive and simple structure. Usually, a feed screw mechanism composed of a rotary motor and a ball-screw or slide-screw is employed. The mechanism utilizes frictional forces. Therefore, it has some problems such as the decrease of the drive efficiency, flexibility against external forces, noise, etc. In order to solve the problems, various linear actuators and motors have been developed utilizing the feature of a direct drive [1- 3]. In particular, a linear electromagnetic actuator (LEA) has many advantages such as a high drive efficiency, reduction of a noise, maintenance-free operation, and high-precision positioning.

The LEAs can drive flexibly against external forces due to a magnetic spring effect. Therefore, the LEAs are expected to apply an artificial muscle for a humanoid robot. Nakata et al. developed upper and lower extremity robots using LEAs [4]. Fujimoto et al. developed a musculoskeletal biped robot driven by LEAs [5]. These systems need a lot of linear actuators and links, and have some problems such as the increase in size and weight.

In order to solve these problems, we propose a novel linear actuator with two movers which can be independently controlled. The proposed actuator is driven by the operating principle of a vernier motor which is expected to achieve a high thrust force density per permanent magnet volume. The movers can be independently driven using 3-phase and 6-phase superimposed currents.

In this paper, the force characteristics and dynamic performance of the proposed linear actuator are investigated. The force characteristics are computed by an electromagnetic field analysis using 3-D finite element method. The dynamic characteristics under position feedback control are also verified.

LINEAR VERNIER ACTUATOR WITH TWO MOVERS

The basic structure of the proposed actuator is shown in Fig. 1 (a). The stator consists of coils, permanent magnets, and yokes. The permanent magnets and teeth are arranged at even intervals. All permanent magnets are magnetized in the y-axis direction. The winding direction are shown in Fig. (b). The movers shown in Fig. (c) consist of only a yoke. Therefore, the amount of permanent magnet does not increase. Moreover, the number of teeth of the movers is different from each other.

The operating principle is shown in Fig. 2. The proposed actuator is driven by the operational principle of a vernier motor [6]. A magnetomotive force is modulated due to a permeance distribution, and a modulated magnetic flux is generated.

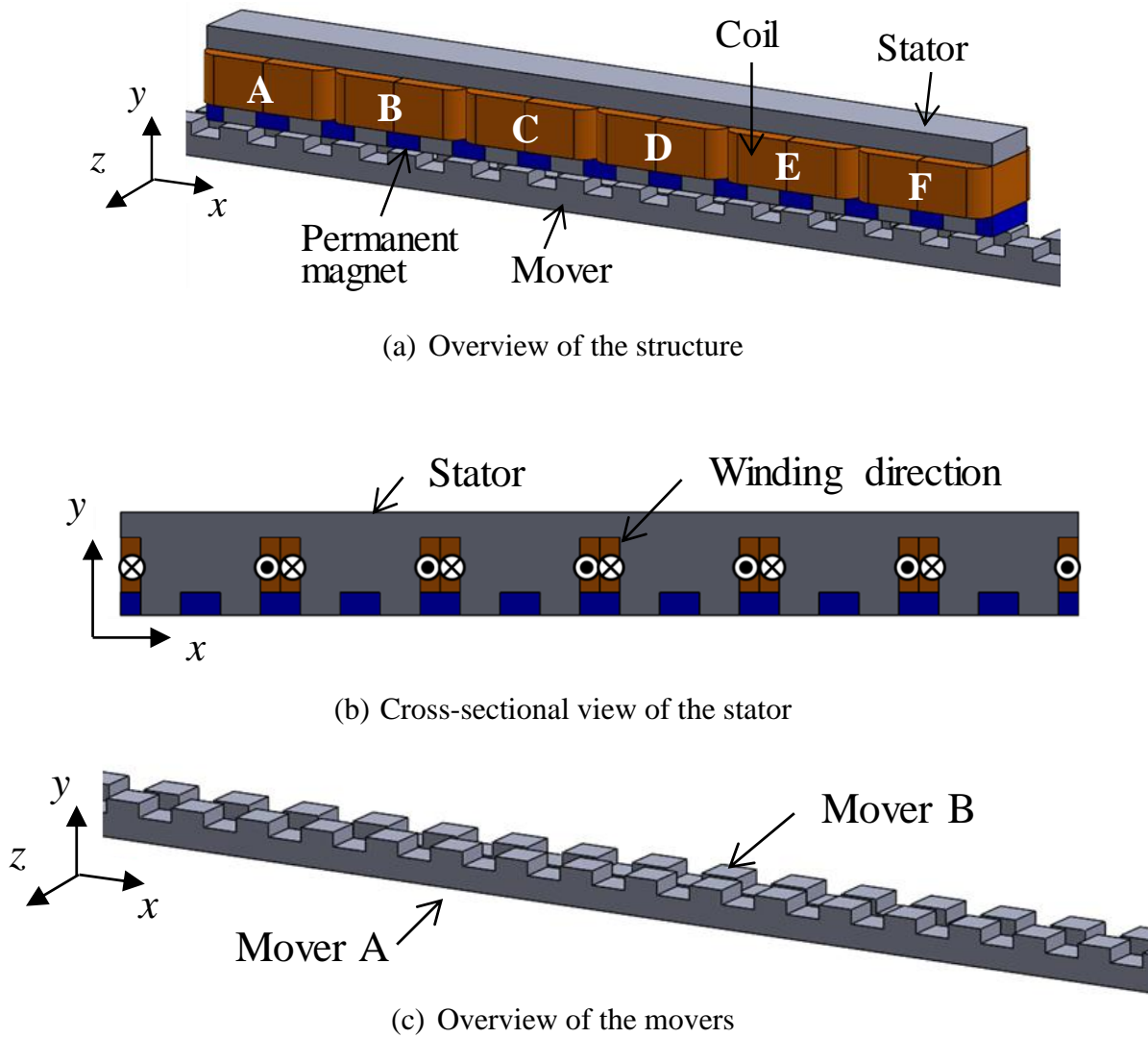


Fig. 1. Basic structure of the proposed linear actuator

The magnetomotive force of the stator is defined as follows:

$$F = \sin \frac{2\pi Z_s}{L} p \quad (1)$$

where Z_s is the number of pole pairs of the stator, L is the stator length, and p is the position of the mover. The fundamental component of the mover permeance distribution is defined as follows:

$$R_p = a + \sin \frac{2\pi Z_m}{L} p \quad (2)$$

where Z_m is the number of pole pairs of the mover, and a is the average permeance of the mover. The modulated magnetic flux in the air gap is defined as follows:

$$\varphi = F \cdot R_p = a \sin \frac{2\pi Z_s}{L} p - \frac{1}{2} \cos(Z_s + Z_m) \frac{2\pi}{L} p + \frac{1}{2} \cos(Z_s - Z_m) \frac{2\pi}{L} p \quad (3)$$

The proposed actuator is driven by synchronizing a moving magnetic field generated by the coils with a modulated magnetic flux. Therefore, the relationship of the number of teeth and order of the moving magnetic field generated by the coils is defined as follows:

$$\begin{cases} Z_s + Z_m = \pm O_c \\ Z_s - Z_m = \pm O_c \end{cases} \quad (4)$$

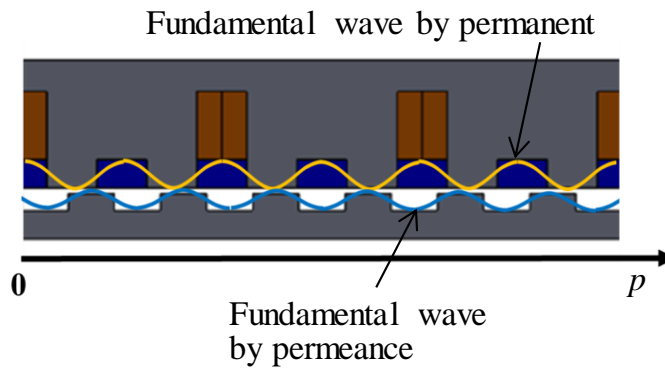


Fig. 2. Operating principle of the proposed linear actuator

where O_c is the order of the moving magnetic field generated by the coils.

The armature current of the proposed actuator has 3-phase and 6-phase alternating currents (ACs), and each mover utilizes either of them to move. The 3-phase AC is defined as follows:

$$\begin{cases} I_U = \sqrt{2} I \sin \left(\frac{2\pi Z_1 p_1}{L} \right) \\ I_V = \sqrt{2} I \sin \left(\frac{2\pi Z_1 p_1}{L} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ I_W = \sqrt{2} I \sin \left(\frac{2\pi Z_1 p_1}{L} - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (5)$$

where Z_1 and p_1 is the number of salient pole pairs and position of the mover driven by the 3-phase AC, respectively, and I is the effective current. Similarly, The 6-phase AC is defined as follows:

$$\begin{cases} I_A = \sqrt{2}I \sin\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L}\right) \\ I_B = \sqrt{2}I \sin\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L} - \frac{\pi}{3}\right) \\ I_C = \sqrt{2}I \sin\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_D = \sqrt{2}I \sin\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L} - \pi\right) \\ I_E = \sqrt{2}I \sin\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L} - \frac{4\pi}{3}\right) \\ I_F = \sqrt{2}I \sin\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L} - \frac{5\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (6)$$

where Z_2 and p_2 is the number of salient pole pairs and position of the mover driven by the 6-phase AC, respectively. The interlinkage flux of the 3-phase coils is defined as follows:

$$\begin{cases} \phi_U = \phi \cos\left(\frac{2\pi Z_1 p_1}{L}\right) \\ \phi_V = \phi \cos\left(\frac{2\pi Z_1 p_1}{L} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \phi_W = \phi \cos\left(\frac{2\pi Z_1 p_1}{L} - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (5)$$

where Φ is the amplitude of the interlinkage flux. Similarly, the interlinkage flux of the 6-phase coils is defined as follows:

$$\begin{cases} \phi_A = \phi \cos\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L}\right) \\ \phi_B = \phi \cos\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L} - \frac{\pi}{3}\right) \\ \phi_C = \phi \cos\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \phi_D = \phi \cos\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L} - \pi\right) \\ \phi_E = \phi \cos\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L} - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \phi_F = \phi \cos\left(\frac{2\pi Z_2 p_2}{L} - \frac{5\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (6)$$

The force of the mover due to the 6-phase magnetic flux and 3-phase AC is defined as follows:

$$F_{36} = I_U \phi_A + I_V \phi_B + I_W \phi_C + I_U \phi_D + I_V \phi_E + I_W \phi_F = 0 \quad (7)$$

The force of the mover due to the 3-phase magnetic flux and 6-phase AC is defined as follows:

$$F_{63} = I_A \Phi_U + I_B \Phi_V + I_C \Phi_W + I_D \Phi_U + I_E \Phi_V + I_F \Phi_W = 0 \quad (8)$$

From (7) and (8), the interference of the force is zero. Thus, the movers can be independently driven [7, 8].

The proposed actuator is controlled using vector control, and 3-phase and 6-phase ACs are transformed into d-q axis. The transformation matrix of the currents from the UVW to d-q coordinate systems is defined as follows:

$$\begin{bmatrix} I_{d3} \\ I_{q3} \end{bmatrix} = D_3 \begin{bmatrix} I_U \\ I_V \\ I_W \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$D_3 = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta - \frac{4}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta - \frac{4}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (10)$$

where θ is the electrical angle of the position defined as follows:

$$\theta = \frac{2\pi Z p}{L} \quad (11)$$

where Z is the number of salient pole pairs of the mover. The transformation matrix of the currents from the ABCDEF to dq coordinate systems is defined as follows:

$$\begin{bmatrix} I_{d6} \\ I_{q6} \end{bmatrix} = D_6 \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_D \\ I_E \\ I_F \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$D_6 = \sqrt{\frac{1}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{1}{3}\pi) & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta - \pi) & \cos(\theta - \frac{4}{3}\pi) & \cos(\theta - \frac{5}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{1}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta - \pi) & -\sin(\theta - \frac{4}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{5}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (13)$$

The inverse d-q transformation of the voltage from dq to UVW coordinate systems is defined as follows:

$$\begin{bmatrix} V_U \\ V_V \\ V_W \end{bmatrix} = D_3^{-1} \begin{bmatrix} V_{d3} \\ V_{q3} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$D_3^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta - \frac{4}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{4}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (15)$$

The inverse d-q transformation of the voltage from dq to ABCDEF coordinate systems is defined as follows:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \\ V_E \\ V_F \end{bmatrix} = D_6^{-1} \begin{bmatrix} V_{d6} \\ V_{q6} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$D_6^{-1} = \sqrt{\frac{1}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta - \frac{1}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{1}{3}\pi) \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta - \pi) & -\sin(\theta - \pi) \\ \cos(\theta - \frac{4}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{4}{3}\pi) \\ \cos(\theta - \frac{5}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{5}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (17)$$

The block diagram of the control system is shown in Fig. 3. In this paper, $I_d = 0$ control is used. The position feedback control is achieved using a PID control. A PI control is used for the current control. The 3-phase AC is extracted from the superimposed current as follows:

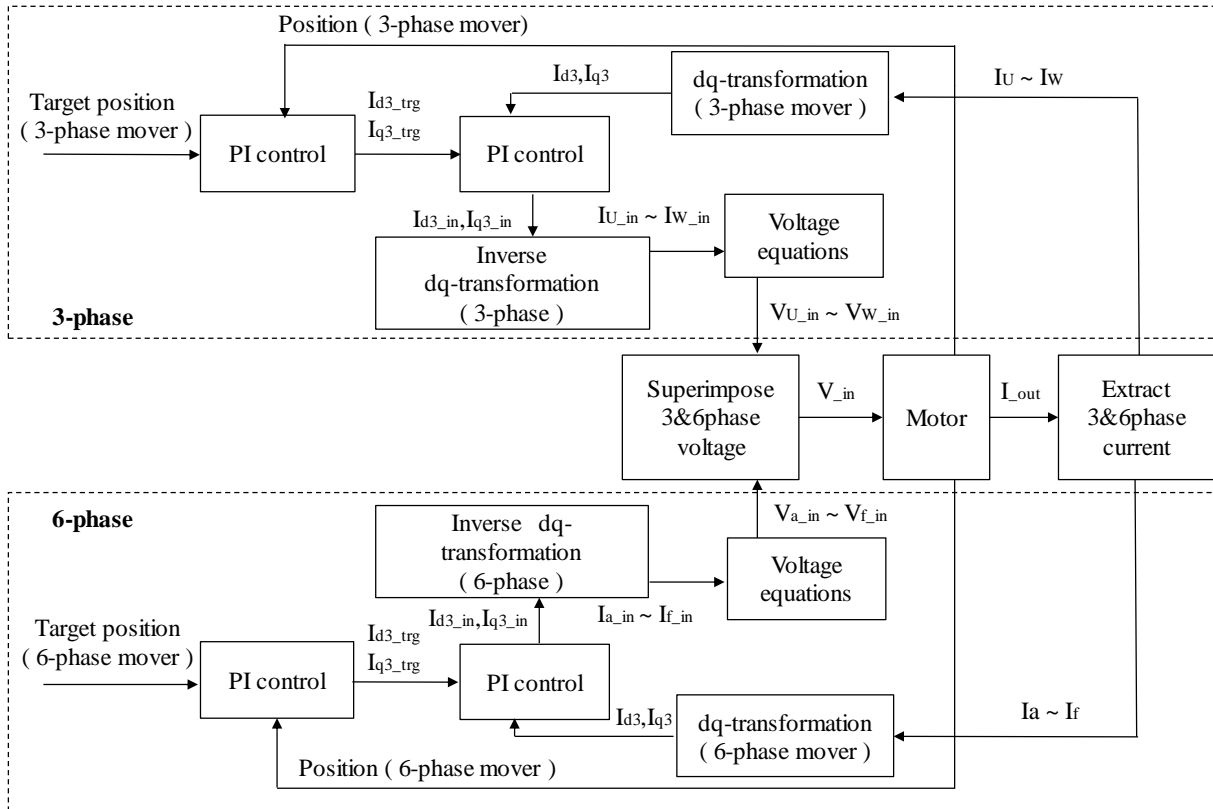


Fig. 3. Block diagram of the control system

$$\begin{cases} I_a = I_A + I_U \\ I_b = I_B + I_V \\ I_c = I_C + I_W \\ I_d = I_D + I_U \\ I_e = I_E + I_V \\ I_f = I_F + I_W \end{cases} \quad (18)$$

From (18), the 3-phase AC is defined as follows:

$$\begin{cases} I_U = \frac{I_a + I_d - (I_A + I_D)}{2} \\ I_V = \frac{I_a + I_d - (I_A + I_D)}{2} \\ I_W = \frac{I_a + I_d - (I_A + I_D)}{2} \end{cases} \quad (19)$$

The relationship of the 6-phase ACs is defined as follows:

$$\begin{cases} I_A + I_D = 0 \\ I_B + I_E = 0 \\ I_C + I_F = 0 \end{cases} \quad (20)$$

From (19) and (20), the component of the 3-phase AC can be extracted. The 6-phase AC is extracted from the superimposed current as follows:

$$\begin{cases} I_A = I_a - I_U \\ I_B = I_b - I_V \\ I_C = I_c - I_W \\ I_D = I_d - I_U \\ I_E = I_e - I_V \\ I_F = I_f - I_W \end{cases} \quad (21)$$

From (19), the component of the 6-phase AC can also be extracted.

RESULTS OF CHARACTERISTICS ANALYSIS

The specification of the analysis model is shown in Table 1. The dimensions of the stator and mover are shown in Tables 2 and 3. The length of one period of the 3-phase and 6-phase movers is 15 mm and 16.15 mm, respectively. The positional relationship of the movers and stator is shown in Fig. 4.

Table 1. Specification of the analysis model

Number of coils	6
Number of pole pairs of the stator	12
Air gap length [mm]	1
Residual magnetic flux density [Br]	1.4
Distance between movers [mm]	1.5
Number of coil turns	388
Coil space factor [%]	63
Maximum amplitude of current [A]	0.6

Table 2. Dimensions of the movers

	3-phase	6-phase
Fundamental order of permeance	14	13
Total height [mm]	8	8
Pole height [mm]	3	3
Pole width [mm]	7.5	8.08

Table 3. Dimensions of the movers

Height [mm]	22.5
Width [mm]	210
Depth [mm]	16
Back yoke height [mm]	5.5
Permanent magnet height [mm]	5
Permanent magnet width [mm]	8.75
Permanent magnet depth [mm]	16

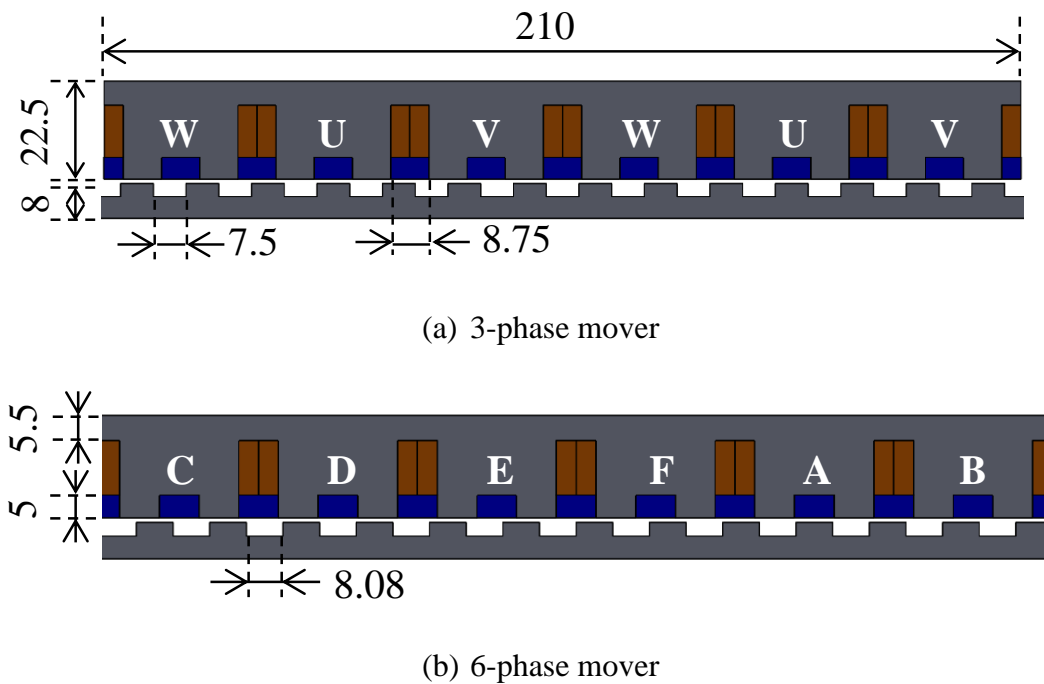


Fig. 4. Positional relationship of the movers and stator

For verifying the static force characteristics, a 3-D finite element method is used [9, 10]. The 3-D mesh model except for the air region is shown in Fig. 5. The analysis conditions are shown in Table 4. In the static force analysis, the amplitude of the 3-phase and 6-phase ACs is 0.6 A. The current density is 5 A/mm².

The analysis patterns are defined as follows:

Pattern 1-1: The 3-phase mover is moved under 3-phase AC, and the 6-phase mover is fixed.

Pattern 1-2: The 6-phase mover is moved under 6-phase AC, and the 3-phase mover is fixed.

Pattern 1-3: Both movers are moved under 3-phase and 6-phase superimposed currents.

The static force analysis results of each pattern are shown in Figs. 6, 7, and 8. The average forces are shown in Table 4. From the results of pattern 1-1, the average force of the 3-phase and 6-phase movers is 6.47 N and 0.24 N, respectively. It is found that the 3-phase mover can be driven by the 3-phase AC. From the results of pattern 1-2, the average force of the 3-phase and 6-phase movers is 0.007 N and 5.70 N, respectively. It shows that the 6-phase mover can be driven by the 6-phase AC. From the results of pattern 1-3, the average force of the 3-phase and 6-phase movers is 5.89 N and 5.13 N, respectively. It is observed that the 3-phase and 6-phase movers can be driven by only the 3-phase and 6-phase AC, respectively.

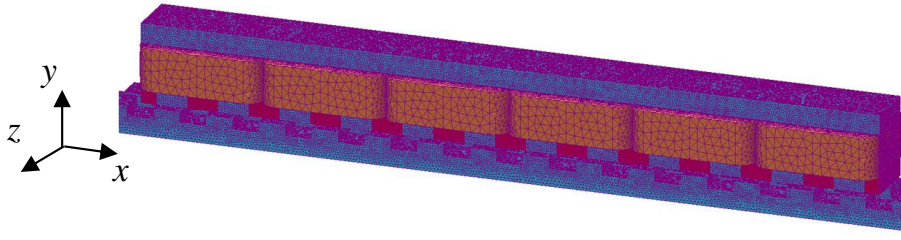


Fig. 5. 3-D mesh model except for the air region

Table 4. Analysis conditions

Number of elements	4,730,229
Number of nodes	801,229
Number of edges	5,532,118
CPU time [h]	12.5

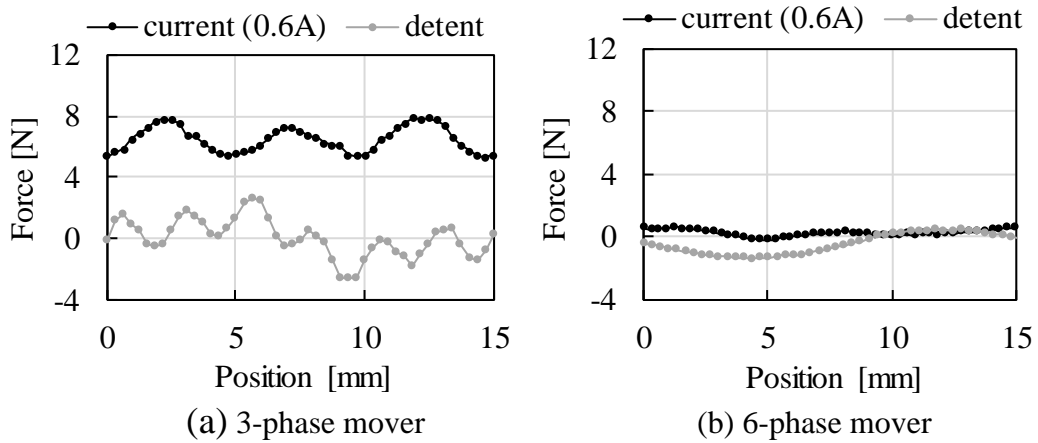


Fig. 6. Analysis results of the force characteristics (Pattern 1-1)

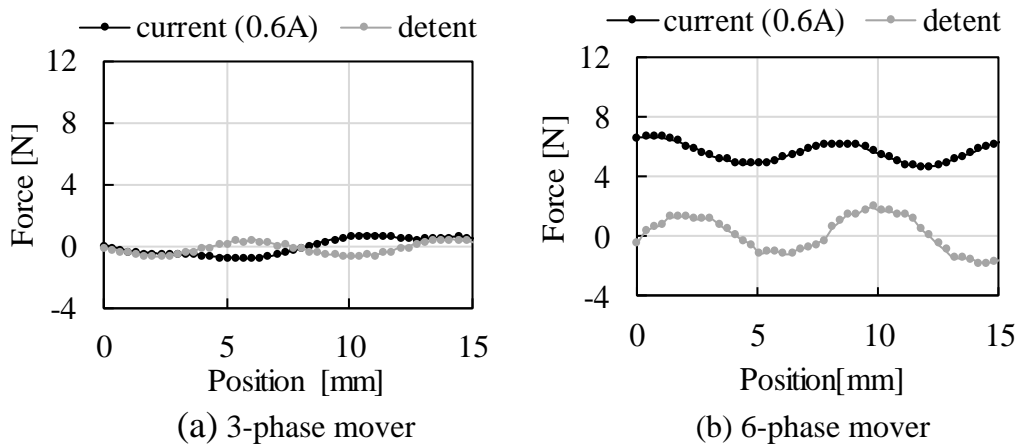


Fig. 7. Analysis results of the force characteristics (Pattern 1-2)

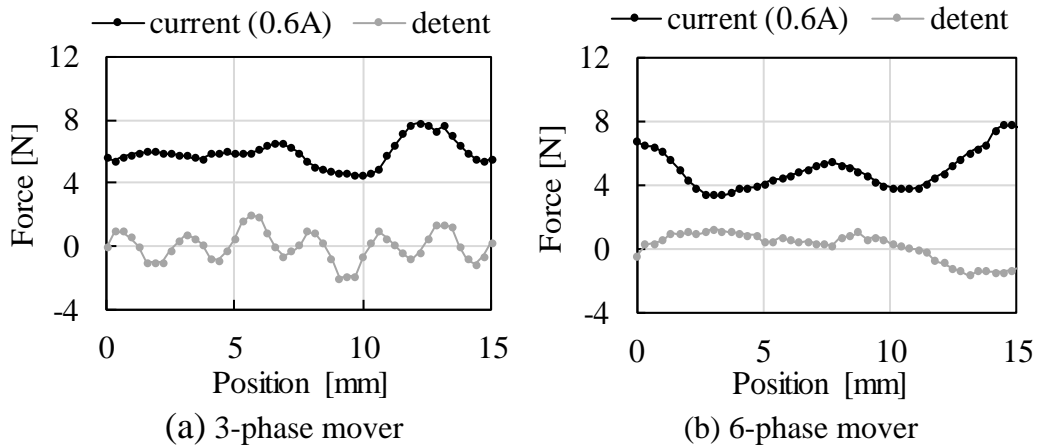


Fig. 8. Analysis results of the force characteristics (Pattern 1-3)

Table 4. Average force of the proposed linear actuator

	Average force of the 3-phase mover [N]	Average force of the 6-phase mover [N]
Pattern 1	6.47	0.24
Pattern 2	0.007	5.70
Pattern 3	5.89	5.13

For verifying the independency of both movers, the back electromotive force is analyzed. In this study, the analysis patterns are shown as follows:

Pattern 2-1: Only the 3-phase mover is moved.

Pattern 2-2: Only the 6-phase mover is moved.

Pattern 2-3: Both movers are moved

The moving velocity is 300 mm/s, and the operating time is 100 ms.

The analysis results are shown in Fig. 9. From these results, the back electromotive force of pattern 2-3 is the composition of that of pattern 1 and pattern 2. It shows that the movers can be independently driven.

For verifying the dynamic performance under position feedback control, the dynamic characteristics analysis is conducted. The target trajectory is given using a trapezoidal velocity waveform. The analysis patterns using the target trajectory are shown as follows:

Pattern 3-1: The 3-phase mover is controlled for the target trajectory, and the 6-phase mover is controlled to be fixed.

Pattern 3-2: The 6-phase mover is controlled for the target trajectory, and the 3-phase mover is controlled to be fixed.

Pattern 3-3: Both movers are controlled for the target trajectory

The target trajectory is shown in Fig. 10. The maximum velocity and acceleration is 0.4 m/s and 0.2 m/s², respectively. The PID controller gain is shown in Table 5. In this control, the control period is 2.5 ms. The mass of each mover is 3 kg.

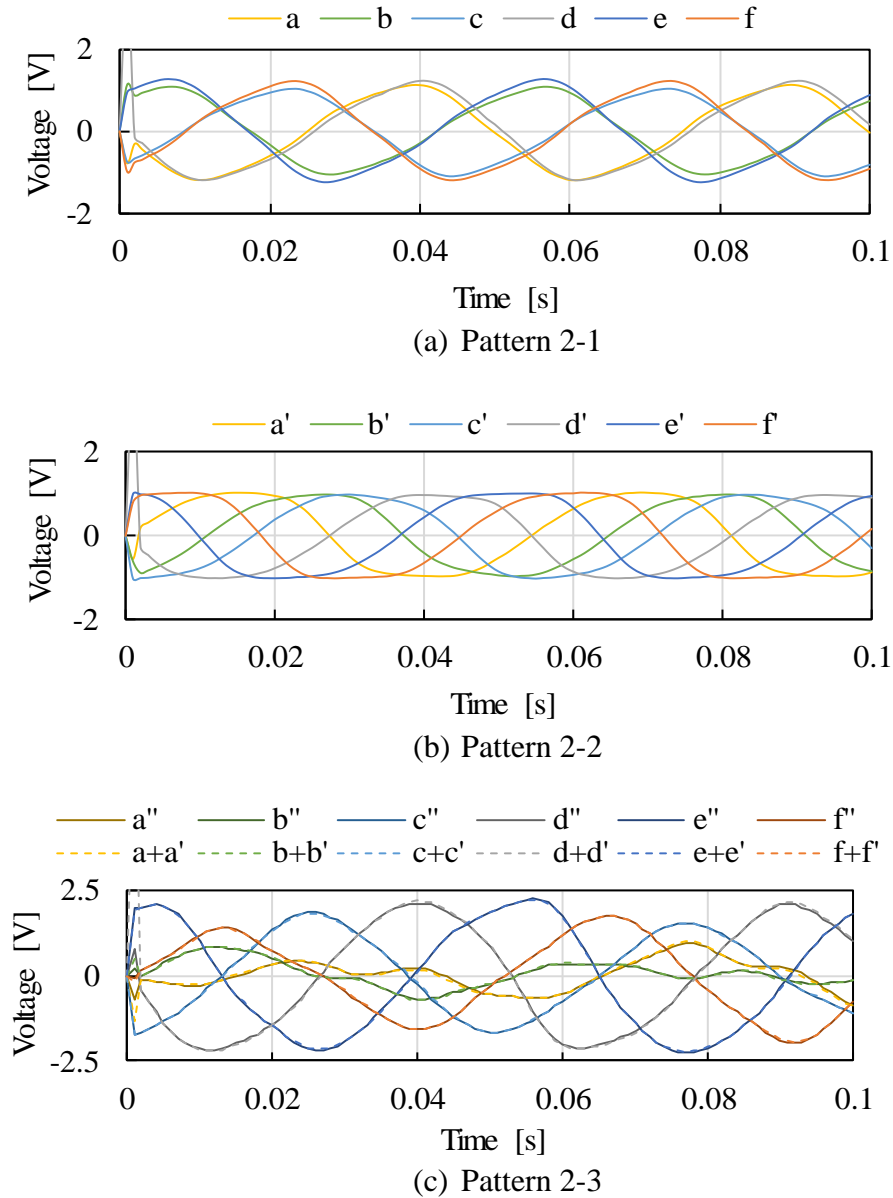


Fig. 9. Analysis results of the back electromotive force

Table 5. PID controller gain

		Current controller	Position controller
3-phase	K_p	4.85	300
	K_i	0.24	10
	K_d	-	150
6-phase	K_p	4.85	300
	K_i	0.24	10
	K_d	-	150

The computed dynamic characteristics are shown in Figs. 11, 12, and 13. From the results, the steady-state error is very small, and both movers can be controlled following the target trajectory.

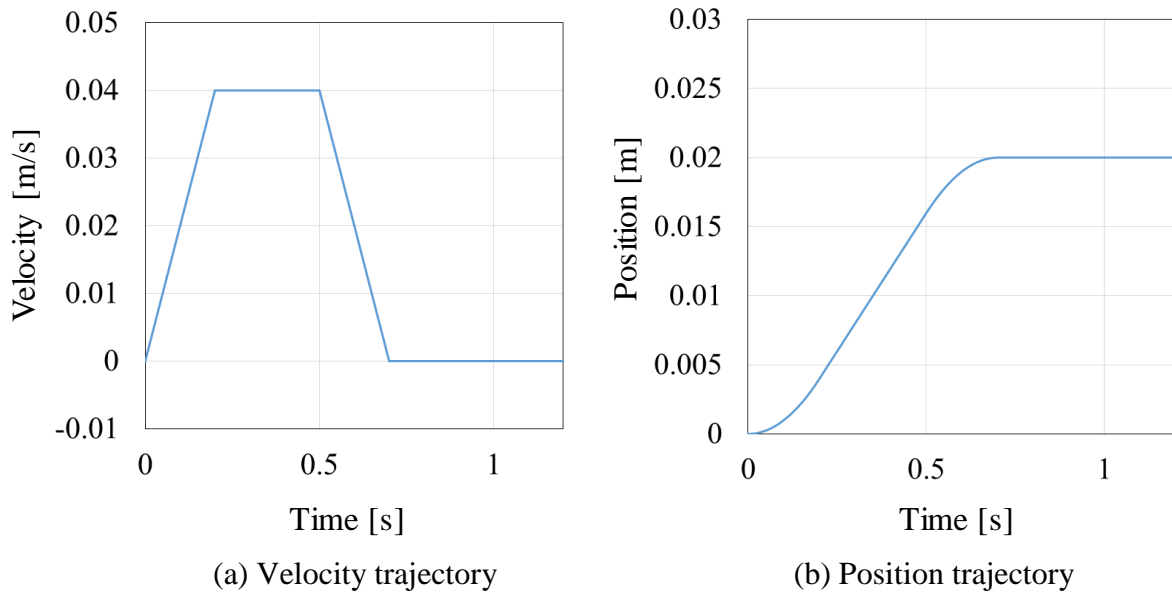


Fig. 10. Target trajectory

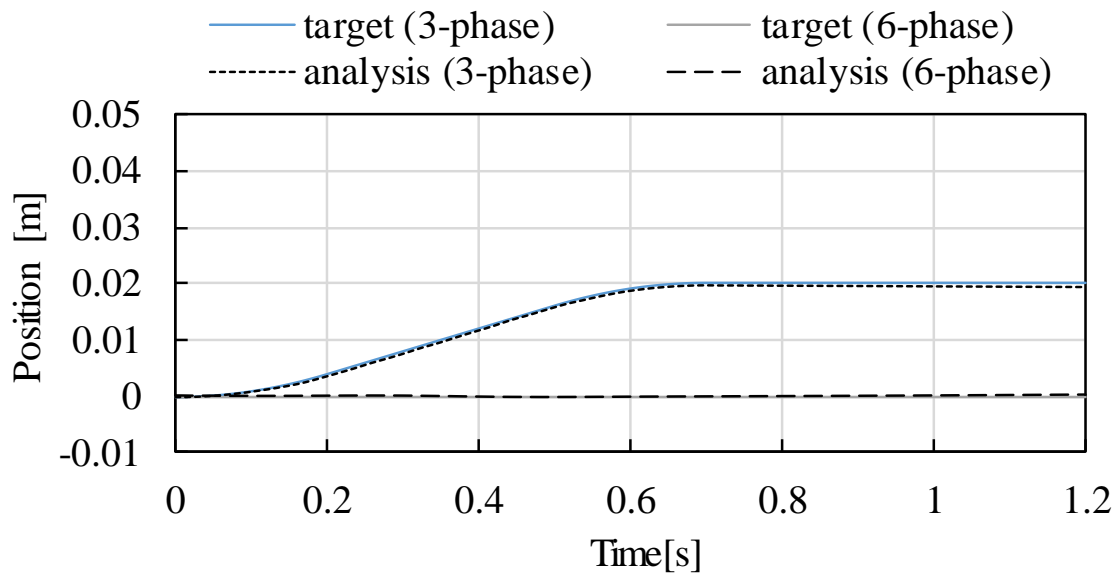


Fig. 11. Analysis results of the position feedback control (Pattern 3-1)

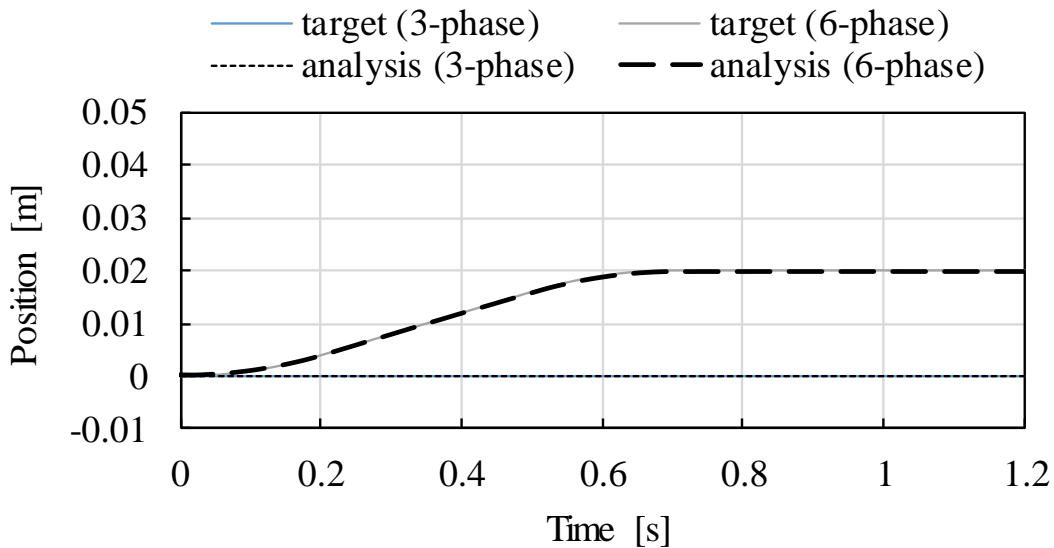


Fig. 12. Analysis results of the position feedback control (Pattern 3-2)

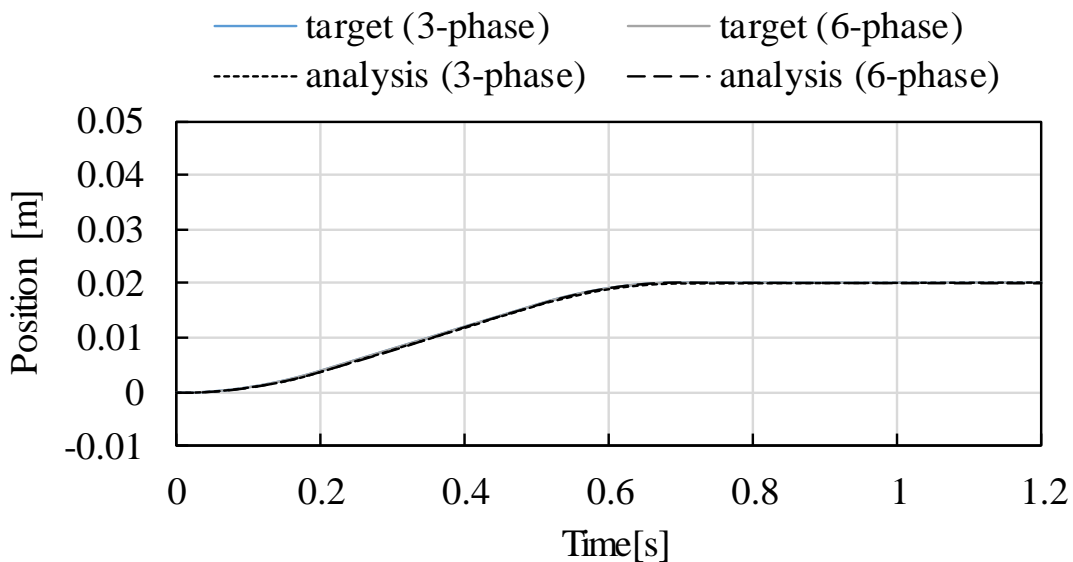


Fig. 13. Analysis results of the position feedback control (Pattern 3-3)

The step response of the control system is also analyzed. The analysis patterns are shown as follows:

Pattern 4-1: The step target trajectory is applied to the 3-phase mover, and the 6-phase mover is controlled to be fixed.

Pattern 4-2: The step target trajectory is applied to the 6-phase mover, and the 3-phase mover is controlled to be fixed.

The analysis results of the step response are shown in Fig. 14. The time constant of the mover of the 3-phase and 6-phase movers is 0.115 s and 0.125 s, respectively. From the results, the mover well followed the target trajectory, and the movers can be independently controlled.

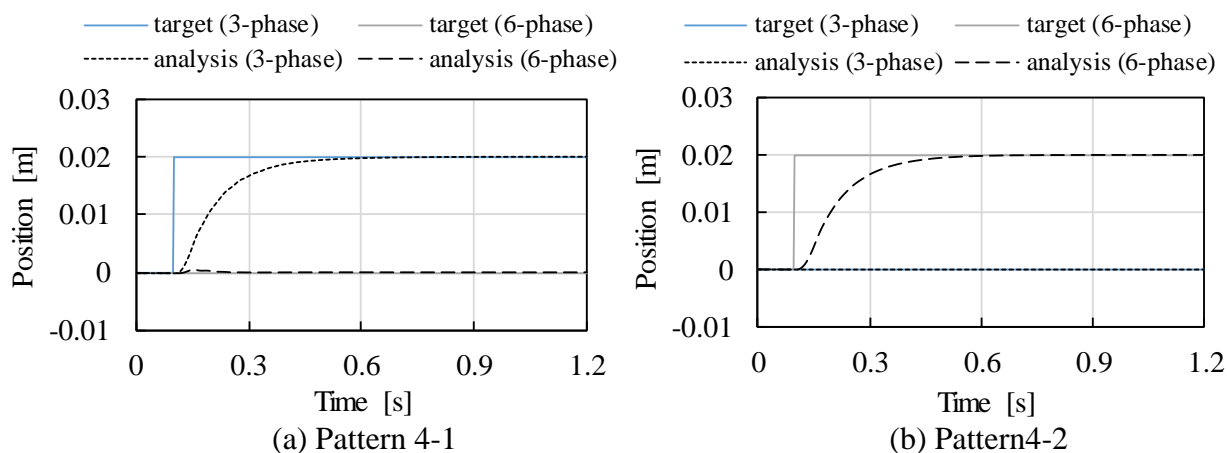


Fig. 14. Analysis results of the step response

CONCLUSION

In this paper, we proposed a linear vernier actuator with two movers. The basic structure, the operating principle, and the control method of the two movers were described. The force characteristics were investigated by the magnetic field analysis using 3-D finite element method. The dynamic characteristics under position feedback control were verified, and it was found that the movers can be independently controlled. In future works, we will verify the control performance on a prototype.

References

1. Niu S, Ho SL, Fu WN. Performance Analysis of a Novel Magnetic Geard Tubular Linear Permanent Magnetic Machine. *IEEE Trans. Magn.* 2011;47(10):3598-3601. doi:10.1109/tmag.2011.2148167
2. Na B, Choi H, Kong K. Design of a Direct-Driven Linear Actuator for a High-Speed Quadruped Robot, Cheetaroid-I. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2015;20(2):924-933. doi: 10.1109/tmech.2014.2326696
3. Zheng LL, Yao BY, Wang Q. Desired Compensation Adaptive Robust Control of a Linear-Motor-Driven Precision Industrial Gantry With Improved Cogging Force Compensation. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2008;13(6):617-624. doi: 10.1109/tmech.2008.2003510
4. Nakata Y, Hiroshi H, Hirata K. Dynamic Analysis Method for Electromagnetic Artificial Muscle Actuator under PID Control. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2011;131(2):166-170. doi: 10.1541/ieejias.131.166
5. Fujimoto Y, Kominami T, Hamada H. Development and Analysis of a High Thrust Force Direct-Drive Linear Actuator. *IEEE Trans. On Ind. Elec.* 2009;56(5):1383-1392. doi: 10.1109/tie.2009.2012419
6. Toba A, Lipo TA. Generic Torque Maximizing Design Methodology of Surface Permanent Magnet Vernier Machine. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2000;36(6):1539-1546. doi: 10.1109/28.887204

7. Kohara A, Hirata K, Niguchi N, Ohno Y. Finite-Element Analysis and Experiment of Current Superimposition Variable Flux Machine Using Permanent Magnet. 2016;52(9):8107807. doi: 10.1109/tmag.2016.2572659
8. Suzuki H, Hirata K, Niguchi N, Kohara A. Characteristics Verification of a Novel Motor with Two Controllable Rotors. In Proc. *IEEE Int. Magn. Conf.* 2018; EG-10:898. doi: 10.1109/intmag.2018.8508233
9. Webb JP, Forghani B. A T- Ω method using hierarchal edge elements. in Proc. *IEE, Sci. Meas. Technol.* 1995;142(2):133-141. doi: 10.1049/ip-smt:19951439
10. Webb JP, Forghani B. DC Current Distributions and Magnetic Fields using the T- Ω Edge-Element Method. *IEEE Trans. Magn.* 1995;31(3):1444-1447. doi: 10.1109/20.376300

Information about the authors:

Akira Heya, Ph.D. Student, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan
ORCID: 0000-0001-5966-4387;
E-mail: Akira.hey@ams.eng.osaka-u.ac.jp

Katsuhiro Hirata, Professor,
ORCID: 0000-0002-5597-5265;
E-mail: k-hirata@ams.eng.osaka-u.ac.jp

Noboru Niguchi, Assistant professor,
ORCID: 0000-0002-1005-7946;
E-mail: noboru.niguchi@ams.eng.osaka-u.ac.jp

To cite this article:

Heya A, Hirata K, Niguchi N. Linear Vernier Actuator with Two Movers. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):63-79. doi: 10.17816/transsyst20206163-79

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.316.72
DOI 10.17816/transsyst20206180-91

© С. О. Хомутов, Н. А. Серебряков

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова
(Барнаул, Россия)

СОЗДАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА РАЙОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ

Цель: Разработать математическую модель краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей 6-35 кВ с помощью аппарата искусственных нейронных сетей.

Методы: В работе использованы инструменты регрессионного анализа и аппарата глубокого машинного обучения.

Результаты: Получена нейросетевая модель краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей 6-35 кВ, учитывающая факторы времени, метеорологических условий, отключений отдельных питающих линий электропередач, режима работы потребителей электроэнергии с мощностью свыше 670 кВт, факта наличия центрального отопления и водоснабжения.

Заключение: Разработанная нейросетевая математическая модель сводит задачу краткосрочного прогнозирования электропотребления к поиску матрицы свободных коэффициентов посредством обучения на имеющихся статистических данных.

Ключевые слова: прогнозирование электропотребления, факторы, оптовый рынок электроэнергии и мощности, машинное обучение, районная электрическая сеть.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrical Engineering

© S. O. Khomutov, N. A. Serebryakov

Polzunov Altai State Technical University
(Barnaul, Russia)

CREATION OF A SHORT-TERM LOAD FORECASTING NEURAL NETWORK MODEL OF ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEX OF SECTION REGIONAL ELECTRIC GRID 6-35 kV

Aim: Is developing of short-term load forecasting math model of the electrical engineering complex of the district regional electric grid 6-35 kV with the use of artificial neural networks.

Methods: The tools of regression analysis and deep machine learning were used in the work.

Results: The neural network model for short-term load forecasting of the electrical engineering complex of section regional electric grid 6-35 kV, which considered factors of time, meteorological conditions, disconnections of individual power transmission lines, the operation mode of electricity consumers with a capacity of over 670 kW, the fact of the availability of central heating and water supply, has been obtained.

Conclusion: The developed neural network math model reduces the problem of short-term load forecasting to the search of matrix free coefficients through training on the available statistical data.

Keywords: load forecasting, factors, wholesale electricity market, machine learning, regional electric grid.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, огромное количество энергоресурсов потребляется на пуски и остановы генерирующего оборудования. Для минимизации числа необоснованных изменений режима работы генерирующего оборудования, Системный оператор Единой энергетической системы (ЕЭС) составляет диспетчерский график функционирования ЕЭС. При составлении данного диспетчерского графика учитываются краткосрочные прогнозы электропотребления крупных потребителей электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ). Следовательно, в условиях функционирования рынка электроэнергии точность прогнозов потребления существенно влияет на технологические и экономические показатели энергосистемы [1]. Как участники рынка, каждый поставщик и потребитель хочет получить наибольшую выгоду от оборота электроэнергии [2]. Ценовая конъюнктура на ОРЭМ складывается так, чтобы стимулировать крупных покупателей электроэнергии придерживаться собственных прогнозов.

Основными покупателями электроэнергии на ОРЭМ являются гарантирующие поставщики электроэнергии (ГП), которые подразделяются на:

- гарантирующие поставщики первого уровня – крупные энергосбытовые компании, которые покупают электроэнергию по одной группе точек поставки электроэнергии (ГТП). Как правило, на долю покупки электроэнергии ГП первого уровня приходится большая часть электропотребления региона Российской Федерации;
- гарантирующие поставщики второго уровня – энергосбытовые компании, которые осуществляют покупку электроэнергии по одной или нескольким группам точек поставки электроэнергии (ГТП), соответствующие определенному участку районных электрических сетей территориальной сетевой организации.

Задачи краткосрочного прогнозирования электропотребления (short-term load forecasting – STLF) гарантирующего поставщика первого уровня и энергосистемы региона в целом схожи. В то же время, задача STLF ГТП гарантирующего поставщика второго уровня сводится к задаче прогнозирования электропотребления более мелкого электротехнического комплекса участка районных электрических сетей, от которого питается один или несколько районов субъекта страны или крупного города.

Временной ряд почасового электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей зависит от множества факторов, часть из которых несут недетерминированный характер [3]. Данное обстоятельство делает задачу STLF для данного временного ряда слабоформализуемой.

В литературе хорошо освещен вопрос прогнозирования электрических нагрузок на разные временные горизонты. Методы повышения точности STLF можно подразделить на: методы математической статистики, методы искусственного интеллекта и гибридные методы [4, 5]. Однако, в условиях неопределенности, традиционные методы математической статистики или имитационного моделирования не позволяют строить адекватные модели объектов [6].

В настоящее время наблюдается стремительное развитие таких областей информационных технологий, как искусственный интеллект, системы обработки больших объемов данных (Big Data) и глубокое машинное обучение. Рассмотренные информационные технологии являются высокоэффективным инструментом для решения широкого перечня задач, которые относятся к слабоформализуемым или неформализуемым [7].

За прошедшее десятилетие ученые разработали множество методов повышения точности STLF на основе алгоритмов машинного обучения. Невзирая на их огромное количество, ни один из методов не может быть назван универсальным. В работах [8, 9] применены устаревшие алгоритмы машинного обучения, такие как метод опорных векторов и метод главных компонент. В настоящее время, передовые позиции в машинном обучении занимают алгоритмы глубоких нейронных сетей: многослойные перцептроны, сверточные нейронные сети и рекуррентные нейронные сети. Данные алгоритмы показывают лучшие результаты при решении практических задач распознавания образов, прогнозирования временных рядов, аппроксимации функций и т.д.

Также, точность краткосрочного прогнозирования зависит от качества выборки связанных статистических данных [10]. Существующие математические модели электропотребления энергосистем или отдельных зданий [1, 5, 8–14] не учитывают ряд факторов, которые оказывают значительное влияние на временной ряд электропотребления

электротехнического комплекса участка районных электрических сетей 6–35 кВ, такие как:

- отключения отдельных питающих линий электропередач 6–35 кВ;
- режим работы потребителей электроэнергии с мощностью свыше 670 кВт;
- наличие центрального отопления и горячего (холодного) водоснабжения в отдельном населенном пункте.

В связи с учетом дополнительных факторов при STLF, остаются открытыми вопросы выбора оптимальной архитектуры и конфигурации нейросетевой модели, при которых достигается максимальная точность прогнозирования. В то же время, до сих пор не существует формализованных методов проектирования и настройки параметров искусственных нейронных сетей (ИНС). Под каждую конкретную задачу необходимо разрабатывать собственную нейронную сеть, для которой оптимальное значение всех гиперпараметров подбирается на основе многочисленных опытов с обучающей и тестовой выборкой.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА РАЙОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

На основании анализа, проведенного в [3], почасовое электропотребление электротехнического комплекса участка районной электрической сети можно представить в виде функции влияющих факторов:

$$y = f_1(x_1, x_2, \dots, x_c) + f_2(x_{c+1}, x_{c+2}, \dots, x_l) + \varepsilon, \quad (1)$$

где y – почасовое электропотребление электротехнического комплекса участка районной электрической сети;

f_1, f_2 – функциональные зависимости, устанавливающие взаимосвязь между влияющими факторами и почасовым электропотреблением;

x_1, x_2, \dots, x_c – набор эндогенных факторов;

$x_{c+1}, x_{c+2}, \dots, x_l$ – набор экзогенных факторов;

l – общее количество влияющих факторов.

ε – шумовая составляющая.

К эндогенным воздействиям можно отнести временные факторы (порядковый номер дня в году, день недели, признак праздничного и предпраздничного дня т.д.). К экзогенным факторам можно отнести метеорологические условия [15], плановые отключения электросетевого оборудования, факт наличия центрального отопления и водоснабжения и

т.д. На шумовую составляющую приходится факторы аварийных отключений электросетевого оборудования, центрального отопления и водоснабжения, поломки основного оборудования крупных потребителей электроэнергии ГТП [3].

Так как системы электро-, водо- и теплоснабжения достаточно надежны, то можно посчитать, что шумовая составляющая ε пренебрежительно мала. Следовательно, при STLF участка районной электросети необходимо восстановить функциональные зависимости f_1, f_2 , соответствующие эндогенным и экзогенным факторам.

Задача STLF электротехнического комплекса участка районных электрических сетей усложняется тем, что необходимо спрогнозировать суточный график электрической нагрузки, а не только его отдельные значения. Следовательно, выражение (1) необходимо представить в векторном виде:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_h \end{bmatrix} = f_1(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_c) + f_2(\bar{x}_{c+1}, \bar{x}_{c+2}, \dots, \bar{x}_l), \quad (2)$$

где Y – вектор суточного электропотребления электротехнического комплекса участка районной электрической сети;

$h = 24$ – количество часов в сутках;

$$\bar{x}_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \dots \\ x_{i24} \end{bmatrix} \text{ – вектор суточных значений } i\text{-го влияющего фактора.}$$

Так как, стандартные метода математической статистики, такие как корреляционный и регрессионный анализ, малоприспособны для прогнозирования поведения такой сложной функциональной зависимости, как временной ряд электропотребления электротехнического комплекса участка районной электрической сети, необходимо прибегнуть к инструментам нейросетевого анализа. Для представления выражения (2) в виде нейросетевой математической модели, рассмотрим принцип функционирования одного искусственного нейрона в первом скрытом слое. На Рис. 1 представлена функциональная схема искусственного нейрона.

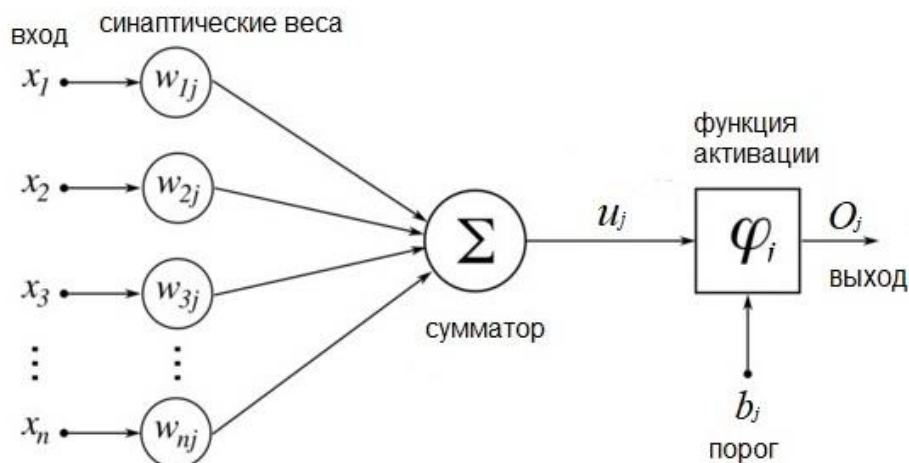


Рис.1. Функциональная схема искусственного нейрона

Схема, представленная на Рис. 1 состоит из следующих основных элементов:

- входных воздействий – характеризуются уровнем сигнала x_i ;
- набора синаптических связей – характеризуются весовым коэффициентом w_i ;
- сумматора – складывает входные сигналы, взвешенные на веса соответствующих синаптических связей;
- порога – увеличивает или уменьшает амплитуду сигнала, подаваемого на вход функции активации;
- функция активации – ограничивает амплитуду выходного сигнала нейрона. Обычно диапазон амплитуд лежит в интервале $[0;1]$ или $[-1;1]$ в зависимости от вида функции активации.

Математически функционирование нейрона можно представить следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i \\ v_j = u_j + b_j \\ O_j = \varphi(v_j) \end{cases}, \quad (3)$$

- где u_j – линейная комбинация входных воздействий на нейрон j ;
 w_{ij} – вес синаптической связи соединяющей вход i и нейрон j ;
 x_i – входной сигнал нейрона;
 v_j – индуцированное локальное поле нейрона;
 b_j – порог активации нейрона;
 O_j – выходной сигнал нейрона;
 $\varphi(v_j)$ – функция активации нейрона.

Для удобства выкладок, выразим порог активации через дополнительную синаптическую связь с весом w_0 и фиксированным входным сигналом $x_0=1$:

$$O_j = \varphi(v_j) = \sum_{i=0}^n w_{ij} x_i \quad (4)$$

На Рис. 2 представлена структурная схема нейронной сети с произвольным количеством слоев.

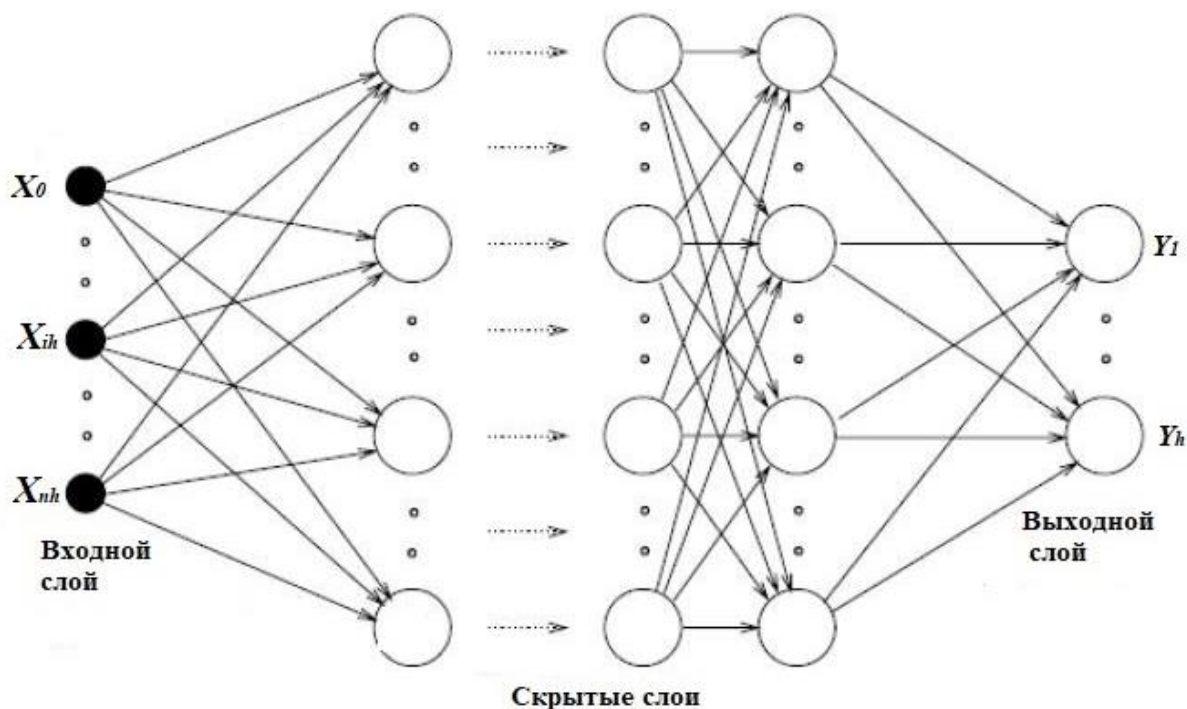


Рис. 2. Структурная схема нейронной сети с произвольным количеством слоев

Нейронная сеть, представленная на Рис. 2, состоит из:

- входного слоя сенсорных элементов, которые получают информацию непосредственно из «внешней среды»;
- скрытых слоев, в которых происходят основные вычисления ИНС;
- выходного слоя, формирующего итоговый отклик нейронной сети.

Расположение нейронов послойно очень важно с вычислительной точки зрения, так как появляется возможность векторизовать процесс обработки данных в ИНС. Другими словами, все операции в ИНС производятся с помощью матричных операций сложения, скалярного произведения и т.д.

По своей сути, выражение (4) представляет собой скалярное произведение векторов весовых коэффициентов w на вектор входных

сигналов x . Если на вход нейронной сети подается вектор суточных значений факторов, влияющих на электропотребление ГТП гарантирующего поставщика второго уровня, размером $n=24 \cdot l$, то выражение (4) можно записать в виде:

$$O_j = \varphi_j \left(\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \right), \quad (5)$$

Тогда, общий отклик скрытого слоя ИНС, состоящего из k нейронов, можно представить в виде:

$$O_1 = f(W_{01}, X) = \begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ \dots \\ O_k \end{bmatrix} = \varphi_k \left(\begin{bmatrix} w_{01} & w_{02} & \dots & w_{0n} \\ w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{k1} & w_{k2} & \dots & w_{kn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \right), \quad (6)$$

где O_1 – вектор отклика слоя первого скрытого слоя ИНС;

W_{01} – матрица весовых коэффициентов между входным и первым скрытым слоем нейронной сети размером $n \times k$;

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \text{ – массив суточных значений влияющих факторов;}$$

w_{kn} – весовой коэффициент соединяющий n -ый входной узел и k -ый нейрон скрытого слоя;

Далее, отклик O_1 становится входным сигналом для следующего слоя скрытого слоя нейронной сети, и, на основании выражения (6), рассчитывается отклик следующего слоя, и т.д. Итоговой отклик нейронной сети, который является почасовым прогнозом электропотребления ГТП ГП второго уровня, формируется на основании выражения:

$$Y = \varphi(W_{mh} O_m), \quad (7)$$

где W_{mh} – матрица весовых коэффициентов между последним скрытым слоем m и выходным слоем h ;

O_m – отклик последнего скрытого слоя m .

На основании выражения (6) и выражения (7) можно сделать вывод о том, что задача краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей сводится к подбору всех свободных параметров нейросетевой модели. Свободные параметры нейронных сетей определяются посредством обучения на имеющихся статистических данных. База статистических данных формируется на основании информации о величине всех факторов, влияющих на поведение временного ряда электропотребления в краткосрочной перспективе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная математическая модель электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей 6-35 кВ учитывает, помимо стандартных эндогенных (временных) и метеорологических факторов, экзогенные факторы отключений фидеров 6-110 кВ, режима работы потребителей электроэнергии мощностью свыше 670 кВт, факта наличия водоснабжения и центрального отопления в отдельных населенных пунктах. Электропотребление электротехнических комплексов других номиналов напряжения, в том числе, свойственных транспортным системам, будет характеризоваться другим набором влияющих факторов. Это, в свою очередь, повлияет на размер матрицы весовых коэффициентов (выражение 6), но принцип вычислений останется тем же. В связи с тем, что стандартные методы регрессионного анализа не позволяют строить адекватные модели прогнозирования такой сложной функциональной зависимости, как временной ряд электропотребления участка районных электрических сетей, необходимо прибегнуть к инструментам машинного обучения. Разработанная нейросетевая математическая модель сводит задачу краткосрочного прогнозирования электропотребления к поиску матрицы свободных коэффициентов посредством обучения на имеющихся статистических данных.

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. Доманов В.И., Билалова А.И. Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, – № 2. – С. 59–65. [Domanov VI, Bilalova AI. Forecasting power consumption based on source information. Bulletin of the South Ural State University. Series “Power Engineering”. 2016;16(2):59-65. (In Russ.)]. doi: 10.14529/power160208

2. Gao G, Lo K, Lu JF, et al. A short-term electricity price forecasting scheme for power market. *World Journal of Engineering and Technology*. 2016;4:58-65. doi: 10.4236/wjet.2016.43D008
3. Серебряков Н.А., Хомутов С.О. Анализ случайной составляющей временного ряда электрической нагрузки группы точек поставки электроэнергии сельхозпроизводителей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 5 (175). – С. 153 -158 [Serebriakov NA, Homutov SO. Analysis of the random component of electric load time series of delivery point cluster agricultural producers. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019;5(175):153-158 (In Russ.)] Доступно по: <http://www.asau.ru/vestnik/2019/5/>
4. Zheng H, Yuan J, Chen L. Short-term load forecasting using EMD-LSTM neural networks with a XGBOOST algorithm for feature importance evaluation. *Energies*. 2017;10:1-20. doi:10.3390/en10081168
5. López M, Sans C, Valero S, et al. Empirical comparison of neural network and autoregressive models in short-term load forecasting. *Energies*. 2018;11:1-19. doi:10.3390/en11082080
6. Катасёв А. С. Нейронечеткая модель формирования нечетких правил для оценки состояния объектов в условиях неопределенности // Компьютерные исследования и моделирование. – 2019. – Т. 11 – No 3. – С. 477–492. [Katasev AS. Neuro-fuzzy model of fuzzy rules formation for objects state evaluation in conditions of uncertainty. *Komp'uternye issledovaniia i modelirovanie*. 2019;11(3):477-492. (In Russ.)]. doi: 10.20537/2076-7633-2019-11-3-477-492
7. Станкевич Т.С. Разработка метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара посредством искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 9. – С. 111–120. [Stankevich TS. Development of operational prediction method of forest fire dynamics based on artificial intelligence and deep machine learning *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(9):111-120. (In Russ.)]. doi: 10.21285/1814-3520-2018-9-111-120
8. Кирпичникова, И.М. Прогнозирование объемов потребления электроэнергии // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 16–21. [Kirpichnikova, IM. Energy consumption forecasting. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*. 2014;14(2):16-22. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21682908>
9. Надтока И.И., Аль Зихери Б.М. Краткосрочное прогнозирование электропотребления региона с учетом метеофакторов на основе метода опорных векторов и алгоритма роя частиц // Изв. вузов. Электромеханика. – 2014. – № 3. – С. 44–48. [Nadtoka II, Al' Zikheri BM. Kratkosrochnoe prognozirovanie elektropotrebleniia regiona s uchetom meteofaktorov na osnove metoda opornykh vektorov i algoritma roia chastits. *Izv. vuzov. Elektromekhanika*. 2014;3:44-48. (In Russ.)] Доступно по: <http://electromeh.npi-tu.ru/ru/archive/2014/issue3/nadtoka>
10. Li MW, Geng J, Hong WC, et al. Hybridizing chaotic and quantum mechanisms and fruit fly optimization algorithm with least square support vector regression model in electric load forecasting. *Energies*. 2018;11(2226):1-22. doi:10.3390/en11092226
11. Wang Z, Srinivasan R. A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017;75:796-808. doi: 10.1016/j.rser.2016.10.079
12. Торопов А.С., Туликов А.Н. Прогнозирование почасового электропотребления региональной энергосистемы с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 5. – С. 143–151. [Toropov AS, Tulikov AN. Forecasting of regional power supply system power consumption per hour using artificial neural networks. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;21(5):143-151]. doi: 10.21285/1814-3520-2017-5-143-151
 13. Иванин О. А., Директор Л. Б. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования энергетических нагрузок обособленных потребителей // Теплоэнергетика. – 2018. – № 5. – С. 17–26. Primenenie iskusstvennykh neironnykh setei dlia prognozirovaniia energeticheskikh nagruzok obosoblennykh potrebitelei [Ivanin OA, Direktor LB. Application of artificial neural networks to predict energy loads of isolated consumers. Teploenergetika. 2018;5:17-26]. doi: 10.1134/S0040363618050041
 14. Mocanu E, Nguyen PH, Gibescu M, et al. Deep learning for estimating building energy consumption. Sustainable Energy. Grids and Networks. 2016;6:91-99. doi: 10.1016/j.segan.2016.02.005
 15. Rajan DV, Sourav M, Thakur SS. An efficient approach for short-term load forecasting using historical data. International Journal of Engineering Research & Technology. 2012;3:1-9. Режим доступа: <https://www.ijert.org/research/an-efficient-approach-for-short-term-load-forecasting-using-historical-data-IJERTV1IS3193.pdf>

Сведения об авторах:

Хомутов Станислав Олегович, д.т.н., профессор;
eLibrary SPIN: 8613-0404; ORCID: 0000-0001-7428-7364; Scopus ID: 57193488394;
E-mail: homutov.so@yandex.ru

Серебряков Николай Александрович, аспирант;
eLibrary SPIN: 8639-6888; ORCID: 0000-0002-8430-9384;
E-mail: na_serebryakov@altke.ru

Information about the authors:

Stanislav O. Khomutov, Dr. Sc., professor;
eLibrary SPIN: 8613-0404; ORCID: 0000-0001-7428-7364; Scopus ID: 57193488394;
E-mail: homutov.so@yandex.ru

Nikolay A. Serebryakov, postgraduate student;
eLibrary SPIN: 8639-6888; ORCID: 0000-0002-8430-9384;
E-mail: na_serebryakov@altke.ru

Цитировать:

Хомутов С.О., Серебряков Н.А. Создание нейросетевой математической модели краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 80–91. doi: 10.17816/transsyst20206180-91

To cite this article:

Khomutov SO, Serebryakov NA. Creation of a Short-Term Load Forecasting Neural Network Model of Electrical Engineering Complex of Section Regional Electric Grid. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):80-91. doi: 10.17816/transsyst20206180-91

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 658.264

DOI 10.17816/transsyst20206192-103

© И. А. Терёхин¹, И. А. Кремлев², И. В. Тарабин², Е. Г. Абишов¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

²Омский государственный университет путей сообщения

(Омск, Россия)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПАСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В СМЕЖНЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ ПРИ МАГНИТНОМ ВЛИЯНИИ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обоснование: В настоящее время на железных дорогах РФ существуют препоны для повсеместного внедрения нового способа заземления опор контактной сети, а именно отсутствует теоретическая и экспериментальная оценка электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока на смежные линии связи при использовании опор контактной сети в качестве естественных заземлителей.

Цель: Совершенствование методики определения опасного напряжения в смежных линиях связи при магнитном влиянии тяговой сети переменного тока.

Методы: В статье рассматривается магнитное влияние при двух принципиально разных системах заземления опор контактной сети переменного тока – традиционная система заземления на тяговую рельсовую сеть и система без заземления опор контактной сети рельсовую сеть (использование арматуры и фундаментов опор контактной сети в качестве естественных заземлителей).

Результаты: В работе показан недостаток существующей методики расчета опасного напряжения в кабельных линиях при магнитном влиянии, которая имеет ряд серьезных допущений не позволяющих получить объективную картину магнитного влияния на смежные линии при наличии троса группового заземления. На основе существующей методики разработана усовершенствованная математическая модель, позволяющая определить уточненные значения опасного напряжения в смежных линиях связи посредством учета действительной длины троса группового заземления при эксплуатации тяговой сети без заземления опор на тяговую рельсовую сеть. Проведено сравнение полученных значений опасных влияний с нормативными значениями в режиме короткого замыкания и вынужденном режиме. Дана оценка магнитного влияния на смежные линии связи при традиционной системе заземления и системе без заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть.

Выводы: Магнитное влияние системы тягового электроснабжения переменного тока с использованием опор в качестве естественных заземлителей меньше, чем при использовании системы заземления опор контактной сети на рельсовую сеть.

Ключевые слова: заземление; система заземления опор контактной сети; тяговое электроснабжение; магнитное влияние; опора контактной сети; естественный заземлитель; железобетонный фундамент; методика расчета опасного напряжения.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© I. A. Terekhin¹, I. A. Kremlev², I. V. Tarabin², E. G. Abishov¹

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

²Omsk State Transport University
(Omsk, Russia)

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF DETERMINING DANGEROUS VOLTAGE IN ADJACENT LINES OF COMMUNICATION UNDER MAGNETIC INFLUENCE OF A TRACING AC SYSTEM

Background: Currently, there are obstacles on the railways of the Russian Federation for the widespread introduction of a new method of grounding the contact network supports, namely, there is no theoretical and experimental assessment of the electromagnetic effect of the AC traction network on adjacent communication lines when using the contact network supports as natural grounding conductors.

Aim: Improving the methodology for determining hazardous voltage in adjacent communication lines under the magnetic influence of the AC traction network.

Methods: The article discusses the magnetic effect with two fundamentally different grounding systems for AC contact poles - a traditional grounding system on a traction rail network and a system without grounding a contact network poles on a rail network (using fittings and foundations of contact network poles as natural grounding conductors).

Results: The paper shows the disadvantage of the existing methodology for calculating the dangerous voltage in cable lines under magnetic influence, which has a number of serious assumptions that do not allow an objective picture of the magnetic effect on adjacent lines in the presence of a group ground wire. Based on the existing methodology, an improved mathematical model has been developed that allows one to determine the specified values of the dangerous voltage in adjacent communication lines by taking into account the actual length of the group ground cable during operation of the traction network without grounding the supports on the traction rail network. The obtained values of hazardous influences are compared with standard values in the short circuit mode and forced mode. An assessment of the magnetic effect on adjacent communication lines with a traditional grounding system and a system without grounding the supports of the contact network to the traction rail network is given.

Conclusions: The magnetic effect of the traction power supply system of alternating current using poles as natural grounding conductors is less than when using the grounding system of poles of a contact network on a rail network.

Keywords: grounding; grounding system of contact network supports; traction power supply; magnetic effect; support of a contact network; natural grounding; reinforced concrete foundation; dangerous voltage calculation methodology.

ВВЕДЕНИЕ

Многие авторы в своих работах [1, 2], рассматривая магнитное влияние контактной сети на смежные линии, отмечали создание заземленными тросами экранирующего действия. Однако все авторы приводили расчеты с учетом следующих допущений: длина сближения влияющей и подверженной влиянию линии одинаковы для контактной сети и троса группового заземления (далее – ТГЗ); ТГЗ имеет традиционную систему заземления на тяговую рельсовую сеть. При таких допущениях коэффициент экранирующего действия ТГЗ во многом зависит только от диаметра и марки провода. Данные пренебрежения не полностью отражают объективную картину магнитного влияния на смежные линии при наличии ТГЗ.

В случае заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть длина ТГЗ согласно инструкции по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах [3] регламентируется в зависимости от схемы заземления и не может превышать по Т-образной – 400 м, по Г-образной – до 200 м. Соответственно рассматривая любую межподстанционную зону между группами опор существует промежуток на котором отсутствует ТГЗ, длина данного промежутка не может быть меньше длины пролета между соседними опорами. На данном участке будет отсутствовать экранирующее действие ТГЗ. В случае отсутствия заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть такие промежутки также будут присутствовать, однако заземление ТГЗ будет происходить через арматурную сетку каждой из опор объединенных тросом.

ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом вышеизложенного представим методику расчета опасного напряжения в кабельной линии при магнитном влиянии, учитывающую экранирующее действие ТГЗ в зависимости от длины. Для этого составим схему замещения экранирующего действия ТГЗ для системы без заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть (Рис. 1).

Для системы опор заземленных на тяговую рельсовую сеть схема замещения представлена на Рис. 2.

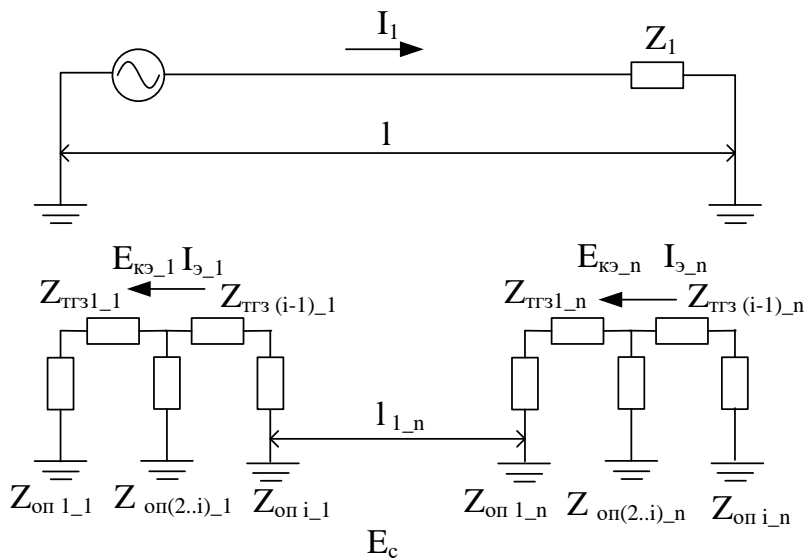
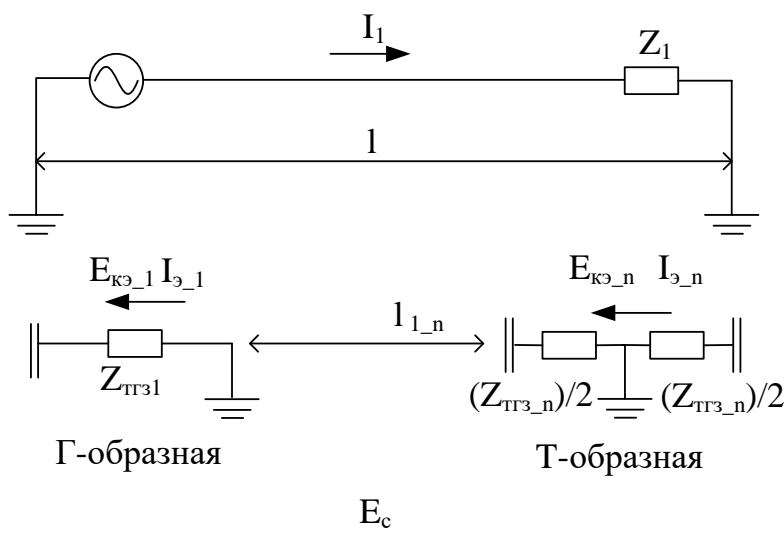


Рис. 1. Схема замещения экранирующего действия ТГЗ для системы без заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть:

- I_1 – ток в контактной сети, кА;
- l – расстояние межподстанционной зоны, км;
- Z_1 – полное сопротивление контактной сети, Ом;
- n – количество групп опор; $Z_{оп\ i_n}$ – полное сопротивление i -ой опоры в группе n , Ом;
- $Z_{тгз\ (i-1)_n}$ – полное сопротивление ТГЗ на участке между соседними опорами, Ом;
- $E_{кэ_n}$ – эдс на ТГЗ индуцируемая током контактной сети, В;
- l_{1_n} – расстояние между группами близлежащих опор, км.



Рису. 2. Схема замещения экранирующего действия ТГЗ для системы с заземлением опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть

Составим уточненную математическую модель для определения коэффициента экранирования ТГЗ.

Коэффициент экранирования равен отношению результирующей ЭДС в смежной линии к ЭДС, наведенной током контактной сети

$$S_T = \frac{\dot{E}_C}{\dot{E}_{CK}} = \frac{\dot{E}_{CT} + \dot{E}_{CK}}{\dot{E}_{CK}}, \quad (1)$$

где $\dot{E}_{CT} = j\omega M_{TC} \dot{I}_T l = z_{TC} \dot{I}_T l_T$ – ЭДС в смежной линии индуцируемая при прохождении тока в ТГЗ, В;

$\dot{E}_{CK} = -j\omega M_{KC} \dot{I}_K l = z_{KC} \dot{I}_K l_K$ – ЭДС в смежной линии индуцируемая при прохождении тока в контактной сети, В.

Уравнение равновесие будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} -z_{KT} \dot{I}_K l_T = z_T \dot{I}_T l_T \\ \dot{E}_C = -z_{KC} \dot{I}_K l_K - z_{TC} \dot{I}_T l_T' \end{cases} \quad (2)$$

где l_T, l_K – длина ТГЗ и контактной сети соответственно, м.

Определив из первого уравнения \dot{I}_T и подставив его значение во второе, получим:

$$\dot{E}_C = \frac{-z_{KC} z_T l_K + z_{TC} z_{KT} l_T}{z_T} \dot{I}_K \quad (3)$$

В то же время ЭДС смежной линии, наведенная током контактной сети

$$\dot{E}_{CK} = -z_{KC} l_K \dot{I}_K. \quad (4)$$

Подставим значения ЭДС из формул (3) и (4) в формулу (1) с учетом равенства полных сопротивлений взаимоиндукции между ТГЗ и контактной сетью

$$S_T = 1 - \frac{z_{KT}}{z_T} \beta. \quad (5)$$

где $\beta = \frac{l_T}{l_K}$ – коэффициент учитывающий пропорциональное отношение длины ТГЗ к длине контактной сети, м;

z_{KT} взаимное сопротивление между контактной сетью и ТГЗ, Ом;

$z_T = R_T + j\omega L_T$ полное сопротивление ТГЗ, Ом.

Уравнение 5 справедливо для коэффициента экранирующего действия ТГЗ вне зависимости от системы заземлений опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть. Отличие усовершенствованной математической модели от модели [1] заключается в том, что вводится коэффициент β , учитывающий пропорциональное отношение длины ТГЗ к длине контактной сети на рассматриваемом участке. В случае если длина ТГЗ равна длине контактной сети $\beta=1$.

Определить длину ТГЗ на рассматриваемом участке необходимо по формуле

$$l_{\text{т}} = \sum_{n=1}^n l_n. \quad (6)$$

где l_n длина n-ой группы опор, м.

Расчет сопротивления ТГЗ при различных системах заземления будет различаться. В случае использования системы с заземлением опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть (рисунок 2), сопротивление будет состоять из полного активного и индуктивного сопротивления ТГЗ. Основные факторы влияющие на сопротивление: длина и материал ТГЗ. В случае использования системы без заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть, основное отличие при нахождении сопротивления ТГЗ будет заключаться в том, что необходимо учитывать и сопротивление опор входящих в группу.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Научным коллективом совместно с сотрудниками Дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ) и Карасукской дистанцией электроснабжения (ЭЧ-14) в октябре 2015 г. выполнена экспериментальная оценка условий электробезопасности, электромагнитного влияния и дана оценка возможности использования арматуры для прохождения кратковременных токов промышленной частоты при замыканиях на группу опор 761–779, расположенную в районе 403-го км нечетного пути двухпутного участка тяговой подстанции (ТПС) Чебачий – посту секционирования (ПС) Зубково [4,5].

Рассмотрим зависимость опасного напряжения от проводимости земли в режиме КЗ на примере двухпутного участка Карасук-Зубково (Рис. 3).

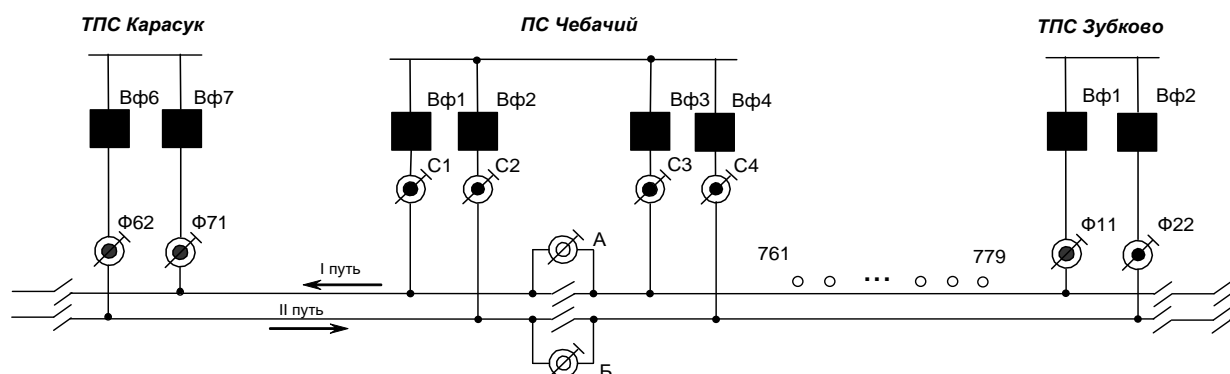


Рис. 3. Схема питания контактной сети участка Карасук – Зубково

Для дальнейших расчетов примем условия:

$$a_{\text{ск}} = 15 \text{ м}; a_{\text{кт}} = 4 \text{ м}; l_3 = 8,85 \text{ км}; \gamma_3 = 0,02; 0,01; 0,007; 0,005; 0,002 \text{ См/м};$$

$$s_p = 0,4 \div 0,55 S_0 = 0,125; \beta = 0,87; R_{\text{он}} = 200 \text{ Ом}; f = 50 \text{ Гц}.$$

Результаты расчетов сведены в Табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета опасного напряжения от проводимости земли в режиме КЗ

Удельное сопротивление земли ρ_z , Ом·м	Проводимость земли $\gamma_3 \cdot 10^{-3}$, См/м	Коэффициент экранирования рельсов S_p	Коэффициент экранирования ТГЗ S_T	Коэффициент экранирующего действия S	Опасное напряжение U_m , В
					При $I_{\text{кз}}$, кА
					2,8
1	2	3	4	5	6
Традиционная система заземления					
50	20	0,46	0,62	0,036	218
100	10	0,45	0,59	0,033	222
150	7	0,43	0,57	0,031	217
200	5	0,42	0,56	0,030	215
500	2	0,41	0,53	0,027	213
Система при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть					
50	20	0,46	0,55	0,032	194
100	10	0,45	0,52	0,029	195
150	7	0,43	0,50	0,027	189
200	5	0,42	0,49	0,026	186
500	2	0,41	0,45	0,023	181

На Рис. 4 приведены графики зависимости наведенного напряжения от проводимости земли для традиционной системы заземления и системы при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть.

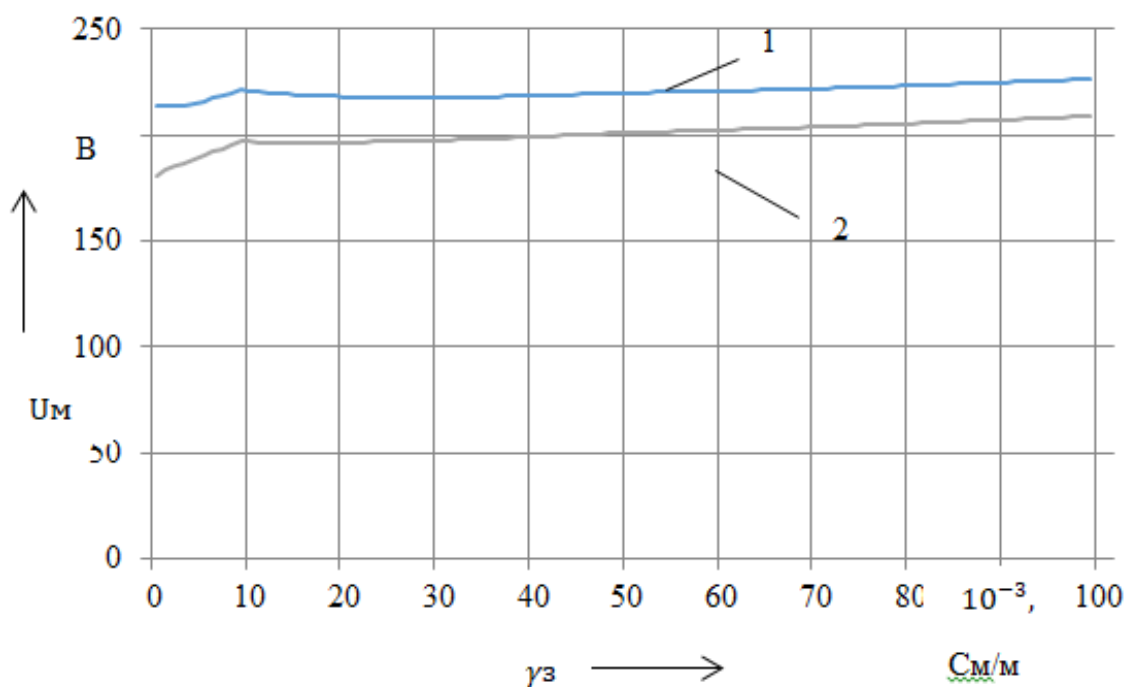


Рис. 4. Зависимость опасного напряжения от проводимости земли в режиме КЗ:

- 1 – традиционная система заземления;
- 2 – система при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть.

Для полной оценки опасных напряжений при магнитном влиянии, необходимо выполнить расчет вынужденного режима, который связан с определенными трудностями. Они обусловлены тем, что на отдельных участках тяговой сети протекают различные токи, меняющиеся по величине и во времени. При этом ток, потребляемый электровозом, зависит от массы поезда, профиля пути, поэтому вычисление опасных напряжений в вынужденном режиме работы тяговой сети сложно и громоздко.

В целях упрощения поставленной задачи действительный ток, протекающий по отдельным участкам тяговой сети, заменяется эквивалентным влияющим током. Под эквивалентным влияющим током понимается одинаковый по всей длине сближения ток, который вызывает такое же опасное напряжение, что и действительный тяговый ток.

Для вынужденного режима в тяговой сети опасные напряжения рекомендуется определять в соответствии с [6] по нижеприведенным формулам.

Для участка кабеля менее 40 км при параллельном сближении, В:

$$U_m = k_\varphi \omega M_{(1-2)} I_{\text{ЭКВ}} I_\varphi S \quad (7)$$

где k_ϕ - коэффициент формы кривой влияющего тока тяговой сети, характеризующий увеличение индуктированного напряжения вследствие его несинусоидальности (при расчете влияний на кабельные жилы $k_\phi = 1$);

$I_{\text{ЭКВ}}$ - эквивалентный влияющий ток при вынужденном режиме работы тяговой сети, А.

Для дальнейших расчетов примем условия:

$$I_{\text{ЭКВ}} = 300 \text{ А}; a_{\text{СК}} = 15 \text{ м}; l_{\text{Э}} = 8,85 \text{ км};$$

$$\gamma_{\text{З}} = 0,02; 0,01; 0,007; 0,005; 0,002 \text{ См/м};$$

$$s_p = 0,4 \div 0,55 \quad S_0 = 0,125; \beta = 0,87; R_{\text{он}} = 20 \text{ Ом}; f = 50 \text{ Гц}.$$

Результаты расчетов зависимости опасного напряжения от проводимости земли в вынужденном режиме для традиционной системы заземления и системы при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть сведены в Табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета зависимости опасного напряжения от проводимости земли в вынужденном режиме

Удельное сопротивление земли $\rho_{\text{З}}$, Ом·м	Проводимость земли $\gamma_{\text{З}} \cdot 10^{-3}$, См/м	Коэффициент экранирования рельсов S_p	Коэффициент экранирования ТГЗ S_T	Коэффициент экранирующего действия S	Опасное напряжение U_m , В
Традиционная система заземления					
50	20	0,46	0,62	0,036	23,41
100	10	0,45	0,59	0,033	23,59
150	7	0,43	0,57	0,031	23,16
200	5	0,42	0,56	0,030	22,95
500	2	0,41	0,53	0,027	22,96
Система при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть					
50	20	0,46	0,55	0,032	21,07
100	10	0,45	0,52	0,029	20,94
150	7	0,43	0,50	0,027	20,36
200	5	0,42	0,49	0,026	20,04
500	2	0,41	0,45	0,023	19,39

Результаты расчетов зависимости опасного напряжения от проводимости земли в вынужденном режиме не выходят за пределы допустимых (Табл. 3).

Таблица 3. Допустимые значения опасных напряжений по отношению к земле в проводах линий связи и проводного вещания

Вид линии связи	Допустимые значения напряжения, В	
	Вынужденный режим	Режим короткого замыкания
Воздушная с деревянными опорами, в том числе с железобетонными приставками	60	2000 при $t_0 < 0,15$; 1500 при $t_0 < 0,3$; 1000 при $t_0 < 0,6$;
Воздушная с железобетонными и металлическими опорами и кабельная магистральной и проводной связи, проводного вещания и местной связи	36	320 при $t_0 < 0,15$; 240 при $t_0 < 0,3$; 160 при $t_0 < 0,6$;

Здесь t_0 - время отключения тяговой сети при коротком замыкании, с.

ВЫВОДЫ

Проанализировав полученные данные можно сделать следующие выводы:

- опасное напряжение при традиционной системе заземления выше, чем при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть (в среднем на 13 %);
- с увеличением удельной проводимости земли опасное напряжение имеет нелинейный характер изменения в сторону увеличения (при наличии ТГЗ);
- с увеличением тока КЗ опасное напряжение увеличивается;
- на значение опасного напряжения существенным образом влияет длина сближения влияющей и подверженной влиянию линии $I_э$, а также коэффициент экранирования ТГЗ, который в свою очередь зависит от коэффициента β ;
- опасное напряжение не превышает допустимое значение напряжения;
- усовершенствованная методика определения опасного напряжения в смежных линиях связи при магнитном влиянии тяговой сети переменного тока позволяет не только выполнить расчеты для системы без заземления опор, но и отказаться от допущений, которые не позволяли дать объективную картину магнитного влияния на смежные линии при наличии ТГЗ.

Библиографический список / References

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с. [Bader MP. *Elektromagnitnaya sovместimost'*. Moscow; 2002. 638 p. (In Russ.)].

2. Косарев А.Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. – М.: Интекст, 2004. – 272 с. [Kosarev AB. *Osnovy teorii elektromagnitnoj sovmestimosti sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka*. Moscow: Intekst; 2004. 272 p. (In Russ.)].
3. ЦЭ-191. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. – М.: МПС РФ, 1993. – 69 с. [CE-191. *Instrukciya po zazemleniyu ustrojstv elektrosnabzheniya na elektrificirovannyh zheleznih dorogah*. Moscow: Ministry of Railways of Russia, 1993. 69 p. (In Russ.)].
4. Квашук В.А., Кондратьев Ю.В., Кремлев И.А., Терехин И.А. Методика проведения экспериментальных испытаний условий электробезопасности на участке тяговой сети переменного тока, эксплуатируемом без заземления опор контактной сети на рельс // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 2(109). – С. 68–73. [Kvashchuk VA, Kondrat'ev YuV, Kremlev IA, Teryohin IA. The Methodology of Electrical Safety Pilot Testing on the Site of an ac Electrical Traction Network Operated with Ungrounded Catenary Supports. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;2(109):68-73 (In Russ.)]. Доступно по: [file:///C:/Users/user/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/article_09_0%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/user/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/article_09_0%20(1).pdf) Ссылка активна на 02.03.2020.
5. Кузнецов А.А., Кремлев И.А., Терехин И.А. Планирование эксперимента по оценке электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока на смежные линии связи в аварийных режимах // Электроснабжение железных дорог: Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск: ОМГУПС, 2016. – С. 18–21. [Kuznecov AA, Kremlev IA, Teryohin IA. Planirovanie eksperimenta po ocenke elektromagnitnogo vliyaniya tyagovoj seti peremennogo toka na smezhnye linii svyazi v avarijnyh rezhimah. *Elektrosnabzhenie zheleznih dorog: Mezhvuzovskij tematicheskij sbornik nauchnyh trudov*. Omsk: OMGUPS, 2016. pp. 18-21. (In Russ.)].
6. Шалимов М.Г. Мешающие влияния электрифицированных железных дорог на смежные устройства: учебное пособие. – Омск: Омская гос. акад. путей сообщения, 1996. – 107 с. [Shalimov MG. *Meshayushchie vliyaniya elektrificirovannyh zheleznih dorog na smezhnye ustrojstva: uchebnoe posobie*. Omsk: Omskaya gos. akad. putej soobshcheniya, 1996. 107 p. (In Russ.)].

Сведения об авторах:**Терехин Илья Александрович, к.т.н.;**

адрес: 190031 г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9;

eLibrary SPIN: 6947-0053; ORCID: 0000-0002-9873-4795;

E-mail: terekhin_ilya@mail.ru

Кремлев Иван Александрович, к.т.н., доцент;

eLibrary SPIN: 5756-7320; ORCID: 0000-0001-6722-6037;

E-mail: ivkreml@mail.ru

Тарабин Игорь Валерьевич, к.т.н., доцент;

eLibrary SPIN: 4248-7230; ORCID: 0000-0001-8956-4598;

E-mail: igor_tarabin@mail.ru

Абишов Ербол Гайдарович, инженер;

ORCID: 0000-0003-1746-7929;

E-mail: abishov@pgups.ru

Information about the authors:

Ilya A. Terekhin, Candidate of Technical Science;
address: 190031 St. Petersburg, Moskovsky pr., 9;
eLibrary SPIN: 6947-0053; ORCID: 0000-0002-9873-4795;
E-mail: terekhin_ilya@mail.ru

Ivan A. Kremlev, Candidate of Technical Science, docent;
eLibrary SPIN: 5756-7320; ORCID: 0000-0001-6722-6037;
E-mail: ivkreml@mail.ru

Igor V. Tarabin, Candidate of Technical Science, docent;
eLibrary SPIN: 4248-7230; ORCID: 0000-0001-8956-4598;
E-mail: igor_tarabin@mail.ru

Erbol G. Abishov, engineer;
ORCID: 0000-0003-1746-7929;
E-mail: abishov@pgups.ru

Цитировать:

Терёхин И.А., Кремлев И.А., Тарабин И.В., Абишов Е.Г. Совершенствование методики определения опасного напряжения в смежных линиях связи при магнитном влиянии тяговой сети переменного тока // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 92–103. doi: 10.17816/transsyst20206192-103

To cite this article:

Terekhin IA, Kremlev IA, Tarabin IV, Abishov EG. Tax Improvement of the Method of Determining Dangerous Voltage in Adjacent Lines of Communication Under Magnetic Influence of a Tracing AC System. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):92-103. doi: 10.17816/transsyst20206192-103

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 625.03

DOI 10.17816/transsyst202061104-119

© П. С. Троицкий

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

АЛГОРИТМ ПОДБОРА МОТОРНЫХ И ПРИЦЕПНЫХ ВАГОНОВ В ГРУЗОВОМ ПОЕЗДЕ МОТОРВАГОННОЙ ТЯГИ ПО КРИТЕРИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Введение: Повышение эффективности грузовых перевозок является одной из основных задач, стоящих перед железными дорогами мира. Одним из наиболее эффективных решений является внедрения распределенной моторвагонной грузовой тяги. Это позволит существенно повысить эксплуатационный КПД энергетической установки поезда, улучшить его управляемость, снизить величину разрушающего воздействия на путь, увеличить пропускную способности железнодорожных линий и надежность доставок скоропортящихся грузов.

При рассмотрении алгоритма распределения работающих тяговых электродвигателей (ТЭД) по составу моторвагонного грузового электропоезда с учетом условий выравнивания ресурса всех ТЭД моторных вагонов электропоезда делается вывод о возможности повышения энергоэффективности многодвигательного тягового привода модульного грузового электропоезда при использовании предлагаемых алгоритмов управления энергоэффективностью.

Цель: формализация задачи подбора моторных и прицепных вагонов в модульном грузовом электропоезде.

Методы: В статье описан алгоритм подбора моторных и прицепных вагонов в грузовом поезде моторвагонной тяги по критерию энергетической эффективности, преимущества внедрения модульных грузовых электропоездов, указаны основные предпосылки для внедрения распределённой моторвагонной грузовой тяги. Работа основана на теории тяговых расчетов для поездной работы и направлены обеспечение безопасного и энергоэффективного движения по участкам следования.

Результаты: Разработан алгоритм подбора моторных и прицепных вагонов в модульном грузовом электропоезде, основанный на условии обеспечения тяговых и сцепных свойств поезда на расчетных подъемах, освоения всего объема груза, предъявленного к перевозке и энергетической эффективности данного вида тяги.

При использовании предлагаемых алгоритмов управления энергоэффективностью моторвагонного электропоезда (МГЭП) путем подбора моторных и прицепных вагонов, регулирования мощности, числа тяговых двигателей и их распределения по составу МГЭП энергопотребление на участке Медвежья Гора – Новый Поселок может быть снижено на 20,5 % в направлении туда и на 18,9 % в направлении обратно без изменения графика движения. А при сравнении с поездом локомотивной тяги, регулирующим энергопотребление с помощью того же алгоритма на 4,49 % и 3,61 % соответственно. Энергопотребление на участке Кривенковская –

Гойтх может быть снижено на 16 % в направлении туда и на 82 % в направлении обратно без изменения графика движения. А при сравнении с поездом локомотивной тяги, регулирующим энергопотребление по тому же алгоритму на 1,61 % и 65,92 % соответственно.

Заключение: Автором предложен алгоритм подбора моторных и прицепных вагонов в грузовом поезде моторвагонной тяги по критерию энергетической эффективности с условием обеспечения тяговых и сцепных свойств на расчетных подъемах. А также алгоритм распределения работающих тяговых двигателей по составу МГЭП с учетом обеспечения требования выравнивания ресурса их работы, недопущения перегрева и переохлаждения ТЭД, повышения управляемости поездом.

Ключевые слова: железная дорога, моторвагонные грузовые электропоезда, тяговые расчёты, ускоренные грузовые перевозки, энергетическая эффективность, распределённая тяга.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrical Engineering

© **Pavel S. Troitskiy**

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

ALGORITHM FOR SELECTING MOTOR AND TRAILER CARS IN A FREIGHT TRAIN OF MOTOR-CAR TRACTION ACCORDING TO THE ENERGY EFFICIENCY CRITERION

Background: improving the efficiency of freight transport is one of the main challenges facing the world's Railways. One of the most effective solutions is the introduction of distributed motor-car cargo traction. This will significantly increase the operational efficiency of the train's power plant, improve its handling, reduce the amount of destructive impact on the track, increase the capacity of railway lines and the reliability of deliveries of perishable goods.

When considering the allocation algorithm for operating the traction motors (TED) on the composition of a diesel freight trains subject to the conditions of alignment resource all TED motor coaches concluded the possibility of increasing the efficiency of multimotor traction drive modular freight trains using the proposed control algorithms for energy efficiency.

Aim: formalization of the task of selecting motor and trailer cars in a modular electric freight train.

Methods: In article the algorithm of selection of motor and trailer cars on a freight train railcar traction on the criterion of energy efficiency, the benefits of adopting a modular truck trains, are the main prerequisites for the implementation of distributed railcar truck pull. The work is based on the theory of traction calculations for train operation and is aimed at ensuring safe and energy-efficient traffic along the route sections.

Results: The developed algorithm of selection of motor and trailer cars in a unit train freight based on the condition of ensuring the traction and coupling properties of the train on the current upgrades, the development of the total volume of cargo offered for transport and energy efficiency of this type of traction.

When using the proposed algorithms for managing the energy efficiency of a motor-car electric train by selecting motor and trailer cars, adjusting the power, number of traction engines and their distribution by the composition of the train, energy consumption on the Medvezhya Gora – Noviy Poselok section can be reduced by 20.5 % in the direction there and by 18.9 % in the direction back without changing the traffic schedule. And when compared with a locomotive-hauled train that regulates energy consumption using the same algorithm by 4.49 % and 3.61 %, respectively. Energy consumption on the Krivenkovskaya – Goitkh section can be reduced by 16 % in the direction there and by 82 % in the direction back without changing the traffic schedule. And when compared with a locomotive-hauled train that regulates energy consumption by the same algorithm by 1.61 % and 65.92 %, respectively.

Conclusions: The author proposes an algorithm for selecting motor and trailer cars in a freight train of motor-car traction according to the criterion of energy efficiency with the condition of ensuring traction and coupling properties on the calculated lifts. As well as the algorithm of distribution of working traction engines by the composition of the freight trains, taking into account the requirement of equalizing the resource of their work, preventing overheating and hypothermia of the fuel and energy system, and improving train handling.

Keywords: railway, motor-car electric freight trains, traction calculations, accelerated freight transportation, energy efficiency, distributed traction.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире железнодорожный транспорт должен выступать в качестве лидера и стимулятора инновационного экономического развития на основе повышения интенсификации и производительности своей деятельности.

С учетом технико-технологических особенностей конкуренции на транспорте, оптимизация скоростных параметров доставки товаров является важнейшим резервом повышения межвидовой конкурентоспособности ж/д транспорта на транспортном рынке. На транспорте измеряется огромный диапазон скоростей – от конструкционных, до фактически реализуемых от места отправления до места назначения. Скорость доставки товаров по железным дорогам на порядок ниже конструкционной скорости, на которую рассчитаны инфраструктура и подвижной состав и в 4-5 раз ниже ходовых скоростей движения поездов. Одной из задач улучшения эффективности работы транспорта является гармонизация скоростей, важнейшим инструментом которой должно быть их повышение, допускаемое конструктивными параметрами подвижного состава, а также сокращение времени на разгон и торможение, повышение равномерности скоростей между различными типами поездов (в частности пассажирскими и грузовыми). Решением этой задачи может служить внедрение моторвагонных грузовых электропоездов распределенной тяги с целью приближения ходовых скоростей к допустимой скорости по состоянию инфраструктуры.

АНАЛИЗ

В работе [1] отмечено, что повышение производительности транспортного пространства и оптимизация конструкции поезда являются ключевыми факторами роста эффективности жд отрасли. С точки зрения «пространственного потенциала поезда» под которым авторы понимают пространство движения поездов, выделяемое для одной интегрированной ресурсной единицы жд транспорта, формируемой из отдельных единиц подвижного состава, моторвагонные грузовые электропоезда показывают наибольшую эффективность, поскольку требуют минимальный, сравнимый с пассажирскими интервал попутного следования, меньшее по сравнению с поездами локомотивной тяги время на разгон и торможение, а также возможность конструирования поезда в зависимости от массы груза предъявленного к перевозке, профиля участка следования, моторной обеспеченности вагонов с изменяемыми тяговыми и тормозными характеристиками. Отсюда следует колоссальный масштаб возможностей для внедрения поездов данного типа, особенно для перевозки скоропортящихся, контейнеризируемых грузов, грузов с повышенной добавленной стоимостью.

С 2003 года в Японии велись испытания нерасцепляемого грузового электропоезда, задуманного как альтернатива автомобильному транспорту для перевозки ценных грузовых отправок. Новый поезд состоял из 16 вагонов-платформ: по два вагона с тяговым приводом в голове и в хвосте поезда, и 12 прицепных вагонов-платформ типа T260/261. Каждый тяговый вагон рассчитан на установку одного контейнера, а каждый прицепной вагон-платформа двух. Контейнеры на тяговых вагонах устанавливаются между двумя машинными модулями. Масса полностью загруженного поезда составляет 730 т, максимальная скорость 130 км/ч, номинальная мощность поезда 3250 кВт. Благодаря распределению тягового усилия разработчикам удалось существенно снизить нагрузку на ось в сравнении с традиционным локомотивом равной мощности [2]. Удельная мощность 4,45 кВт/т. Имея предельную вместимость 28 контейнеров данный поезд дает возможность отменить 56 рейсов 10-тонных грузовых автомобилей, что в годовом выражении позволяет сократить выбросы углекислого газа в атмосферу на 14 тыс. т [3].

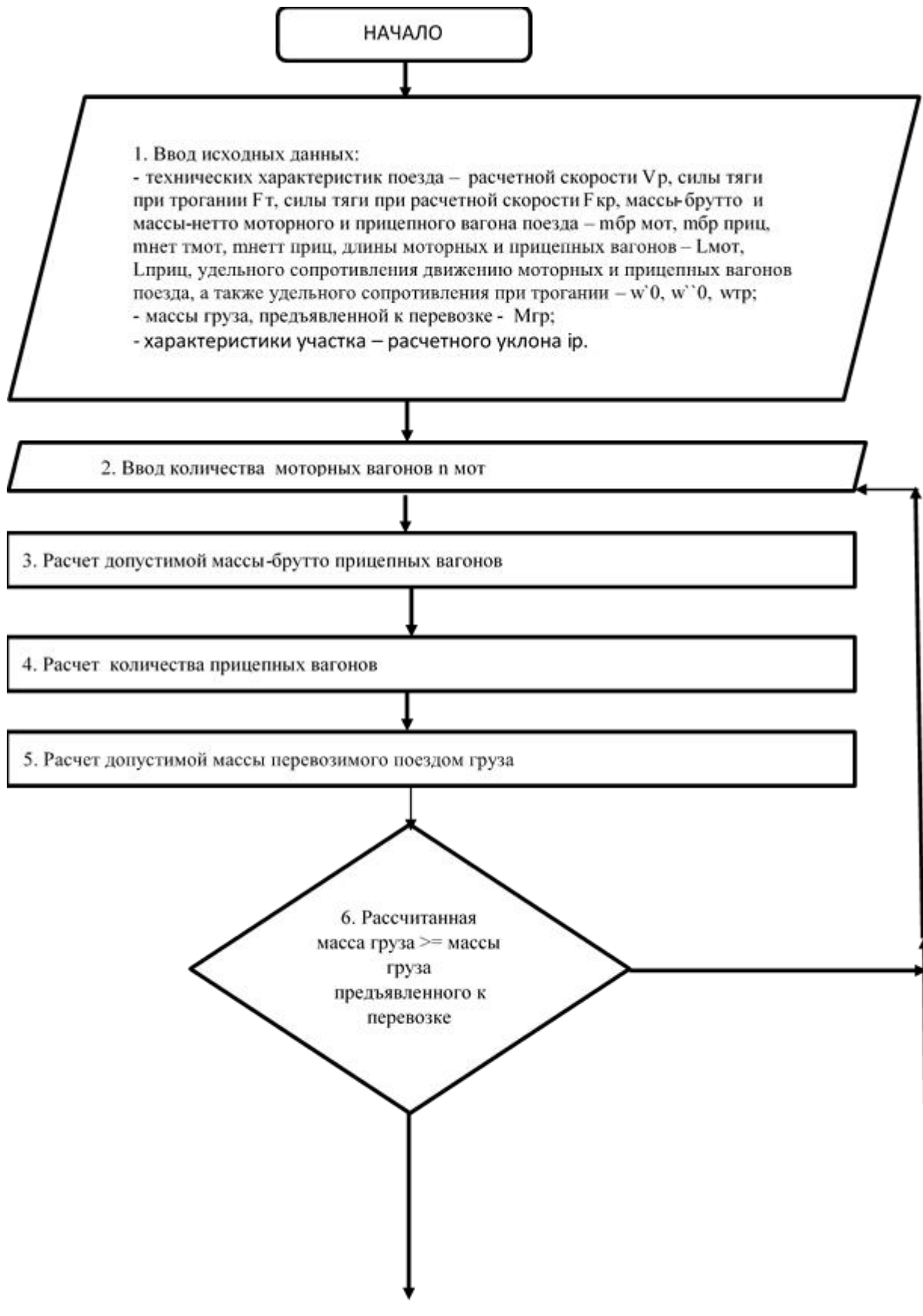
В Австралии в сентябре 2003 года в регулярную эксплуатацию поступил опытный образец грузового моторвагонного поезда CargoSprinter для челночных контейнерных перевозок в порту Мельбурна. По данным оператора поезда, данный подвижной состав будет играть важную роль в достижении цели правительства Австралии – переводу 30 % портового трафика на железную дорогу в течение 10 лет. Поезд рассчитан на брутто-нагрузку в 600 тонн, но компания-оператор

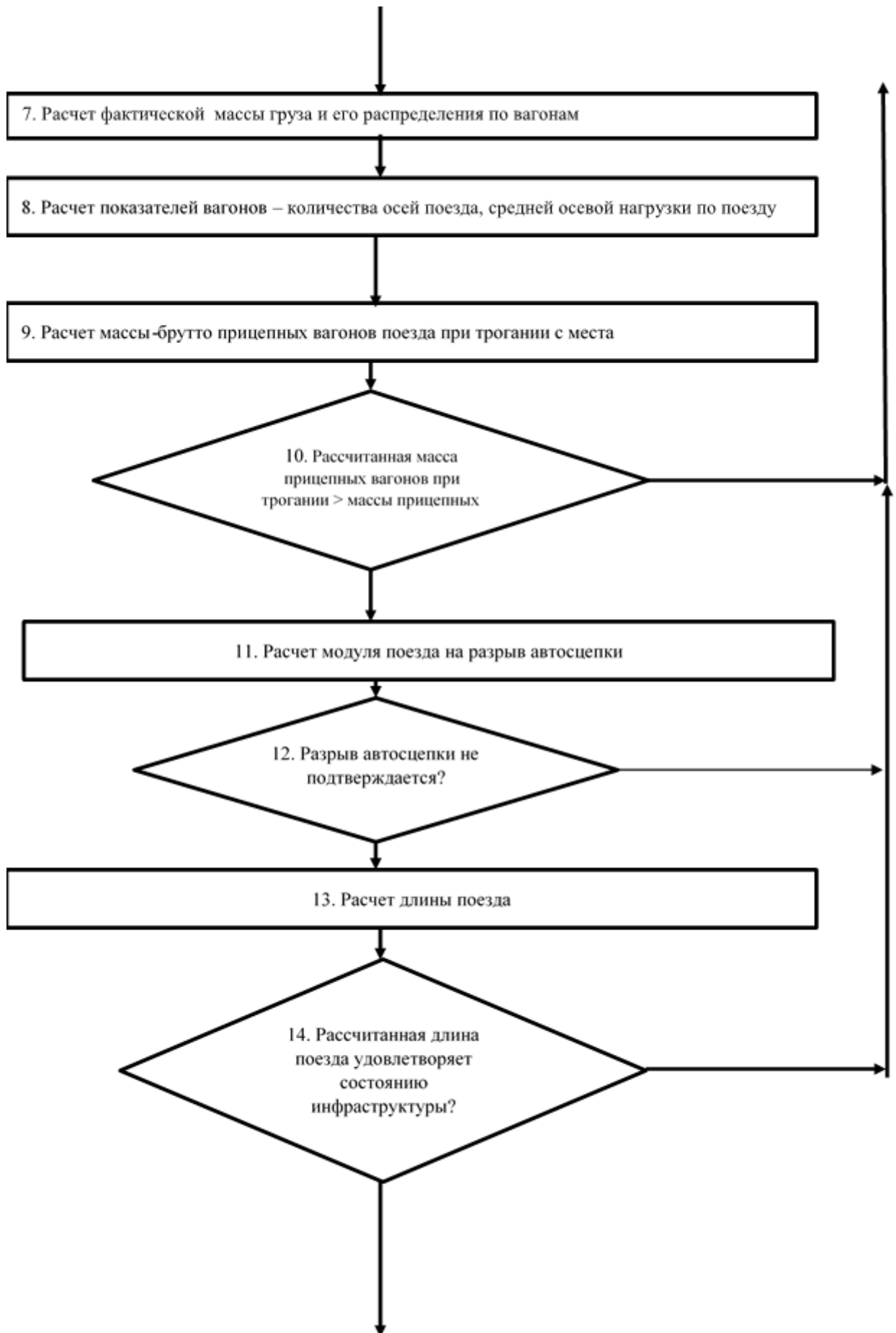
планировала добавить еще две платформы, увеличив загрузку на два-четыре TEU – в общей сумме до 750 тонн [4].

29 октября 2018 г. компания Mercitalia Logistic представила новый 12-вагонный электропоезд ETR 500 для выполнения перевозок грузов в ночное время между Неаполем и Болоньей, используя высокоскоростную магистраль. Данный поезд был построен путем модернизации пассажирского состава и предназначен для перевозки контейнеров размерами 70x80x180 см. Поезд проходит маршрут протяженностью 550 км за 3 ч 30 мин со скоростью до 180 км/ч. Вместимость одного грузового поезда ETR 500 эквивалентна вместимости 18 автопоездов с прицепами или суммарно вместимости 9000 автопоездов в год. Использование подобного поезда позволит снизить на 80 % выбросы углекислых газов в атмосферу по сравнению с автомобильным транспортом [5]. Таким образом, внедрение проектов подвижного состава данного типа за рубежом происходило в местностях со значительными грузопотоками и высокой плотностью населения и направлено на снижение нагрузки на автодорожную инфраструктуру, а также улучшение экологической обстановки.

Нами был разработан алгоритм подбора моторных и прицепных вагонов в грузовом поезде моторвагонной тяги по критерию энергетической эффективности с условием обеспечения тяговых и сцепных свойств на расчетных подъемах. Подбор количества моторных и прицепных вагонов должен осуществляться исходя из массы груза предъявленного к перевозке и необходимой для его перевозки тяговой мощности. Таким образом необходимо исходить из суммарной мощности, требуемой для перевозки всего размера груза, а не из расчета тяговой мощности одного тягового модуля, под которым понимается один моторный вагон и допустимое количество прицепных к нему в составе моторвагонного поезда в соответствии с тяговыми расчетами. Для обеспечения наилучшего сцепления колеса с рельсом следует заполнять грузом в первую очередь моторные вагоны на всю допускаемую грузоподъемность, а следом прицепные.

Расчет количества моторных вагонов производится итерационно, путем подбора их количества до полной загрузки предъявленного к перевозке груза с учетом тяговых и тормозных свойств поезда (Рис. 1).





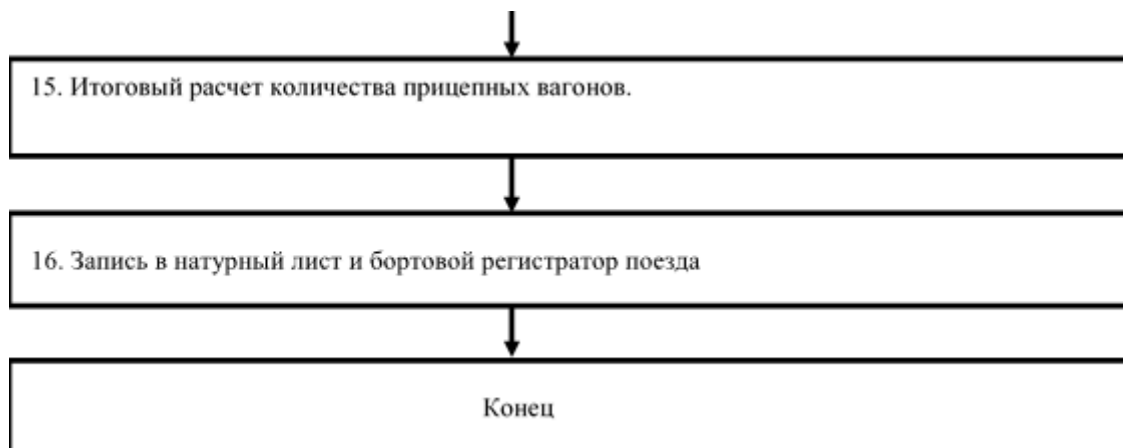


Рис. 1. Алгоритм подбора моторных и прицепных вагонов модульного грузового электропоезда

В блоках 1 и 2 блока алгоритма происходит ввод исходных данных для расчета, а также ориентировочное количество моторных вагонов. В блоке 3 алгоритма производится расчет допустимой массы-брутто прицепных вагонов в соответствии с [6]. В блоке 4 происходит расчет количества прицепных вагонов путем деления допустимой массы прицепных вагонов на допустимую массу-брутто 1 вагона. В блоке 5 производится расчет допустимой массы перевозимого поездом груза путем расчета суммы произведений допустимой грузоподъемности моторного и прицепного вагона на количество на их соответствующее количество. При этом согласно [6] происходит округление с точностью до 50 т. В блоке 6 производится проверка соответствия допустимой массы рассчитанного груза из блока 5 и груза предъявленного к перевозке. Если показатель признается удовлетворительным, то происходит переход в блок 7, иначе - изменение количества моторных вагонов. В блоке 7 производится распределение предъявленной массы груза по прицепным вагонам исходя из остатка груза после полной загрузки моторных вагонов. При этом вероятна ситуация, когда остатка груза для заполнения максимальной грузоподъемности прицепных вагонов будет недостаточно. В этом случае, остаток груза стоит распределять равномерно по всем прицепным вагонам. В блоках 8 и 9 происходит расчет показателей вагонов – количества осей поезда, средней осевой нагрузки по поезду, а также расчет массы-брутто прицепных вагонов поезда при трогании с места на расчетном подъеме в соответствии с [6]. В блоке 10 производится проверка: рассчитанная в блоке 9 масса прицепных вагонов при трогании с места должна быть больше массы брутто-поезда. Если показатель признается удовлетворительным, то происходит переход на блок 11, иначе – изменение количества моторных вагонов (блок 2). В блоке 11 производится проверка тягового модуля поезда на разрыв автосцепки

исходя из силы тяги при трогании тягового модуля. В блоке 12 производится проверка на разрыв автосцепки в соответствии с условиями в [6]. Если проверка подтверждается, то происходит переход в блок 13, иначе изменение количества моторных вагонов (блок 2). В блоках 13 и 14 производится расчет длины поезда и проверки на возможность пропуска его по существующей инфраструктуре в соответствии с [6]. В случае удовлетворения данному условию, происходит переход в блок 15, иначе – возврат к вводу количества моторных вагонов (блок 2). В блоке 15 производится расчет количества прицепных вагонов в 1 модуле путем деления количества прицепных вагонов на количество моторных. Также рассчитывается масса тары поезда, как сумма произведений масс-нетто прицепных и моторных вагонов на их количество, вычисление коэффициента тары поезда, как отношение массы тары моторных и прицепных вагонов поезда к массе-брутто поезда. В блоке 16 происходит запись рассчитанных данных в натурный лист поезда и систему управления тягой и торможением.

При работе локомотива в зоне частичных нагрузок его эффективность значительно снижается. Выходом из данной ситуации является настройка локомотива на наиболее типичный режим работы. Однако разнообразие условий работы не позволяет создать универсальный локомотив, удовлетворяющий всем условиям [7]. Наиболее оптимальным в таких случаях может являться многодвигательный транспортный модуль, позволяющий регулировать мощность в зависимости от изменения профиля пути и массы перевозимого груза. Проблема недоиспользования доступной мощности локомотивов и моторвагонного подвижного состава при легком профиле пути и небольшой скорости движения для неполновесных и порожних составов неоднократно поднималась, поскольку многие участки железных дорог характерны неравномерностью грузопотоков в четном и нечетном направлениях [8]. Идея отключения части тяговых двигателей нашла свое воплощение в системе оптимального регулирования мощности многосекционных локомотивов [9].

Как отмечено в [10], экспериментальные данные показывают, что поосное регулирование трехсекционного электровоза ВЛ80С и регулирование мотор-вентиляторов обеспечивает снижение энергозатрат: при вождении угольных маршрутов массой 6000 т на отдельных перегонах до 7 %, а в целом на тяговом плече Экибастуз – Целиноград около 1,5 %–2,5 %. При вождении порожних составов 1300–1600 т по участку около 7–8 %. Однако электровозы перед объединением в сцеп требуют специального подбора по схемам цепей управления, параметрам электрических машин, диаметрам бандажей колесных пар. Учитывая большую трудоёмкость этой операции, локомотивы после их объединения

в сцепы в период эксплуатации не разъединяют, что приводит к неэффективному использованию парка, перепробегам [9].

Блок-схема алгоритма управления энергетической эффективностью представлена в [8]. Мы же сформируем модуль распределения работающих тяговых электродвигателей (ТЭД) по составу моторвагонного грузового электропоезда. Такое распределение должно производиться с учетом условий обеспечения выравнивания ресурса всех ТЭД моторных вагонов электропоезда, недопущения перегрева и переохлаждения ТЭД, недопущения срыва колесных пар в буксование при возрастании нагрузки на возвращаемые в режим тяги ТЭД, недопущении возникновения продольно-динамических нагрузок за счет плавного изменения мощности ТЭД при их переключении.

Преимущество разработанного алгоритма по сравнению с поитерационной последовательной загрузкой двигателей моторных вагонов от головного к хвостовому в том, что обеспечивается равномерное распределение тяги по составу, лучшая управляемость поездом и равномерный износ ТЭД.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии с [8] и вышеописанным алгоритмом распределения работающих ТЭД нами были произведены энергетические расчеты на участках с горным профилем пути Медвежья Гора – Новый Поселок Октябрьской железной дороги, а также Кривенковская – Гойтх Северо-Кавказской железной дороги. На первом участке в расчетах участвовал трехсекционный электровоз переменного тока ЗЭС5К и моторвагонный грузовой электропоезд (МГЭП) распределенной тяги, тяговые и тормозные характеристики моторных вагонов которого приняты по аналогии с характеристиками электропоезда ЭС1 «Ласточка». На втором участке в расчетах участвовал трехсекционный электровоз постоянного тока ЗЭС4К и МГЭП. Массо-габаритные параметры прицепных вагонов МГЭП приняты аналогично параметрам фитинговой платформы модели 23-469-07. Масса перевозимого груза обеими поездами на участке Медвежья Гора – Новый Поселок одинакова и составляет 3800 т. На участке Кривенковская – Гойтх – 2350 т. Руководящий подъем на участке Медвежья Гора – Новый Поселок 12,5. Алгоритм показан на Рис. 2, результаты расчетов сведены в Табл. 1–6.

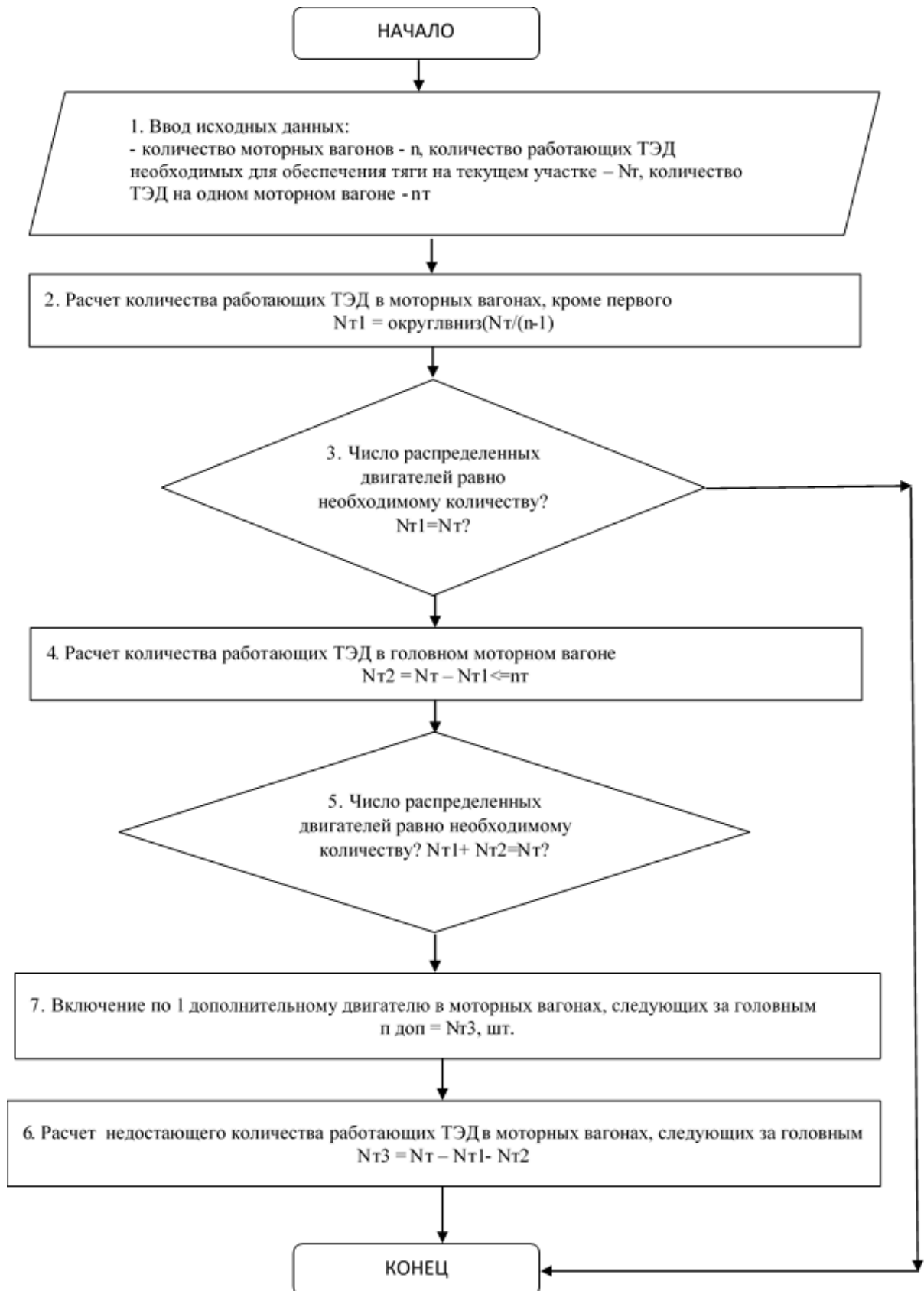


Рис. 2. Алгоритм распределения работающих тяговых электродвигателей (ТЭД) по составу моторвагонного грузового электропоезда

Таблица 1. Результаты расчетов Медвежья Гора – Новый Поселок

Наименование	ЗЭС5К		МГЭП	
	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД
Общ расход на тягу, кВт*ч	3 585,36	3 988,65	3 424,48	4 224,37
Расход на собств нужды, кВт*ч	35,85	39,89	34,24	42,24
Общий расход, кВт*ч	3 621,21	4 028,53	3 458,73	4 266,62
Экономия между вариантами 1 вида тяги, кВт*ч	407,32		807,89	
Удельный расход, Вт*ч/ткм	16,77	18,65	16,02	19,76

Таблица 2. Результаты расчетов Новый Поселок – Медвежья Гора

Наименование	ЗЭС5К		МГЭП	
	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД
Общ расход на тягу, кВт*ч	3 392,13	3 915,50	3 269,84	4 116,55
Расход на собств нужды, кВт*ч	33,92	39,15	32,70	41,17
Общий расход, кВт*ч	3 426,05	3 954,65	3 302,54	4 157,71
Экономия между вариантами 1 вида тяги, кВт*ч	528,60		855,18	
Удельный расход, Вт*ч/ткм	15,86	18,31	15,29	19,25

Таблица 3. Сравнение энергетических расчетов двух видов тяги

Наименование	М.Гора - Н.Поселок		Н.Поселок - М.Гора	
	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД
Экономия между МГЭП и ЗЭС5К, кВт*ч	162,49	-238,08	123,51	-203,06
Экономия между 2 видами тяги, %	-4,49 %	5,91%	-3,61 %	5,13 %

Таблица 4. Результаты расчетов на участке Кривенковская – Гойтх

Наименование	ЗЭС4К		МГЭП	
	При регулировании и отключений ТЭД	При не отключении ТЭД	При регулировании и отключений ТЭД	При не отключении ТЭД
Общ расход на тягу, кВт*ч	1 754,83	2 189,72	1 844,39	2 196,67
Расход на собств нужды, кВт*ч	17,55	21,90	18,44	21,97
Общий расход, кВт*ч	1 772,38	2 211,62	1 862,84	2 218,64
Экономия между вариантами 1 вида тяги, кВт*ч	439,24		355,80	
Удельный расход, Вт*ч/ткм	56,34	70,30	55,43	66,02

Таблица 5. Результаты расчетов на участке Гойтх – Кривенковская

Наименование	ЗЭС4К		МГЭП	
	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД
Общ расход на тягу, кВт*ч	12,60	21,75	4,59	25,66
Расход на собств нужды, кВт*ч	0,13	0,22	0,05	0,26
Общий расход, кВт*ч	12,73	21,97	4,63	25,91
Наименование	ЗЭС4К		МГЭП	
	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД
Экономия между вариантами 1 вида тяги, кВт*ч	9,24		21,28	
Удельный расход, Вт*ч/ткм	0,40	0,70	0,14	0,77

Таблица 6. Сравнение энергетических расчетов двух видов тяги.

Наименование	Кривенковская - Гойтх		Гойтх - Кривенковская	
	При регулировании отключений ТЭД	При не отключении ТЭД	При регулировании и отключений ТЭД	При не отключении ТЭД
Экономия между МГЭП и ЗЭС4К, кВт*ч	-90,46	-7,02	8,09	-3,95
Экономия между 2 видами тяги, %	-1,61 %	-6,09 %	-65,92 %	10,43 %

Как видно из результатов расчетов наибольший эффект при регулировании мощности ТЭД в зависимости от профиля пути и массы поезда появляется у модульного грузового электропоезда, поскольку мощность каждого ТЭД МГЭП меньше и регулирование требуемой мощности происходит более маневренно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании литературных источников сделан вывод о возможности повышения энергоэффективности многодвигательного тягового привода модульного грузового электропоезда путем регулирования мощности и числа работающих ТЭД.

Разработан алгоритм подбора моторных и прицепных вагонов в грузовом поезде моторвагонной тяги по критерию энергетической эффективности с условием обеспечения тяговых и сцепных свойств на расчетных подъемах.

Разработан алгоритм распределения работающих тяговых двигателей по составу МГЭП с учетом обеспечения требования выравнивания ресурса их работы, недопущения перегрева и переохлаждения ТЭД, повышения управляемости поездом.

Выполнены энергетические расчеты на участках Медвежья Гора – Новый Поселок Октябрьской ж.д. и Кривенковская – Гойтх Северо-Кавказской ж.д.

При использовании предлагаемых алгоритмов управления энергоэффективностью МГЭП путем подбора моторных и прицепных вагонов, регулирования мощности, числа тяговых двигателей и их распределения по составу МГЭП энергопотребление на участке Медвежья Гора – Новый Поселок может быть снижено на 20,5 % в направлении туда и на 18,9 % в направлении обратно без изменения графика движения. А при сравнении с поездом локомотивной тяги, регулирующим энергопотребление с помощью того же алгоритма на 4,49 % и 3,61 %

соответственно. Энергопотребление на участке Кривенковская – Гойтх может быть снижено на 16 % в направлении туда и на 82 % в направлении обратно без изменения графика движения. А при сравнении с поездом локомотивной тяги, регулирующим энергопотребление по тому же алгоритму на 1,61 % и 65,92 % соответственно.

Библиографический список / References

1. Лapidус Б.М., Мачерет Д.А. Макроэкономическая роль железнодорожного транспорта: Теоретические основы, исторические тенденции и взгляд в будущее. – М.: КРАСАНД, 2014. – 234 с. [Lapidus B.M., Macheret D.A. Makroekonomicheskaya rol' zheleznodorozhnogo transporta: Teoreticheskie osnovy, istoricheskie tendencii i vzglyad v budushchee. Moscow: KRASAND, 2014. – 234 p. (In Russ.)].
2. Зарубежный железнодорожный транспорт. Дайджест 2002-2004. – С. 39–41 / По заказу Департамента реализации научно-технических программ ОАО «РЖД»; – М.: 2005. – 93 с. [Zarubezhnyj zheleznodorozhnyj transport. Dajdzhest 2002-2004. pp. 39-41 / Po zakazu Departamenta realizacii nauchno-tekhnicheskikh programm Russian Railways; Otv. Za vypusk: M.G.Arkushin. Moscow: 2005. 93 p. (In Russ.)].
3. Jackson Ch. Effective It Speedy wins the traffic. *Railway Gazette International*. 2005;(5):267-270.
4. CargoSprinter prototype regular service in the Bort of Melbourne. *Railway Gazette International*. 2003;(10):611.
5. Mercitalia Fast New High Speed Freight Service. *Railvolution*. 2019;1(19):22-23.
6. Правила тяговых расчетов для поездной работы – Утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 №867р – 515 с. [Pravila tyagovyh raschetov dlya poezdnoj raboty – Utverzhdeny Rasporyazheniem Russian Railways ot 12.05.2016 № 867r. 515 p. (In Russ.)].
7. Гапанович В.А., Авилов В.Д., Аржанников Б.А. и др. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник для вузов / под ред. В.А. Гапановича. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 620 с. [Gapanovich VA, Avilov VD, Arzhannikov BA, et al. Energoberezhdenie na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik dlya vuzov. Gapanovich VA, editor. Moscow: MISiS; 2012. 620 p. (In Russ.)].
8. Зарифьян А.А. (мл.) Алгоритм повышения энергетической эффективности электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 1. – С. 50–59. [Zarif'yan AA. Algoritm povysheniya energeticheskoy effektivnosti elektrovozov s asinhronnym tyagovym privodom pri pitanii ot seti postoyannogo toka. *Brief Summary of the Journal*. 2016;(1):50-59 (In Russ.)].
9. Пыров А.Е. Современные системы управления электровозами // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 2. – С. 64–66. [Pyrov AE. Sovremennye sistemy upravleniya elektrovozami // *Zheleznodorozhnyj transport*. 2005;(2):64-66 (In Russ.)].
10. Сорокин С.В. Повышение экономичности многосекционных электровозов переменного тока при вождении грузовых поездов: автореф. дис. канд. техн. Наук. – М.: МИИТ, 1991. – 24 с. [Sorokin SV. Povyshenie ekonomichnosti mnogosekcionnyh elektrovozov peremennogo toka pri vozhdenii gruzovyh poezdov: avtoref. dis. kand. tekhn. Nauk. Moscow: MIIT; 1991. 24 p. (In Russ.)].

Сведения об авторе:

Троицкий Павел Сергеевич, аспирант;
Кафедра «Электрическая тяга»;
eLibrary SPIN:2510-5734; ORCID:0000-0002-9110-4387
E-mail: paveltroickiy@mail.ru

Information about the author:

Troitskiy Pavel, postgraduate;
eLibrary SPIN: 2510-5734; ORCID: 0000-0002-9110-4387
E-mail: paveltroickiy@mail.ru

Цитировать:

Троицкий П.С. Алгоритм подбора моторных и прицепных вагонов в грузовом поезде моторвагонной тяги по критерию энергетической эффективности // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 104–119. doi: 10.17816/transsyst202061104-119

To cite this article:

Troitskiy PS. Algorithm for selecting motor and trailer cars in a freight train of motor-car traction according to the energy efficiency criterion. *Transportation Systems and Technology*. 2018;6(1):104-119. doi: 10.17816/transsyst202061104-119

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.313.6

DOI 10.17816/transsyst202061120-128

© А. А. Чехова, А. В. Соломин

Ростовский государственный университет путей сообщения
(Ростов-на-Дону, Россия)

ТЯГОВЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ГОРОДСКОГО МАГЛЕВ ТРАНСПОРТА

Обоснование: В настоящее время огромное внимание уделяется проблеме повышения эффективности работы транспорта в крупных городах. Использование городского Маглев транспорта с линейными тяговыми двигателями позволит улучшить транспортную инфраструктуру мегаполисов.

Цель: Предлагается использовать для городского Маглев транспорта тяговые линейные асинхронные двигатели (ЛЯД), повышающие безопасность движения нового вида транспорта

Материалы и методы: В данной работе была предложена конструкция тягового линейного асинхронного двигателя, способная повысить усилия поперечной стабилизации и безопасность движения, путем выполнения боковых частей вторичного элемента линейного асинхронного двигателя в виде короткозамкнутых обмоток.

Результаты: Улучшение усилий боковой стабилизацией позволяет повысить безопасность движения экипажа.

Ключевые слова: тяговый линейный асинхронный двигатель, городской Маглев транспорт, вторичный элемент, короткозамкнутые обмотки, электропроводящие стержни, боковая стабилизация.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© А. А. Chekhova, A. V. Solomin

Rostov State Transport University
(Rostov-on-Don, Russia)

TRACTION LINEAR INDUCTION MOTOR OF URBAN MAGLEV TRANSPORT

Background: Currently, great attention is paid to the problem of increasing the efficiency of transport in cities. The use of urban Maglev transport with linear traction motors will improve the transport infrastructure of megacities.

Aim: The use of magnetic-levitation transport with linear induction motors (LIM) is proposed. It is proposed to use traction linear induction motors (LIM) for urban Maglev transport, increasing the safety of a new type of transport.

Materials and Methods: In this work, the design of a linear traction induction motor was proposed, which can increase lateral stabilization forces and safety of traffic by performing the lateral parts of the secondary element of a linear induction motor in the form of short-circuited windings.

Results: Improving efforts of the lateral stabilization improve crew safety.

Keywords: linear induction motor, urban Maglev transport, secondary element, short-circuited windings, electrically conductive rods, lateral stabilization.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время огромное внимание уделяется проблеме развития городского транспорта. Низкие скорости движения автомобильного транспорта, особенно в часы пик, и вредное воздействие выхлопных газов, загрязняющих воздух в мегаполисах, поднимают проблему развития транспортной инфраструктуры крупных городов при одновременном улучшении их экологии. По разным причинам не всегда возможно строительство метрополитена из-за его высокой стоимости и геологических особенностей региона. В ряде случаев удастся частично улучшить ситуацию при пассажирских перевозках в крупных городах за счет использования железнодорожного транспорта, как, например, это делается в Москве. В Москве все вокзалы расположены в центре города и имеется кольцевая железная дорога, что удастся использовать для перевозки по городу пассажиров. Строительство новых железнодорожных путей внутри сложившейся городской инфраструктуры часто просто невозможно. Одним из самых эффективных решений данной проблемы может стать применение эстакадного городского Маглев транспорта (ГМТ) с тяговыми ЛАД со скоростями движения 100-120 км/ч. Эстакадный ГМТ намного дешевле по сравнению с метрополитеном и по стоимости строительства, и по затратам на его обслуживание.

Путевая структура городского Маглев транспорта может размещаться на высоких опорах, что позволяет использовать подэстакадную зону для различных нужд, в том числе под строительство. При этом темпы строительства городского ГМТ тоже гораздо выше, чем при строительстве метро. Внедрение ГМТ способно значительно повысить и улучшить транспортную инфраструктуру крупного города.

В качестве тяговых устройств высокоскоростного городского Маглев транспорта могут использоваться линейные асинхронные двигатели. При разработке ГМТ могут быть использованы результаты исследований, выполненных в Санкт-Петербурге в инженерном кластере «Российский Маглев» [1–8]. В данной работе предлагается улучшить конструкцию тягового ЛАД, с целью повышения усилий боковой стабилизации экипажа. Это поможет значительно повысить безопасность движения нового вида

городского транспорта при перевозке пассажиров, что является важным фактором.

КОСТРУКЦИЯ ТЯГОВОГО ЛАД ДЛЯ ГОРОДСКОГО МАГЛЕВ ТРАНСПОРТА С БОКОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ

Системы магнитного подвеса городского Маглев транспорта могут быть разными: на постоянных магнитах, электромагнитными или электродинамическими и в рамках данной статьи не рассматриваются. В качестве тягового привода ГМТ предлагается использовать линейный асинхронный двигатель. В качестве тягового двигателя использован ЛАД с усовершенствованной системой боковой стабилизации транспортного экипажа относительно его путевой структуры. Индуктор тягового ЛАД может размещаться как на транспортном экипаже, так и укладываться в путевую структуру городского Маглев транспорта (Рис. 1). Возможно, что для города второй вариант будет предпочтительным.



Рис. 1. Магнитнолевитационный транспорт на эстакаде

Разработана новая конструкция линейного асинхронного двигателя, обладающая расширенными функциональными возможностями [9], принципиальная конструктивная схема которой представлена на Рис. 2.

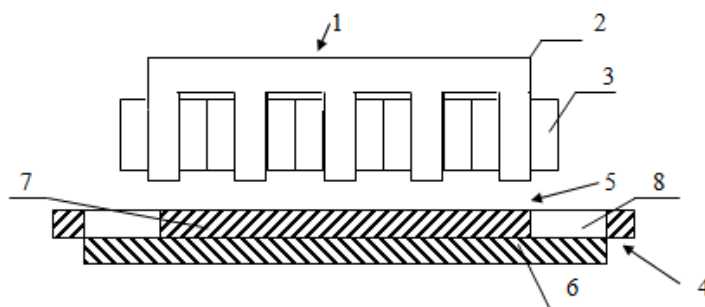


Рис. 2. Линейный асинхронный двигатель

Линейный асинхронный двигатель содержит индуктор 1, состоящий из сердечника 2 и многофазной обмотки, катушки 3 которой образуют ряды в продольном и поперечном направлениях (на Рис. 2 не показаны). Вторичный элемент 4 содержит электропроводящую часть 5, расположенную на ферромагнитном основании 6. Электропроводящая часть 5 содержит сплошную часть 7, расположенную в середине, к которой с обеих сторон примыкают боковые части 8.

Электропроводящая часть 5 вторичного элемента 4 изображена на рис. 3 к сплошной части 7 примыкают с обеих сторон боковые части 8, каждая из которых образована чередующимися электропроводящими стержнями 9, перпендикулярными сплошной части 7, между которыми один за другим расположены электропроводящие стержни 10, параллельные сплошной части. Места электрического соединения стержней 9 и 10 и сплошной части 7 показаны точками.

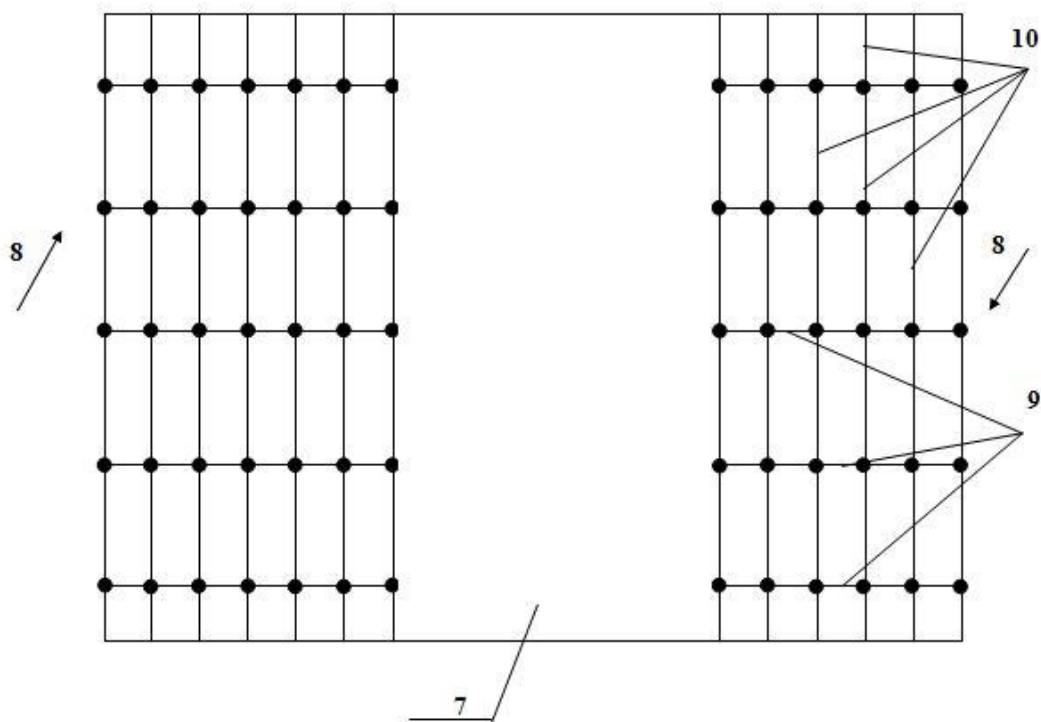


Рис. 3. Электропроводящая часть вторичного элемента:

7 – сплошная часть; 8 – боковые части; 9 – чередующиеся электропроводящие стержни, перпендикулярные сплошной части; 10 – чередующиеся электропроводящие стержни, параллельные сплошной части.

Схема соединения катушек обмотки индуктора представлена на Рис. 4. Прописными буквами А, В и С обозначены фазы, к которым подключены соответствующие катушки многофазной обмотки. Видно, что продольные ряды катушки образуют прямые порядки следования фаз, а катушки

каждого поперечного ряда имеют до середины ряда прямой, а после середины – противоположный порядок следования фаз.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЯГОВОГО ЛАД

Принцип действия такого линейного асинхронного двигателя состоит в следующем. При подключении катушек обмотки индуктора, соединенных по схеме (Рис. 4), к источнику трёхфазного напряжения по ним протекут токи, которые возбуждают магнитные потоки. Магнитные потоки, созданные продольными рядами катушек обмотки, будут бегущими вдоль оси ЛАД. Они, пересекая срединную часть электропроводящей части вторичного элемента, индуцируют в ней электродвижущие силы, вызывающие протекание вихревых токов. Вихревые токи срединной части вторичного элемента при взаимодействии с магнитными потоками, бегущими в продольном направлении, создают тяговые механические усилия, под действием которых индуктор ЛАД будет перемещаться в направлении, противоположном направлению бегущего магнитного поля. Магнитные потоки, созданные токами поперечных рядов катушек обмотки, будут «бежать» навстречу друг другу от краёв индуктора к его центру. Поперечно бегущие магнитные потоки, взаимодействуя с токами в срединной части электропроводящей части вторичного элемента, ими индуцированными создадут встречно действующие в поперечном направлении механические усилия. Эти усилия при симметричном расположении индуктора ЛАД относительно вторичного элемента взаимно уравновешиваются и не оказывают влияния на работу двигателя.

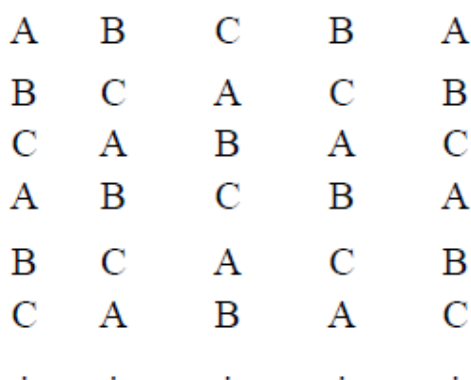


Рис. 4. Схема соединения обмотки индуктора

При поперечном смещении индуктора ЛАД относительно вторичного элемента (например, экипаж ГМТ сместился под из-за порыва ветра) равенство этих усилий нарушается. Например, при смещении

индуктора ЛАД вправо в каждом поперечном ряду поперечные усилия, действующие слева направо, останутся теми же по величине, что и при симметричном расположении индуктора ЛАД и вторичного элемента, так как эти усилия создаются при взаимодействии поперечно бегущих в этом же направлении магнитных потоков, созданных токами трёх катушек индуктора, с токами ими индуцированными в срединной части вторичного элемента. Одновременно поперечные усилия, действующие на индуктор в поперечном направлении справа налево увеличатся, поскольку часть индуктора окажется над боковой частью 8 (Рис. 3) электропроводящей части вторичного элемента. Видно, что боковые части 8 (Рис. 3) представляют собой короткозамкнутые обмотки, образованные электропроводящими стержнями 9 и 10 (Рис. 3). Поэтому часть магнитного потока, бегущего поперёк справа налево, будет взаимодействовать с токами в короткозамкнутых обмотках и усилие, действующее справа налево, увеличится (токи в стержнях 10 направлены перпендикулярно магнитному потоку и имеют большую длину активного взаимодействия с магнитным потоком).

В результате под действием разности усилий, действующих справа налево и слева направо, индуктор будет смещаться влево до тех пор, пока не займёт симметричного расположения относительно вторичного элемента. Так достигается поперечная стабилизация индуктора ЛАД (экипажа городского Маглев транспорта).

Разработка линейного асинхронного двигателя с улучшенной системой боковой стабилизацией актуальна для эстакадного городского Маглев транспорта, так как обеспечение безопасности при перевозке пассажиров является одной из самых важных задач [10–15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая конструкция тягового линейного асинхронного двигателя для городского Маглев транспорта, способная улучшить систему боковой стабилизации и повысить безопасность движения ГМТ при перевозке пассажиров.

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*. Garanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. (In Russ)]. Доступно по: https://b-ok.org/book/2901328/800f1a/?_ir=1. Ссылка активна на: 03.02.2019.
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)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004907216>. Ссылка активна на: 01.02.2019.
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)]. Доступно по: <https://b-ok.org/book/2910926/a2ce27>. Ссылка активна на: 02.02.2019.
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 IaV. *Magnitolevitatsionnyy transport v edinoi transportnoi sisteme strany*. Zaitsev AA, editor. St. Petersburg: NP-PRINT; 2015. 140 p. (In Russ)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008161609>. Ссылка активна на: 03.02.2019.
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. *Vyulleten' ob'yedinennogo uchenogo soveta OAO RZHD*. 2016;4:26-33. (In Russ)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27472893>. Ссылка активна на: 02.02.2019.
6. Зайцев А.А. Магнитолевитационные системы и технологии // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73. [Zaitsev AA. Magnitolevitatsionnyye sistemy i tehnologii. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2014;5:69-73. (In Russ)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21883966>. Ссылка активна на: 03.02.2019.
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 tormozhenia gruzovoi transportnoi platformy. *Izvestia PGUPS*. 2014;4(41):5-15. (In Russ)]. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-magnitodinamicheskoy-levitatsii-i-elektrodinamicheskogo-tormozheniya-gruzovoy-transportnoy-platformy>. Ссылка активна на: 05.02.2019.

8. Соломин А.В. Линейные асинхронные тяговые двигатели для высокоскоростных поездов и их математическое моделирование (монография). Ростов-на-Дону: РГУПС, 2008. – 204 с. [Solomin AV. *Lineynyye asinkhronnyye tyagovyye dvigateli dlya vysokoskorostnykh poyezdov i ikh matematicheskoye modelirovaniye* (monograph). Rostov-na-Donu: RSTU; 2008. 204 p. (In Russ)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004131632>. Ссылка активна на: 04.02.2019.
9. Патент РФ на изобретение № 2518915/ 10.06.14. Бюл. № 16. Соломин В.А., Соломин А.В., Бичилова А.А., Непомнящая О.В. Линейный асинхронный двигатель. [Pat. RUS № 2518915/ 10.06.14. Byul. № 16. Solomin VA, Solomin AV, Bichilova AA, Nepomnyayushchaya OV. *Lineynyy asinkhronnyy dvigatel'* (In Russ.)]. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2518915C1_20140610. Дата обращения: 20.11.2019.
10. Патент РФ на изобретение № 2623576/ 28.06.17. Бюл. № 19. Бичилова А.А. Линейный асинхронный двигатель. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2623576C1_20170628. Дата обращения: 20.11.2019. [Pat. RUS № 2623576/ 28.06.17. Byul. № 19. Bichilova AA. *Lineynyy asinkhronnyy dvigatel'*. From: https://yandex.ru/patents/doc/RU2623576C1_20170628 (In Russ.) Accessed November 20, 2019].
11. Пашков Н.Н. Уравнение движения магнитнолевитационного подвижного состава // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 59–69. [Pashkov NN. The equation of motion of the magnetic rolling stock. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(1):59-69. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20151159-69
12. Филиппов Д.М. Особенности моделирования магнитного поля в электромеханических узлах магнитнолевитационной транспортной системы методом вторичных источников // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 49–61. [Filippov DM. Features of the simulation of the magnetic field in the electromechanical units of a magnetic-levitation transport system by the method of secondary sources. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):49-61. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20151249-61
13. Лapidус Б.М., Лapidус Л.В. Железнодорожный транспорт: философия будущего (монография). М.: Прометей, 2015. – 232 с. [Lapidus BM, Lapidus LV. *Zeleznodoroznyi transport: filosofia buduchego* (monograph). Moscow: Prometei; 2015. 232 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23731956>. Ссылка активна на: 02.02.2019.
14. Калнинь Т.К. Линейные индукционные машины с поперечным магнитным потоком (монография). Рига: Зинатне, 1980. – 170 с. [Kalnin' TK. *Lineynyye induktsionnyye mashiny s poperechnym magnitnym potokom* (monograph). Riga: Zinatne; 1980. 232 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://ru.book.cc/book/2760544/6d2e3d>. Ссылка активна на: 03.02.2019.
15. Bakhvalov YuA, Gorbatenko NI, Grechikhin VV, et al. Design of optimal electromagnets of magnetic-levitation and lateral-stabilization systems for ground transportation based on solving inverse problems. *Russian Electrical Engineering*. 2017;88(1):15-18. doi: 10.3103/S1068371217010047

Сведения об авторах:

Чехова Анастасия Алановна, аспирант; адрес: 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;
eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;
E-mail: ema@rgups.ru

Соломин Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;
E-mail: vag@kaf.rgups.ru

Information about the authors:

Anastasia A. Chekhova, Graduate; address: 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia;
eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;
E-mail: ema@rgups.ru

Andrei V. Solomin, Candidate of Technological sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;
E-mail: vag@kaf.rgups.ru

Цитировать:

Чехова А.А., Соломин А.В. Тяговый линейный асинхронный двигатель для городского Маглев транспорта // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 120–128. doi: 10.17816/transsyst202061120-128

To cite this article:

Chekhova AA, Solomin AV. Traction Linear Induction Motor of Urban Maglev Transport. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):120-128. doi: 10.17816/transsyst202061120-128

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 330.322

DOI 10.17816/transsyst202061129-145

© Н. А. Журавлева¹, Т. Кльештик²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

²Жилинский университет

(Жилина, Словацкая Республика)

ПРОБЛЕМЫ ФИНАНСИРОВАНИЯ ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ И ОСНОВНЫЕ ИНВЕСТИЦИОННЫЕ ТРЕНДЫ 2020 ГОДА

Обоснование: Реализация масштабных планов развития российской инфраструктуры, прежде всего транспортной, требует соответствующего методического обеспечения как технологии проектирования реализации данных задач, так и разработки должного инструментария их финансирования.

Цель: анализ причин несоответствия программных задач условиям их финансирования; формализация инвестиционных трендов современной экономики и описание возможности их адаптации под российские проекты.

Методы: принцип восхождения от конкретного к абстрактному и обратно позволил выявить важные закономерности инвестиционных трендов и их связи с качеством проектов; принцип системности подтвердил зависимость успешной реализации инфраструктурных проектов от достоверности прогнозов развития экономики и адекватности механизмов финансирования и управления проектами.

Результаты: анализ непрерывных изменений государственных приоритетов и программ, отраженных в большом наборе документов, регулирующих развитие транспортной инфраструктуры в РФ позволил выявить влияние важнейших закономерностей, определяющих результативность данных решений. Систематизированы все доступные источники финансирования проектов транспортной инфраструктуры с учетом объемов вложений и статуса на рынке. Подтвержден вывод о том, что именно долговые источники финансирования, прежде всего концессионные могут быть самыми эффективными в реализации инфраструктурных проектов.

Ключевые слова: рынок инфраструктурных инвестиций, частная концессионная инициатива, проектное финансирование, долгосрочное инвестиционное соглашение.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© N.A. Zhuravleva¹, T. Kliestik²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(St. Petersburg, Russia)

²University of Zilina

(Zilina, Slovak Republic)

TRANSPORT INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT FINANCING PROBLEMS AND MAIN INVESTMENT TRENDS IN 2020

Background: The realisation of large-scale plans of Russian infrastructure development, transport in particular, requires a corresponding methodological guidance for both planning of realisation of these tasks and development of the proper financing instrumentarium.

Aim: The analysis of reasons for incompliance of programme tasks with their financing conditions; formalisation of investment trends in today's economy and description of their capability to adapt to Russian projects.

Methods: The method of rising from concrete to abstract and vice versa has allowed identification of important regularities of investment trends and their connection with the quality of projects; the systems principle has confirmed dependence of successful realisation of infrastructure projects on reliability of economic development forecasts and adequacy of projects financing and management.

Results: The analysis of ongoing changes of state priorities and programmes, outlined in a large number of documents regulating development of transport infrastructure in Russia, has allowed identification of influence of most significant regularities, which determine effectiveness of these solutions. All available transport infrastructure project financing sources have been systemised, considering investment volume and their status in the market. The statement that it is exactly the loan-based financing sources, concession in the first instance, that can be the most efficient in infrastructure projects realisation, has been confirmed.

Keywords: infrastructure investment market, private concession initiative, project financing, long-term investment agreement.

ВВЕДЕНИЕ

К 2024 году Российским Правительством заявлено масштабное развитие национальной экономики, на которое предполагается выделить 25,7 трлн рублей. Из 12 стратегических направлений сформированы национальные проекты (инфраструктурный план считается 13-м нацпроектом). Из них 13,2 трлн руб. должен выделить федеральный бюджет, 7,5 трлн руб. поступят из внебюджетных источников, проекты на 4,9 трлн руб. профинансируют бюджеты регионов. Еще 147,8 млрд руб. возьмут из средств государственных внебюджетных фондов [1].

Стоимость проекта «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры» составляет 6,35 трлн руб. без учета бюджета энергетической части плана: 3 трлн руб. обеспечит федеральный бюджет, 58,7 млрд руб. – регионы, а оставшиеся 3,3 трлн руб. привлекут из внебюджетных источников [1]. При этом, к концу 2019 года, ничего существенного по этим программам сделано не было. Большинство аналитиков полагают основной причиной отставание расходов, как государства, так и бизнеса на инфраструктуру. В 2019 году вложения государства на обеспечение оптимального содержания и улучшения

действующих объектов инфраструктуры – около 2,1 % ВВП, можно считать критичными. Если объемы бюджетного финансирования в 2020 году сохранятся на прежнем уровне и в номинальном и в реальном выражении, следует признать срыв выполнения большинства программ развития инфраструктурного комплекса.

Однако, по нашему мнению, это проблема в большей части не ограничена выделением бюджетных средств. Реализация программ развития инфраструктуры сдерживается отсутствием готовых проектов, а именно, проектов с обоснованными современными инженерными, технологическими и организационными решениями, имеющими подтвержденную экономическую, социальную и иную эффективность. Проблема усугубляется кризисным состоянием отраслей проектирования и строительства, слабым уровнем развития ряда регионов и связанных с проектами видов деятельности, отсутствием эффективных механизмов вхождения бизнеса в такие проекты.

Именно отсутствие конкретных решений по привлечению инвестиций из внебюджетных источников, полного регуляторного механизма различных форм государственно-частного партнерства (ГЧП) и инструментов проектного финансирования становится проблемой номер один. Тем более, новые интеллектуальные и цифровые технологии инвестирования, процессы и процедуры цифровых инвестиций (Initial coin offering (ICO)) в цифровом пространстве первичного размещения виртуальных активов (токенов) практически даже не обсуждаются. Конечно, сегодня цифровые инвестиции не могут быть полноценным источником внебюджетного финансирования инфраструктурных проектов, но они могут активизировать новые разработки техники, технологий, которые могут обеспечить их реализацию на ином инновационном уровне.

Разумеется, что правительство активно заинтересовано в том, чтобы срыва реализации национальных проектов не произошло. И при их реализации чрезвычайно важно определить причины несоответствия программных задач условиям их финансирования; выявить все возможные инвестиционные тренды современной экономики и возможности их адаптации под российские проекты. Именно эти задачи формируют цель настоящего исследования.

Объектом исследования является проекты развития транспортной инфраструктуры, а его предметом – методы и модели смешанного финансирования масштабных инфраструктурных проектов.

ИСТОРИОГРАФИЯ

История взаимодействия государства и бизнеса в решении нужных для общества задач давняя, особенно в экономически развитых странах, а,

последние двадцать лет сложилась и в России. К первому опыту можно отнести строительство канала по концессионному принципу во Франции в середине 16 века. Наибольшее развитие подобное партнерство получило в Великобритании, где такие проекты обеспечивают 17 % экономии бюджетных инвестиций ежегодно. По своей сути эта история построена на базовых интересах государства и бизнеса: государство должно иметь средства для выполнения своих важнейших функций, а бизнес заинтересован в доходах от объектов инвестирования. Это партнерство не является какой-либо моделью государственного макроэкономического регулирования, но оно используется государством для рационализации деятельности в отношении долгосрочных, комплексных проектов, на реализацию которых не хватает бюджета и в которые бизнес без государственных гарантий и преференций (чаще всего, ценовых) не идет.

Наиболее полно в современном контексте модель государственно-частного партнерства описана в работе Олава Соренсена «Отношения между правительством и бизнесом: к модели партнерства» [2]. В России теоретические и практические проблемы ГЧП подробно рассмотрены М. А. Дерябиной [3] и В. Г. Варнавским [4]. Авторы отмечают, что партнерская модель реализации проектов может быть реализована различными способами. Наиболее распространенным является государственный контракт как особая форма партнерства, которая используется для получения государственным или муниципальным заказчиком необходимых ему товаров, работ или услуг. Регулируется государственный контракт Федеральным законом «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» [5] и осуществляется исключительно по результатам специально проведенных закупочных процедур. Формами, более приближенными к сущности ГЧП являются соглашения о разделе продукции (СРП) и концессионные соглашения.

Соглашение о разделе продукции применяется к договорам между зарубежной добывающей компанией и государственным предприятием в отношении раздела природных ресурсов, а именно, разведке, добыче и разделе ресурсов в пределах определённой области. Проблемы реализации таких соглашений на территории РФ наиболее подробно рассмотрены в работе Натальи Фроловой [6]. Автором показано, что инвестиционное сотрудничество на основе соглашения о разделе продукции положительно сказывается не только на развитии национальной экономики, но и на бизнесе: вовлечении новых объемов ресурсов, расширении географии участия, предпринимательского опыта. При этом отмечает, что данные соглашения существенно теряют в силу определенных причин, например, экономических санкций, введенных в отношении России.

Наибольшее развитие и применение получила такая форма ГЧП как концессия. Предметом этого сотрудничества является создание или реконструкции за счёт средств инвестора (или — совместно с ним) объектов недвижимого имущества, находящихся в государственной собственности, в результате чего инвестор получает возможность эксплуатировать объект на возмездной основе, собирая доход в свою пользу. Международная практика концессионных соглашений опирается на пять основных типов:

- BOT (Build-Operate-Transfer) – «Строительство- управление- передача»;
- BTO (Build-Transfer-Operate) – «Строительство-передача-управление»;
- BOO (Build-Own-Operate) – «Строительство-владение -управление»;
- BOOT (Build-Own-Operate-Transfer) – «Строительство-владение-управление-передача»;
- BBO (Buy-Build-Operate) – «Покупка-строительство-управление», полностью представленных в документах Мирового Банка [7].

Российское законодательство о ГЧП с 2012 года предусматривает три основных формы (типа контрактов) ГЧП: 1. Контракт на управление и арендные договоры; 2. Контракт на эксплуатацию и обслуживание; 3. Концессия. Применение этих контрактов к масштабным проектам подробно рассмотрено П. А. Гагариным [8].

В экономической литературе широко представлена практика реализации проектов ГЧП в развитии инфраструктуры. Наиболее полным исследованием следует отметить специальный доклад Государственно-частное партнерство в Европейском Союзе: широко распространённые недостатки и ограниченные преимущества, опубликованный в 2018 году Европейским Советом Аудиторов [9]. В нем исследованы результаты 12 совместно финансируемых ЕС ГЧП во Франции, Греции, Ирландии и Испании проектов в области автомобильного транспорта и информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). Их доля составила около 70 % общей стоимости всех проектов (29,2 млрд. евро) ГЧП, поддерживаемых ЕС. Авторы выделяют существенные проблемы реализации ГЧП в инфраструктуре, обращая внимание на необходимость учета задержек сроков реализации проектов, ужесточения требований к закупкам и оптимизации ценообразования; усиления политики и стратегического анализа проектов ГЧП [10].

Наше исследование основывается на анализе Европейского и Российского законодательного и нормативного регулирования ГЧП в проектах развития инфраструктуры, в частности, транспортной инфраструктуры; анализе опыта и лучших практик реализации подобных проектов, но, при этом оценивает возможности и существующие проблемы применения такого партнерства при реализации масштабных проектов развития транспортной инфраструктуры в РФ.

АНАЛИЗ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ТРЕНДОВ В РФ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕАЛИЗАЦИЮ НАЦИОНАЛЬНЫХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ПРОЕКТОВ

Инвестиционные тренды в РФ неустойчивы и подвержены скорее политическим, чем экономическим влияниям. Анализ трех последних лет разработки и реализации национальных проектов развития транспортной инфраструктура позволил сделать следующие выводы.

В РФ отсутствует национальная система планирования, несмотря на то, что ее структура установлена федеральным законом о стратегическом планировании (172-ФЗ). Несмотря на появление Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры до 2024 года и множества других документов, понимания того, какие использовались процедуры планирования и прогнозирования, какая информация легла в основу расчета целевых показателей нет. Существующий набор соответствующих регуляторных документов можно классифицировать по трем уровням:

На федеральном уровне это: Стратегия научно-технологического развития [11], Стратегия национальной безопасности [12], Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года [13], а также Ежегодное послание Президента Федеральному собранию, Майский и другие виды Указов Президента.

На отраслевом уровне: Транспортная стратегия России до 2030 года [14]; Стратегии развития железнодорожного и других видов транспорта России до 2030 года [15], Энергетическая стратегия России до 2030 года [16], Стратегия развития информационного общества до 2030 года [17] и другие отраслевые стратегии.

На уровне макрорегионов существуют стратегии социально-экономического развития федеральных округов и субъектов (до 2020-2025 гг.).

Очевидна непоследовательность разработки документов, в частности, государственная политика полностью ориентируется на комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры до 2024 года, при этом стратегия пространственного развития России была утверждена на полгода позднее, что абсолютно лишено логики [18]. Отсутствуют важнейшие документы в системе стратегического планирования, прежде всего, такие как национальный стратегический прогноз, без которого невозможна разработка стратегии научно-технического развития и национальной стратегии социально-экономического развития в целом. Из большого перечня стратегий невозможно создать согласованную иерархию документов и их целевых показателей. Проблема осложняется отсутствием реальных приоритетов в

наборе стратегий. Так, в стратегии пространственного развития выделено порядка 150 перспективных центров, способных генерировать экономический рост без учета проектов, которые могут включать субъекты. Для каждого региона документ указывает перспективную экономическую специализацию – порядка 10-20 видов экономической деятельности по ОКВЭД. В комплексный план вошло более 700 транспортных проектов, претендующих на статус национальных инфраструктурных приоритетов. Такое огромное число приоритетов не позволяет сконцентрировать ресурсы на главном и не подлежит разумному управлению. При этом, расходы государства в процентах от ВВП (бюджеты всех уровне) на инфраструктуру с 2016 по 2019 год имеют тенденцию к снижению. Несмотря на более оптимистичный прогноз ожидаемых расходов к концу 2019 года – 2,3 %, в целом картина не меняется [19]. Перспективы использования средств суверенных фондов, субсидий и прочих дотаций, если будут реализованы, то в качестве исключений для активизации проектов в рамках государственных монополий.

Полноценный анализ государственной инфраструктурной политики и ее приоритетов практически не возможен, поскольку сами стратегические документы и комментарии к ним чисто формальны, не отражают сути проектов, не подтверждаются какими бы то ни было расчетами. Сюда добавляется проблема их непрозрачности: непонятно, на основе каких прогнозных данных сформированы целевые индикаторы и показатели проектов. В качестве демонстрации данного утверждения можно привести примеры отсутствия экономического обоснования и подтверждения грузопотока по Северному морскому пути до 80 млн тонн за шесть лет и отсутствие информации о причинах, повлиявших на свертывание проекта строительства ВСМ Москва-Казань.

На российском рынке инфраструктурных проектов по-прежнему доминирует заказчик – государство, регион, муниципалитет, который часто не может освоить выделенные средства ввиду отсутствия качественных, экономически обоснованных и социально целесообразных проектов. По данным *infraONE Research* различные фонды, спонсоры и бизнес имеют более 2 трлн рублей, потенциально готовых пойти в инфраструктурные проекты [20]. Это больше, чем нужно сегодня для реализации комплексного плана развития магистральной инфраструктуры. Но ничего не происходит. У чиновников и бизнеса не хватает компетенций, чтобы систематизировать процессы планирования развития территорий, сформировать критерии отбора проектов, механизмы привлечения финансовых институтов и частных инвесторов, нарастить компетенции по проектированию и строительству подобных объектов.

Индекс развития транспортной инфраструктуры РФ (в заданном диапазоне от 0 до 10) снизился по сравнению с 2018 годом на 0,02 и составляет в среднем по России 3,21. При этом, самый высокий в Москве – 8,38, а самый низкий в Якутии – 1,95. У 61 региона из 85 индекс развития транспортной инфраструктуры ниже среднероссийского значения и несмотря на комплексный план, реализация которого стартовала в 2018 году, ситуация не изменилась.

Активизация инвестиционных трендов может произойти, если держатели инфраструктурных проектов инициируют использование современных инструментов проектного финансирования и ГЧП. Сделанные первые шаги по использованию средств страховых компаний в инфраструктурных проектах пока не дали ожидаемого результата, опять же в силу неотработанного механизма возврата денег и неуверенности в их эффективности. Однако, очевиден тренд формирования рынка инфраструктурной секьюритизации и облигаций, выпускаемых под будущие денежные потоки от эксплуатации данных проектов.

Показателен разрыв в содержании комплексного плана развития магистральной инфраструктуры с планами развития основных инфраструктурных отраслей, компаний и регионов. Планируемые из бюджета инвестиции на 2020-2023 годы привязаны к неким направлениям финансирования, а не конкретным проектам. Это приводит к неопределенности выбора целей проектирования и обострению конкуренции регионов за федеральные деньги. Бизнес в условиях, когда невозможно прочесть стратегию даже на ближайшие пять лет, вряд ли будет готов на оперативное финансовое партнерство в масштабных проектах, окупаемость которых за горизонтом 15-30 лет.

Серьезным препятствием к реальной работе по комплексному плану развития транспортной инфраструктуры является отставание проектного и строительного рынков. Проектные институты испытывают нехватку специалистов в области инженерных изысканий, подготовку проектной документации комплексной оценке технических, технологических и экономических эффектов и последствий проектных решений. Еще сложнее ситуация со строительными компаниями и поставщиками материалов. Так, только в 11 субъектах РФ, суммарная выручка строительных компаний превышает 100 млрд рублей. Это Москва, Санкт-Петербург, Татарстан, Башкирия, Краснодарский край, свердловская и Тюменская области. Следующий порог – 10 млрд рублей отмечен в 24 регионах РФ. [20]. Это свидетельствует о низкой концентрации региональных строительных рынков, повысить которую за два-три ближайших года вряд ли удастся. Таким образом, отставание строительного и ресурсобеспечивающего комплексов может вдвое снизить уровень вероятности успешной реализации инфраструктурных проектов.

Имеющиеся частные инвестиции в РФ будут стремиться в коммуникационную и коммунальную инфраструктуру, более развитую в регионах и требующуюкратно меньших объемов финансирования. Более того, эти проекты имеют более короткие сроки окупаемости инвестиций и составят серьезную конкуренцию транспортным проектам в борьбе за источники финансирования. Так, на начало 2019 года почти 88 % концессионных проектов относится к ЖКХ и тепло-электроэнергетике, 6 % к социальной сфере и менее 1 % к проектам транспортной инфраструктуры. На официальных сайтах можно увидеть 16 автодорожных, 6 проектов рельсового транспорта и 3 проекта водной инфраструктуры.

Отмеченные тренды существенно влияют на рекомендации на активизацию ГЧП, прежде всего развитию концессионных соглашений в проектах транспортной инфраструктуры.

КОНЦЕССИИ КАК ОСНОВНАЯ ФОРМА ПРОЕКТНОГО ФИНАНСИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В качестве основного источника финансирования инфраструктуры по-прежнему рассматриваются рынок долгового капитала и корпоративного кредитования. В первом случае – это, прежде всего концессионные облигации, как единственный в настоящее время вид инфраструктурных бумаг, присутствующих на российском финансовом рынке. Они существенно отличаются от остальных корпоративных бумаг, прежде всего тем, что их концессионная сущность предусмотрена в процессе эмиссии, что позволяет инвестировать в них негосударственным пенсионным фондам и страховым компаниям. По данным Московской биржи и Национального расчетного депозитария из 11,9 трлн рублей корпоративных облигаций в обращении, доля концессионных выпусков составляет менее процента (0,73 %). При том, что потребность инвесторов в таком виде облигаций оценивается на уровне 380–400 млрд рублей [21].

Несмотря на сложную экономическую ситуацию, в инфраструктуру в 2018 году поступило на 11–15 % внебюджетных средств больше, чем в 2017 г., (инвесторы вложили 2,2–2,7 трлн рублей). Большая доля из этих средств (71 %) пришло из квазигосударственных источников, что продолжает тенденцию усиления роли государства в развитии инфраструктуры [22]. Рынок ожидает вхождения в российские проекты международных банков развития. Очевидно, что поиск финансирования на приемлемых условиях из всех доступных источников является единственным вариантом выполнения майских указов по масштабному строительству инфраструктуры. Продолжают обсуждаться потенциальные

частные инвесторы, такие, как пенсионные фонды и страховые компании, не имеющие опыта инвестирования в масштабные проекты. Перечень реальных и потенциальных участников рынка инвестирования в инфраструктуру приведен в Табл.

Таблица. Перечень реальных и потенциальных участников рынка инвестирования в инфраструктуру

Инвестор	Предполагаемые объемы вложений в инфраструктуру, млрд руб.	Прогноз объема инвестиций в инфраструктуру на 2019–2020 гг., млрд руб.	Статус на рынке
<i>Источник</i>	<i>Доступно для инвестиций в инфраструктуру млрд руб.</i>	<i>Прогноз объема инвестиций в инфраструктуру на 2019–2020 гг., млрд руб.</i>	<i>Статус на рынке</i>
Крупнейшие банки с госучастием	900–1170	300	Активные участники
Частные банки	100–125	20	Пробы
Госбанки 2-го круга, государственные и межгосударственные институты развития (без учета 5Э5а, АИВ, NDB)	100–110	20	Пробы/активное участие
Новый банк развития (BRICS)	70–80	20–30	Пробы
Азиатский банк инфраструктурных инвестиций (Asian Infrastructure investment Bank, АИВ / АБИИ)	150	–	Обсуждается
Внешэкономбанк	45–60	15–30	Обсуждается
Негосударственные пенсионные фонды, которые уже инвестируют в инфраструктуру	160	60–65	Активные участники
Негосударственные пенсионные фонды, которые готовятся выйти на инфраструктурный рынок	84–91	18–19	Пробы
Страховые компании	130–190	10	Пробы
Российский фонд прямых инвестиций	300–370	40	Обсуждается

Инвестор	Предполагаемые объемы вложений в инфраструктуру, млрд руб.	Прогноз объема инвестиций в инфраструктуру на 2019–2020 гг., млрд руб.	Статус на рынке
<i>Источник</i>	<i>Доступно для инвестиций в инфраструктуру млрд руб.</i>	<i>Прогноз объема инвестиций в инфраструктуру на 2019–2020 гг., млрд руб.</i>	<i>Статус на рынке</i>
Частные инвесторы, включая Фонды и репатриированный капитал	130–137	23	Активные участники
Подрядчики	25	10	Пробы
Итого	2194–2668	536–567	

Составлено по: [20].

В целом, из 160 проектов, включенных в национальный перечень, 120 планировались в форме концессионных соглашений, 16 в форме ГЧП и МЧП соглашений по 224-ФЗ [23]. По четырем объектам обсуждалась возможность их реализации по Федеральному закону «О концессионных соглашениях» от 21.07.2005 N 115-ФЗ (последняя редакция) и по технологии механизма частной концессионной инициативы (ЧКИ). ЧКИ рассматривается как весьма перспективный способ концессионного проектирования, ожидается, что на Дальнем Востоке большинство проектов будет реализовано именно таким образом. Еще одна форма модифицированной концессии – долгосрочное инвестиционное соглашение (ДИС) набирает обороты. Ее максимально используют в проектах строительства автодорог, в частности, реконструкция трассы М-3 Украины и несколько участков трассы Москва – Нижний Новгород – Казань в составе коридора Европа - Западный Китай [24].

Наибольшее количество в национальном перечне инфраструктурных проектов составляют проекты строительства автодорог: на 35 проектов приходится 40% всей проектной совокупности. При этом, по объемам инвестиционных вложений лидирует железнодорожная отрасль, где на три проекта планировалось привлечь 1,53 трлн рублей. Среди успешных проектов развития транспортной инфраструктуры с использованием концессионных облигаций следует отметить таких эмитентов, как: Транспортная концессионная компания (трамвайные сети в Красногвардейском районе Санкт-Петербурга) – ставка текущего купона 9,7 %; Северо-Западная концессионная компания (Участок М-11, 15-58 км) – ставка текущего купона 6,06 % и «Магистраль двух столиц» (участки М-11, 543-646 км и 646-684 км) – ставка текущего купона 6 %.

В целом, в 2019 году по купонам концессионных облигаций (на общую сумму 87 млрд руб.) уже выплачено 32,95 млрд руб. За 2018 год эмитенты выплатили держателям бумаг 6,3 млрд руб. Первые выпуски таких бумаг обращаются по восемь лет, а самый ранний срок погашения наступит через четыре года. В среднем до погашения последних выпущенных бумаг остается 16 и более лет. В формуле расчета значительной части ставок купонов концессионных облигаций учтена инфляция, а реальная доходность инвестора выходит на уровень 2-4 % годовых, и этот коридор за год не поменялся.

Инвестициям в железнодорожную инфраструктуру, как особому типу финансовых решений должно быть посвящено отдельное исследование. Прежде всего, в силу ограничения в обороте имущества железных дорог, концессии и ГЧП для отрасли практически не существовали. Однако в 2019 году появился первый крупный концессионный проект частной концессионной инициативы «Северный широтный ход», который должен соединить Северную и Свердловскую железные дороги и обеспечить перевозку углеводородов, руды и угля в европейскую часть страны. Проектная мощность – 24 млн тонн груза в год. В проекте реализуются интересы нескольких госмонополий (ПАО «РЖД» и ПАО «Газпром») Ямало-Ненецкого автономного округа и бизнеса (специальная проектная компания ООО «СШХ»). В рамках концессии предполагается строить участок одноколейной железной дороги и железнодорожные мосты через Обь и Надым (от станции Обской до Надыма – 353 км). Общая стоимость проекта для концессионера оценивается в 113,1 млрд рублей, включая 10 млрд капитального гранта от федеральных властей, 8 млрд рублей из Ямало-Ненецкого автономного округа.

Другое концессионное соглашение в рамках реализации проекта «Строительство железной дороги Элегест – Кызыл – Курагино и угольного портового терминала на Дальнем Востоке в увязке с освоением минерально-сырьевой базы Республики Тыва» было заключено с ТЭПК «Кызыл-Курагино» в объеме 192,4 млрд рублей в мае 2018 года. Компании ТЭПК и ЗАО «Лидер» инвестируют в проект 28,9 млрд руб., ещё 134,6 млрд руб. планируется привлечь за счёт инфраструктурных облигаций. Об источниках финансирования финансового разрыва по проекту – 28,9 млрд рублей не сообщается.

Эти проекты существенно меняют инвестиционную карту на рынке проектов магистрального железнодорожного транспорта. Их развитие несомненно привлечет в практику другие финансовые инструменты, ожидаемые рынком.

Таким образом, региональные транспортные концессии, концессии в морских порта, способные расширить узкие места «дорога-порт»,

появление «посевных фондов», должны быть в приоритетах инфраструктурных решений. Внедрение новых инструментов востребовано в меньшей степени: оно отнимает слишком много ресурсов (разработка законодательных и регламентирующих процедур, отработка механизма запуска и реализации и пр.) при том, что потенциал старых механизмов финансирования не реализован больше чем на треть. Именно они должны оставаться в центре внимания государства и бизнеса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ проведенных в данной статье и иных многочисленных исследованиях по данной теме позволил сделать следующие выводы:

– Несмотря на специфику концессионных сделок в отдельных проектах и секторах экономики, ряд ключевых принципов, связанных с предоставлением, оформлением или мониторингом концессий, является базовыми и по своему содержанию идентичными. Формализация этих принципов в национальном законодательстве или в нормативной документации, определяющей порядок инфраструктурных концессионных соглашений, является важнейшей задачей регулятора.

– Часто применяемые, хорошо известные теоретические принципы концессионного соглашения, касающиеся распределения рисков между заинтересованными сторонами, а именно, «риски должна нести та сторона, которая лучше всего способна их контролировать, управлять или хеджировать», на практике серьезно осложняют концессионное соглашение. И важнейшей становится чисто экономическая задача разделения издержек, которые действительно являются экзогенными для оператора (то есть теми, от которых концессионер не может защитить себя), и теми, которые не являются таковыми. Только внешние издержки должны передаваться другим сторонам соглашения, таким как потребители, поставщики, фискальные органы и пр.

– Установление адекватного баланса между определенностью и гибкостью принятия оперативных решений является еще одной главной задачей концессионного проектирования. Например, целевые показатели эффективности проекта могут быть разработаны таким образом, чтобы обеспечить возможность оперативного управления ими в соответствии с конкретными, заранее установленными процедурами. Именно достижение конечных результатов проекта является главной задачей, а не действия концессионера, которые должны быть оперативно гибкими.

– По существующей практике в РФ, правительство часто предоставляет концессионеру исключительные права. Но, во многих случаях, это серьезно осложняет эксплуатационную стадию концессионного проекта, ограничивая конкуренцию в данном сегменте

бизнеса. Отсутствие конкуренции провоцирует рост цен на инфраструктурные услуги и снижение производительности деятельности оператора.

Дальнейшие исследования должны быть связаны с разработкой инструментария прогнозирования и планирования межотраслевых балансов производства и потребления товаров и услуг как на территории РФ, так и в зонах прилегания смежных международных транспортных территорий, что должно обеспечить максимальную достоверность планируемых грузо- и пассажиропотоков. Следует наращивать методологический аппарат проектного финансирования с учетом всех возможных вариантов ГЧП. Поскольку только надежные проекты будут обеспечены должным финансированием.

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. Старостина Ю., Фейнберг А. Правительство опубликовало параметры национальных проектов. [Starostina Yu, Feynberg A. Pravitelstvo opublikovalo parametry natsionalnykh proektov. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.rbc.ru/economics/11/02/2019/5c6058199a79472f27e0f38e>. Ссылка активна на 17.02.2020.
2. Sørensen OJ. Government-business relations: Towards a partnership model. International business economics working paper series. Centre for International Business, Department of Business Studies, Aalborg University, 1994.
3. Дерябина М.А. Теоретические и практические проблемы государственно-частного партнерства. Доклад на секционном ученом совете научного направления «Теория экономики». Институт экономики РАН, 2006. [Deryabina MA. Teoreticheskie i prakticheskie problem gosudarstvenno-chastnogo partnerstva. Doklad na sekcionnom uchenom sovete nauchnogo napravleniya «Teoriya ekonomiki» [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.imepi-eurasia.ru/baner/docladD.doc>. Ссылка активна на 17.02.2020.
4. Варнавский В.Г. Партнерство государства и частного сектора: формы, проекты и риски. М.: Наука, 2005. [Varnavskii VG. *Partnerstvo gosudarstva i chastnogo sektora: formu, proekty i riski*. Moscow: Nauka. (In Russ.)].
5. Государственный контракт по положениям Федерального закона «О контрактной системе в сфере закупок». [Gosudarstvennyi kontrakt po polozheniyam Federal'nogo zakona "O kontraktnoi sisteme v sfere zakupok" [Internet]. (In Russ.)]. Режим доступа: <https://zakonguru.com/goszakupki/44/goskontrakt.html>. Дата обращения: 18.02.2020.
6. Фролова Н.С. Проблемы и перспективы развития инвестиционного сотрудничества в России на современном этапе // Науковедение. – 2015. – Т. 7. – № 5. [Frolova NS. Problems and Prospects of Investment Cooperation in Russia at the present stage: current

- issues. *Naukovedenie*. (In Russ.)). Доступно по: <https://naukovedenie.ru/PDF/58EVN515.pdf>. Ссылка активна на 17.02.2020.
7. Kerf M, Gray RD, Irwin T, Levesque C, Taylor RR. *Concessions for infrastructure: a guide to their design and award*. Under the direction of Klein M. World Bank technical papers; no. 399. Available from: <https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/library/world-bank-toolkitsconcessions-infrastructure>.
 8. Гагарин П.А. Государственно-частное партнерство как инструмент реализации масштабных проектов. Аналитическое исследование «Градиент Альфа Инвестментс». [Gagarin PA. Public-private partnership as a tool for implementing large-scale projects. Gradient Alpha Investments group. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.webcitation.org/6FclsScjo?url=http://www.gradient-alpha.ru/assets/docs/PPP-Research-14.03.2014.pdf>. Ссылка активна на 19.02.2020.
 9. Special report 09/2018: Public Private Partnerships in the EU: Widespread shortcomings and limited benefits. [Internet]. Available from: <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/ppp-9-2018/en/>
 10. A guide to the statistical Treatment of PPPs. ЕПЕС. European Investment Bank. September 2016. [Internet]. Available from: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/1015035/7204121/epec-eurostat-statistical-guide-en.pdf>
 11. Указ Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «Стратегия научно-технологического развития». [Decree of the President of the Russian Federation from 01.12.2016 № 642 “On the strategy of scientific and technological development of the Russian Federation”. [Internet]. (In Russ.)]. Режим доступа: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449>. Дата обращения: 13.02.2020.
 12. Указ Президента Российской Федерации от 31.12.2015 г. № 683 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». [Decree of the President of the Russian Federation from 31.12.2015 № 683 “On the National Security Strategy of the Russian Federation”. [Internet]. (In Russ.)]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_191669/. Дата обращения: 13.02.2020.
 13. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года. [Forecast of socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2036. [Internet]. (In Russ.)]. Режим доступа: https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognoz_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2036_goda.html. Дата обращения: 13.02.2020.
 14. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года. [Decree of the Government of the Russian Federation from 22.11.2008 № 1734-р “On approval of the Transport Strategy of the Russian Federation for the period until 2030” [Internet]. (In Russ.)]. Режим доступа: <https://www.mintrans.ru/ministry/targets/187/191/documents>. Дата обращения: 13.02.2020.
 15. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р «Стратегия развития железнодорожного и других видов транспорта России до 2030 года». [Decree of the Government of the Russian Federation from 17.06.2008 № 877-р “Strategy for Development of Railway and Other Transport Modes in Russia until 2030”].

- [Internet]. (In Russ.)). Режим доступа: <http://government.ru/docs/19759/>. Дата обращения: 13.02.2020.
16. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р «Об утверждении Энергетической стратегии России на период до 2030 года». [Decree of the Government of the Russian Federation from 13.11.2009 № 1715-p “On approval of the Energy Strategy of Russia for the period until 2030”. [Internet]. (In Russ.)). Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902187046>. Дата обращения: 13.02.2020.
 17. Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 – 2030 годы». [Decree of the President of the Russian Federation from 09.05.2017 № 203 “On the Strategy for Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017 – 2030”. [Internet]. (In Russ.)). Режим доступа: <http://kremlin.ru/acts/bank/41919>. Дата обращения: 13.02.2020.
 18. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 207-р «Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года». [Decree of the Government of the Russian Federation from 13.02.2019 № 207-p. “On approval of the Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period until 2025”. [Internet]. (In Russ.)). Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/UVAIqUtT08o60RktoOXI22JjAe7irNxc.pdf> Дата посещения: 13.02.2020.
 19. Государственные расходы к ВВП. [Trading Economics. [Internet]. (In Russ.)). Режим доступа: <https://ru.tradingeconomics.com/>. Ссылка активна на 17.02.2020.
 20. Инвестиции в инфраструктуру: 2018, 2019, 2020. Сборник аналитики InfraONE Research. – М.: Альпина Паблишер, 2020. [Investments in infrastructure: 2018, 2019, 2020. Collection of analyses InfraONE Research. Moscow: Alpina Publisher; 2020. (In Russ.)].
 21. Доходность облигаций в 2019 году. Московская биржа. [Bond yields in 2019. Moscow Stock Exchange. [Internet]. (In Russ.)). Доступно по: <https://place.moex.com/useful/dohodnost-obligatsij?list=vse-pro-obligatsii#a3>. Ссылка активна на: 21.12.2019.
 22. Проект национального доклада. Национальный центр государственно-частного партнерства. Москва, 2018. – С. 80. [Ranking of regions by the level of development of public-private partnership 2017-2018. Draft national report. National center for public-private partnership. Moscow 2018. pp. 80. [Internet]. (In Russ.)). Режим доступа: <http://pprcenter.ru/assets/files/260418-rait.pdf>. Ссылка активна на: 15.02.2019.
 23. Федеральный закон Российской Федерации N 224-ФЗ от 13.07.2015 г. «О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». [Federal Law of Russian Federation № 224-FZ of 13 July 2015. “O gosudarstvenno-chastnom partnerstve, municipal’no-chastnom partnerstve v Russian Federation i vnesenii izmenenii v otdel’nye zakonodatel’nye акты Russian Federation” [Internet]. (In Russ.)). Режим доступа: <https://rg.ru/2015/07/17/g4p-dok.html>. Дата обращения: 12.02.2020.
 24. Концессии и инфраструктурные инвестиции. Экспертный журнал. [Concessions and infrastructure investments. Expert Magazine. [Internet]. (In Russ.)). Режим доступа: <https://investinfra.ru/>. Ссылка активна на 17.02.2020.

Сведения об авторах:

Журавлева Наталья Александровна, доктор экономических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225;
E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Кльештик Томаш, кандидат экономических наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-3815-5409; Research ID: O-8070-2015
E-mail: tomas.kliestik@fpedas.uniza.sk

Information about the authors:

Natalya A. Zhuravleva, Doctor of Economics, Professor;
eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225;
E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Tomas Kliestik, PhD candidate, Professor;
ORCID: 0000-0002-3815-5409; Research ID: O-8070-2015
E-mail: tomas.kliestik@fpedas.uniza.sk

Цитировать:

Журавлева Н.А., Кльештик Т. Проблемы финансирования проектов развития транспортной инфраструктуры и основные инвестиционные тренды 2020 года // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 129–145. doi: 10.17816/transsyst202061129-145

To cite this article:

Zhuravleva NA, Kliestik T. The Problems of Financing Transport Infrastructure Development Projects and Main Investments Trends in 2020. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):129-145. doi: 10.17816/transsyst202061129-145

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 657.2:656.2

DOI 10.17816/transsyst202061146-160

© **В. А. Подсорин, Е. Н. Овсянникова**
Российский университет транспорта (МИИТ)
(Москва, Россия)

ОБНОВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТНОЙ КОМПАНИИ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ КОНЬЮНКТУРЫ РЫНКА

Обоснование: Активное развитие товарно-транспортных связей обуславливает особую важность вопросов влияния конъюнктуры товарных рынков на направления и структуру грузопотоков. Научное осмысление перспектив развития транспортных коммуникаций с целью повышения эффективности товародвижения в соответствии с растущими требованиями экономики к его скорости, надежности и стоимости позволяет определить экономические индикаторы развития транспортной инфраструктуры и потребности в инвестициях в основные средства транспортных компаний.

Цель: Разработка методического инструментария оценки влияния конъюнктуры товарных рынков на процессы обновления основных средств транспортной компании.

Методы: Методологической основой исследования являются труды отечественных и зарубежных ученых, в которых рассмотрены вопросы формирования системы экономических показателей – индикаторов состояния технических средств и систем, проблемы развития железнодорожного транспорта в контексте макроэкономических изменений, а так же особенности инновационной деятельности на железнодорожном транспорте. Для решения поставленных задач использовались метод системного анализа, методы статистического анализа, методы технико-экономических расчетов и др.

Результаты: Предложен методический подход к определению экономических индикаторов, отражающих потребности в инвестициях при обновлении основных средств транспортной компании с учетом динамики конъюнктуры транспортного рынка.

Заключение: Экономически обоснованное обновление основных средств железных дорог не только играет исключительную роль в создании условий эффективного использования их производственных ресурсов и их развития в целом, но и способствует созданию условий удовлетворения платежеспособного спроса на рынке транспортных услуг.

Ключевые слова: конъюнктура, транспортный рынок, транспортная компания, основные средства, износ, инвестиции, линии безразличия

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© V. A. Podsorin, E. N. Ovsianikova
Russian University of Transport (MIIT)
(Moscow, Russia)

THE TRANSPORT COMPANY CAPITAL ASSETS MODERNIZATION ACCORDING TO MARKET CONDITION DYNAMICS

Background: The active development of commodity-transport ties makes the issues of the influence of the situation on commodity markets on the directions and structure of freight traffic particularly important. Scientific understanding of the prospects for the development of transport communications in order to increase the efficiency of goods distribution in accordance with the growing requirements of the economy for its speed, reliability and cost allows us to determine economic indicators for the development of transport infrastructure and the need for investment in fixed assets of transport companies.

Aim: Development of methodological tools for assessing the impact of commodity markets on the processes of updating fixed assets of a transport company.

Methods: The methodological basis of the study is the work of domestic and foreign scientists, which examined the formation of a system of economic indicators - indicators of the state of technical means and systems, the problems of the development of railway transport in the context of macroeconomic changes, as well as the features of innovative activity in railway transport. To solve the tasks, the method of system analysis, methods of statistical analysis, methods of technical and economic calculations, etc. were used.

Results: A methodological approach to the determination of economic indicators reflecting the need for investment when updating the fixed assets of a transport company is proposed taking into account the dynamics of the transport market.

Conclusion: The economically feasible renewal of fixed assets of railways not only plays an exceptional role in creating the conditions for the efficient use of their production resources and their development in general, but also helps to create conditions for satisfying solvent demand in the transport market.

Keywords: market conditions, transport market, transport company, fixed assets, depreciation, investment, lines of indifference

ВВЕДЕНИЕ

Нестабильные экономические условия развития бизнеса в России, негативное влияние санкций западных стран на реальный сектор экономики и, в то же время, рост спроса на топливно-энергетические ресурсы требует особого внимания к реализации проектов по обновлению транспортной инфраструктуры. В связи с этим, вопросы влияния конъюнктуры товарных рынков, в том числе и мировых, на направления и структуру грузопотоков и, как следствие, на потребность в обновлении и

воспроизводстве технических средств и систем транспортного комплекса приобретают особую важность [1].

Современное состояние основных средств (далее – ОС) железнодорожного транспорта характеризуется высокой степенью износа. По оценкам специалистов, степень реального износа ОС в отрасли составляет более 60 %, а по некоторым их группам значительно выше [2, 3]. В этих условиях возникает риск снижения надежности и безотказности технических средств, что негативно отражается на производственном потенциале железнодорожного транспорта. Высокая изношенность ОС негативно влияет на текущие показатели работы железнодорожного транспорта: повышаются текущие расходы; увеличиваются затраты на реализацию дополнительных мер по обеспечению безопасности движения; возникает дополнительная потребность в инвестициях и инновациях.

Железнодорожный транспорт является основой транспортной системы страны и ключевым звеном экономики России. Железные дороги выполняют более 46 % всего грузооборота (без учета трубопроводного транспорта – 87,4 %), что в 2018 году составило 2 596,4 млрд. тарифных т-км. При этом доля железнодорожного транспорта в общей структуре транспортного рынка постоянно повышается. Повышение значимости железнодорожного транспорта связано с изменением структуры грузовой базы, перераспределением грузопотоков и изменением географии перевозок, что проявляется в увеличении средней дальности перевозки [1]. Увеличение средней дальности перевозки в 2018 году до 1 835 км (по отношению к 2010 году на 23 %) связано, прежде всего, с увеличением экспортных перевозок сырьевых грузов. Следует отметить, что по ключевым направлениям перевозок на железнодорожной инфраструктуре появились «узкие места», лимитирующие объемы грузопотоков по этим направлениям. Увеличение транспортной работы требует обновления железнодорожной инфраструктуры с учетом изменения конъюнктуры транспортного рынка [4].

Таким образом, в существующем экономическом механизме обновления ОС недостаточно индикаторов, характеризующих их состояние и тенденции изменения. Для устранения этого недостатка в экономическом механизме обновления ОС предлагается использовать пороговые значения уровня их износа и прироста.

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА

Наиболее распространенным и приемлемым среди пороговых значений индикаторов экономической безопасности является пороговое значение по износу ОС, равное 40 % [5]. Под пороговым значением

понимается предельная величина уровня износа ОС, превышение которой лишает компанию возможности функционировать в нормальном режиме, т. е. создает кризисные ситуации [6].

По официальным статистическим данным [7] уровень износа ОС железнодорожного транспорта в 2016 г. составлял около 36,5 %. В Табл. 1 приведены данные об износе ОС транспортного комплекса РФ.

Таблица 1. Износ ОС по видам транспорта [7, 8, 9]

Вид транспорта	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2014	2015	2016
Транспорт – всего	23,0	27,5	28,1	29,1	32,2	32,9	34,7	36,0	39,6	41,1	41,1
из него:											
железнодорожный	14,4	18,5	21,5	23,8	27,0	28,9	30,4	33,0	34,3	36,3	36,5
автомобильный грузовой	50,1	52,9	45,3	44,5	45,7	45,9	42,1	45,4	47,5	48,4	51,5
трубопроводный	41,9	45,6	45,0	42,7	45,4	48,0	50,1	45,2	49,1	51,2	49,9
морской транспорт	55,0	51,2	45,9	39,4	34,2	32,1	34,7	37,4	33,4	38,2	38,8
внутренний водный	60,9	69,7	71,4	66,8	66,0	60,9	50,7	48,4	53,9	56,8	56,8
воздушный	50,9	50,3	48,3	48,2	49,8	47,7	45,0	39,0	45,2	44,3	41,8

Данные официальной статистики достаточно оптимистичны, а в действительности уровень износа ОС организаций железнодорожного транспорта является критическим, о чем свидетельствуют высокие темпы его роста (более чем в 2,5 раза в период с 2005 по 2016 год). Такое расхождение между официальными данными и оценками экспертов является следствием учета ОС по остаточной стоимости при создании ОАО «РЖД». Более ранняя официальная статистика показывает, что уровень износа ОС в отрасли составлял более 55 % [9]. Учет этого обстоятельства и темпов прироста уровня износа в абсолютном выражении более 3 % в год (см. табл. 1) позволяет сделать вывод, что в настоящее время износ ОС составляет более 65 %.

В исследованиях ученых ОАО "ВНИИЖТ" [2] отмечаются три периода изменения износа ОС железнодорожного транспорта:

- **первый** (1980–1991 гг.) – характеризуется практически неизменным и достаточно стабильным уровнем износа ОС в пределах 32–33 %;
- **второй** (1992–2003 гг.) – отмечается ускорение роста износа ОС до 62 %;
- **третий** (2004–2013 гг., т.е. с момента создания ОАО «РЖД») – темпы роста износа существенно замедлились и составили менее 0,5 % в год. В этот период уровень износа основных средств в среднем оценивался в 65 %.

В последние годы в следствии активизации инвестиционной политики на железнодорожном транспорте, в том числе за счет освоения

средств, выделенных государством на реализацию проектов, связанных с выполнением поручений Правительства РФ (проведение Универсиады в г. Казань, Олимпийских игр в г. Сочи и многих др.) (Рис. 1 и Табл. 2), намечился **четвертый этап** изменения износа ОС железнодорожного транспорта (2014 – по н.в.).

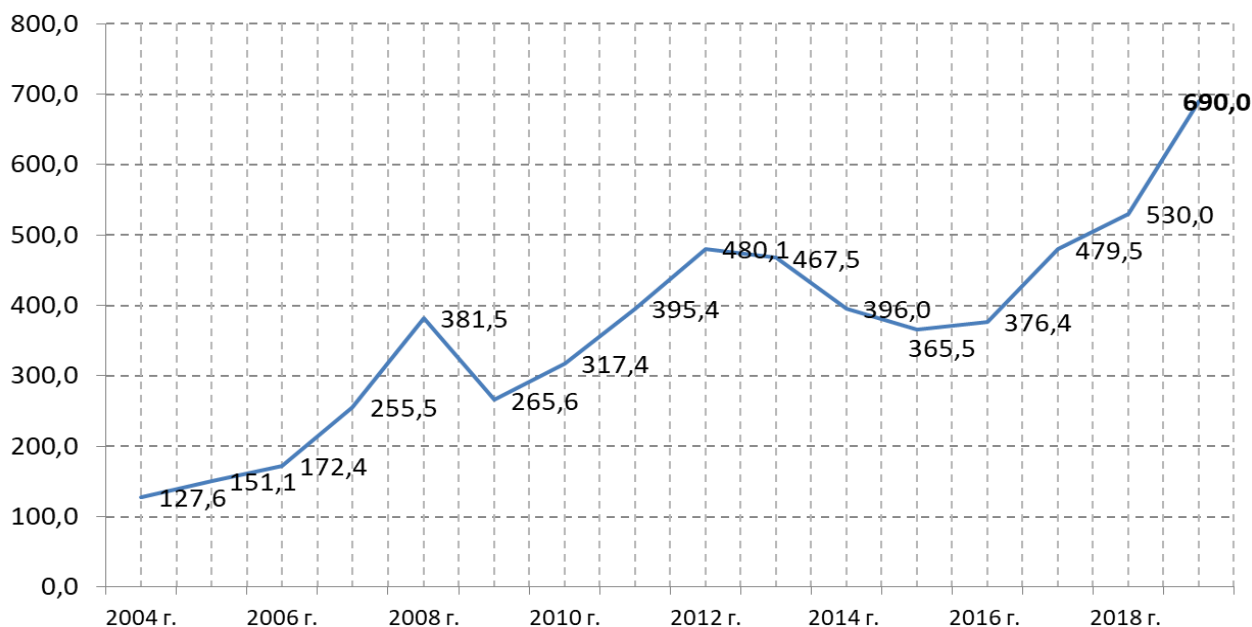


Рис. 1. Динамика инвестиций в основной капитал, млрд. руб. [10]

Снижение объема инвестиций в 2009, 2014-2015 гг. следует рассматривать как реакцию на кризисные явления, связанные с влиянием мировой экономической системы на экономику России. Если в 2009 г. это было влияние мирового финансового кризиса, то в 2014-2015 г. это, прежде всего, реакция на западные санкции в связи с воссоединением Крыма и г. Севастополя с Россией. В 2019 г. ожидается, что объем инвестиций только ОАО «РЖД» составит около 690 млрд руб.

Таблица 2. Показатели инвестиционной деятельности ОАО «РЖД» [10]

Наименование проекта развития	2016 г.		2017 г.		2018 г.		2019 г.	
	факт		факт		факт		план	
	млрд руб.	%	млрд руб.	%	млрд руб.	%	млрд руб.	%
Всего, в том числе:	376,4	100,0	479,5	100,0	530,0	100,0	690,0	100,0
Проекты, связанные с выполнением поручений Правительства РФ, в т.ч. крупнейшие	173,7	46,1	194,4	40,5	162,8	30,7	166,9	24,2

Наименование проекта развития	2016 г.		2017 г.		2018 г.		2019 г.	
	факт		факт		факт		план	
	млрд руб.	%	млрд руб.	%	млрд руб.	%	млрд руб.	%
Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей*	83,5	22,2	71,0	14,8	48,5	9,2	36,9	5,3
Развитие и обновление железнодорожной инфраструктуры на подходах к портам Азово-Черноморского бассейна	18,2	4,8	28,9	6,0	39,9	7,5	19,4	2,8
Развитие Московского узла	36,8	9,8	35,6	7,4	50,1	9,5	81,8	11,9
Развитие и обновление железнодорожной инфраструктуры на подходах к портам Северо-Западного бассейна	2,1	0,6	10,3	2,1	15,5	2,9	16,1	2,3
"Собственные" проекты ОАО "РЖД":	202,7	53,9	285,1	59,5	367,2	69,3	523,1	75,8
Обеспечение безопасности на ж.д. транспорте	41,6	11,1	114,8	23,9	92,8	17,5	143,4	20,8
Снятие инфраструктурных ограничений в регионах России	45,2	12,0	62,5	13,0	130,8	24,7	170,4	24,7
Повышение транспортной доступности для населения страны	12,2	3,2	15,6	3,3	11,3	2,1	11,6	1,7
Обновление подвижного состава, в т.ч.:	91,3	24,3	77,0	16,1	116,7	22,0	141,3	20,5
Тяговый подвижной состав	73,5	19,5	61,2	12,8	89,0	16,8	109,9	15,9
Моторвагонный подвижной состав	17,5	4,6	15,5	3,2	27,1	5,1	31,2	4,5
Прочие проекты	12,2	3,2	15,3	3,2	9,8	1,8	45,2	6,5

Несмотря на рост инвестиций, уровень износа ОС продолжает повышаться, хотя темпы его прироста значительно замедлились, а в отдельные периоды даже наметился перелом в сторону его снижения.

Накопленный износ ОС связан с недоинвестированием в середине 1990-х гг. Недостаток инвестиций в 1992–2003 гг. компенсировался за счет резервов пропускной и провозной способности, парка подвижного состава

и ремонтного оборудования. Однако эти меры привели к увеличению износа ОС [11].

Отметим, что в рамках четвертого этапа изменения уровня износа ОС начали преодолеваться негативные и формироваться позитивные изменения показателей, характеризующих состояние ОС.

Для закрепления этих тенденций необходимо обеспечить в долгосрочной перспективе своевременное обновление ОС. Процесс воспроизводства ОС является полноценным, если ввод объектов в эксплуатацию превышает выбытие. В Табл. 3 представлены обобщающие показатели движения основных производственных средств транспорта ОАО «РЖД».

Таблица 3. Коэффициенты движения ОС ОАО «РЖД», %

Коэффициент	Год					
	2004	2006	2009	2012	2015	2018
Ввода	8,10	7,39	7,83	8,81	5,77	6,18
Выбытия	2,91	2,99	0,91	1,33	0,57	0,71
Прироста	5,65	4,74	7,50	7,58	5,24	5,65

До 2000 г. для железнодорожного транспорта были характерны весьма низкие коэффициенты ввода и выбытия ОС. Они не превышали 1 % в год. Такие коэффициенты показывают, что процесс обновления ОС был очень медленным [11]. С 2004 г. коэффициенты ввода ОС значительно выросли (до 6,18 % в 2018 г.). При этом низкий уровень выбытия ОС свидетельствует о том, что на балансе железных дорог скопилось большое количество физически и морально устаревших ОС.

Для разных групп ОС обновление происходит разными темпами, что можно проследить по изменению структуры ОС (Табл. 4).

Таблица 4. Структура ОС ОАО «РЖД» [10]

Состав	Среднегодовая стоимость, млрд. руб.				Доля, %			
	2004	2006	2012	2018	2004	2006	2012	2018
Здания	188,0	275,9	406,9	575,6	11,4	11,3	9,6	8,1
Сооружения и передаточные устройства	1 020,8	1 496,8	2 733,6	4 432,0	62,1	61,2	64,7	62,4
Машины и оборудование	132,3	251,3	629,0	1 052,7	8,0	10,3	14,9	14,8
Транспортные средства	288,3	402,2	439,2	1 013,7	17,5	16,4	10,4	14,3
Инвентарь и другие виды ОС	6,6	7,8	15,1	23,8	0,4	0,3	0,4	0,3
Всего	1 644,8	2 445,5	4 223,8	7 097,9	100,0	100,0	100,0	100,0

По данным Табл. 4 видно, что за рассматриваемый период происходит увеличение стоимости ОС более чем в 4,3 раза. При этом явно просматривается сначала снижение доли группы транспортных средств с 2004 по 2012 гг. – с 17,5 % до 10,4 % (связано с выделением ПГК и ВГК в отдельные бизнесы) и последующим повышением в 2018 г. до 14,6 % (связано с обновлением локомотивного парка). Также прослеживается снижение доли зданий – с 11,4 % до 8,1 % и увеличение доли группы машины и оборудование – с 8,0 до 14,8 %, то есть, обновление ОС происходит неравномерно по разным группам ОС.

Для уменьшения уровня износа ОС необходимо активизировать инвестиционные и инновационные процессы на железнодорожном транспорте. При этом акцент должен быть сделан на инновационно-ориентированном развитии, что предполагает доминирующую роль инноваций и высокую степень их радикальности [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обоснования объемов ввода и выбытия ОС с целью мониторинга пороговых значений состояния ОС в [11] предложено использовать линии безразличия двух коэффициентов:

- **коэффициент износа** – показатель, характеризующий необходимость обновления ОС;
- **коэффициент прироста** – показатель, характеризующий экстенсивность обновления ОС.

Эти коэффициенты уже продолжительное время используются в практике анализа хозяйственной деятельности организаций различных видов деятельности, в т. ч. на железнодорожном транспорте [13]. Использование этих коэффициентов позволяет обосновано планировать объемы ввода и выбытия ОС по группам в разрезе отраслевых комплексов в зависимости от уровня их износа.

Линии безразличия износа и прироста ОС показывают предельные значения объемов их ввода и выбытия, при которых достигается равновесное состояние производственной системы в планируемом периоде.

Сбалансированность ввода и выбытия ОС позволяет обоснованно поддерживать пропорции развития отдельных групп ОС в разрезе отраслевых комплексов и структурных подразделений железнодорожного транспорта.

Построение линий безразличия позволяет определить потребность компании в инвестициях для поддержания и развития производственного потенциала, дать предварительную оценку развития компании на основе изменяющихся коэффициентов износа и прироста [11].

В Табл. 5, 6 приведены уравнения линий безразличия коэффициентов износа и прироста по группам ОС, исчисленные на основании данных бухгалтерской отчетности ОАО «РЖД».

Таблица 5. Функция линии безразличия коэффициента износа

Группа ОС	Год		
	2008	2010	2018
Здания	$y = -6,517x + 706,1$	$y = -6,787x + 83,3$	$y = -2,779x + 46,6$
Сооружения и передаточные устройства		$y = -3,972x + 6,9$	$y = -1,874x + 344,5$
Машины и оборудование	$y = -2,16x + 227,3$	$y = -1,486x + 121,8$	$y = -0,557x + 111,9$
Транспортные средства		$y = -1,947x + 118,0$	$y = -1,91x + 123,7$
Инвентарь и другие виды ОС	$y = -3,311x + 5,5$	$y = -1,87x + 3,8$	$y = -0,884x + 2,4$
Всего	$y = -4,606x + 941,0$	$y = -3,104x + 766,9$	$y = -1,604x + 643,5$

Таблица 6. Функция линии безразличия коэффициента прироста

Группа ОС	Год		
	2008	2010	2018
Здания		$y = x - 10,1$	$y = x + 12,0$
Сооружения и передаточные устройства	$y = x + 111,2$	$y = x + 87,3$	$y = x + 218,1$
Машины и оборудование		$y = x + 35,3$	$y = x + 86,6$
Транспортные средства	$y = x + 163,4$	$y = x - 99,7$	$y = x + 94,6$
Инвентарь и другие виды ОС	$y = x + 1,2$	$y = x + 0,8$	$y = x + 1,5$
Всего	$y = x + 275,7$	$y = x + 13,7$	$y = x + 412,9$

Зависимости, приведенные в Табл. 5 и 6, позволяют определять объемы ввода и выбытия по видам ОС для сохранения уровня износа и темпов прироста.

На Рис. 2 приведены линии безразличия коэффициентов прироста и износа ОС ОАО «РЖД» в 2008 и 2018 г.

Следует отметить, что в зарубежной практике используются линии безразличия для исследования различных экономических процессов [14, 15, 16].

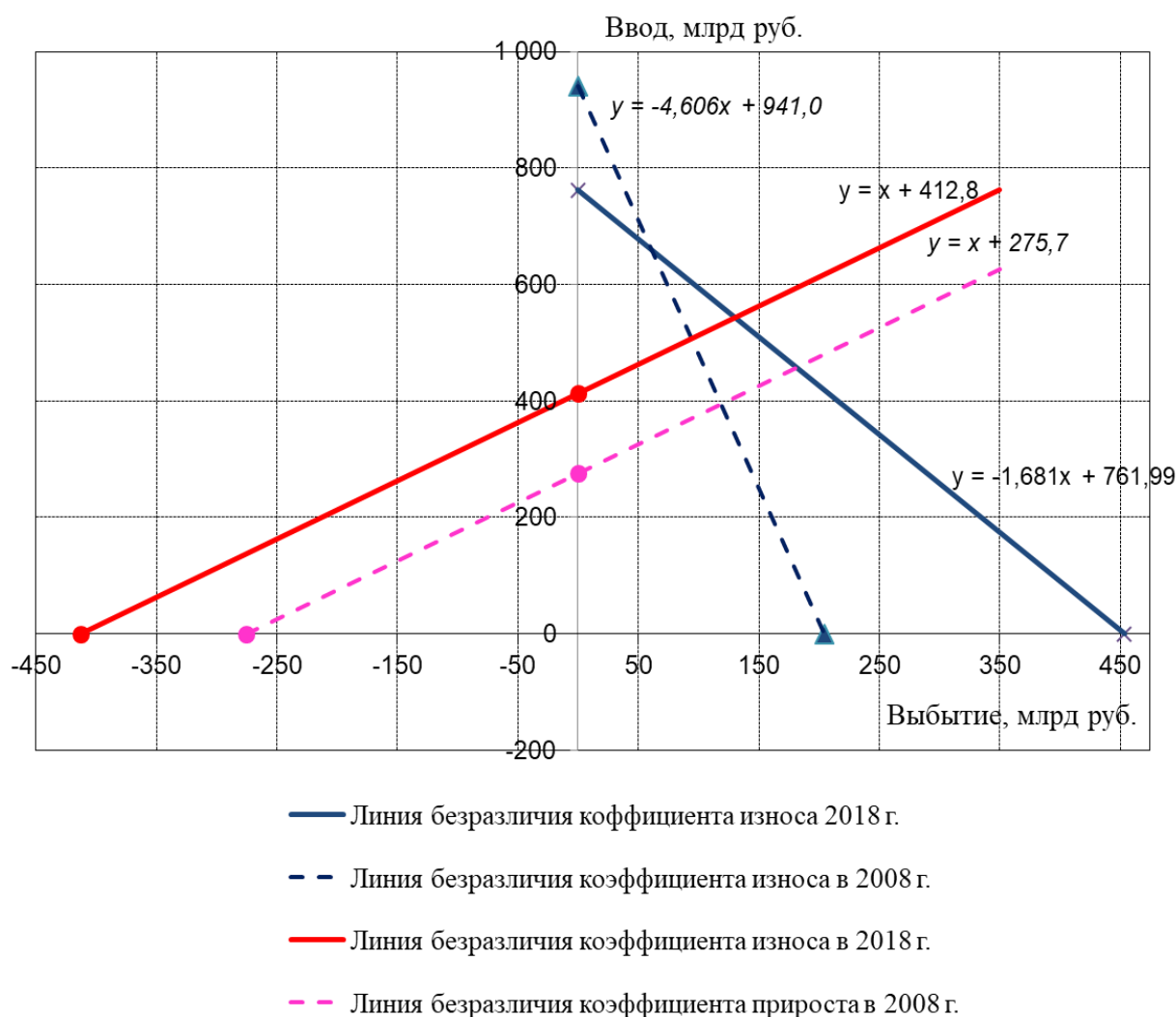


Рис. 2. Линии безразличия коэффициентов износа и прироста основных средств ОАО «РЖД» в 2010 и 2008 годах

Тенденция изменения уровня износа в 2008–2010 гг. свидетельствует об ухудшении состояния ОС (угол линии безразличия соответствующего коэффициента продолжает уменьшаться по отношению к оси выбытия). Чтобы сохранить уровень рассматриваемых коэффициентов, необходимо было в 2019 г. ввести в эксплуатацию ОС на сумму 96,0 млрд. руб. и вывести из состава – на сумму 508,8 млрд. руб., а в 2010 г. – на 463,7 и 227,7 млрд. руб. соответственно.

В Табл. 7 приведены данные по расчету потребных объемов ввода новых и выбытия изношенных ОС для сохранения коэффициентов прироста и износа на уровне предыдущего периода.

Таблица 7. Объемы ввода и выбытия ОС для сохранения износа и коэффициента прироста на уровне предыдущего периода, млрд руб.

Группа ОС	2008		2010		2018	
	Выбытие	Ввод	Выбытие	Ввод	Выбытие	Ввод
Здания			12,0	1,9	21,2	9,1
Сооружения и передаточные устройства	93,6	95,9	70,1	157,45	262,1	44,0
Машины и оборудование					102,9	16,3
Транспортные средства	47,8	124,0	109,7	232,4	104,6	10,0
Инвентарь и другие виды ОС	1,0	2,2	1,05	1,88	2,0	0,5
Всего	142,4	222,1	227,7	463,7	508,8	96,0

Для сохранения уровня износа в 2019 г. требовалось выбытие ОС более чем в 5,3 раза превышающее ввод ОС. Следует отметить, что до недавнего времени для сохранения уровня износа необходимо было ввести ОС больше, чем выбывало (в 2000 г. – в 1,16 раза; в 2004 г. – в 1,36 раза; в 2008 г. – в 1,56 раза; в 2011 г. в 2,04 раза). Эти данные свидетельствуют об изменении состояния ОС ОАО «РЖД», которое при сохранении существующих тенденций инвестирования на железнодорожном транспорте характеризуется положительной динамикой улучшения.

В Табл. 8 приведены результаты расчета потребного объема инвестиций для снижения уровня коэффициента износа по сравнению с предыдущим периодом при прогнозируемом уровне выбытия 0,7%.

Таблица 8. Потребный объем ввода ОС ОАО "РЖД" при прогнозируемом уровне выбытия 0,7 %, млрд руб.

Группа ОС	Прогноз выбытия, 0,7 %	Индекс изменения коэффициента износа				
		0,99	0,98	0,97	0,96	0,95
Здания	2,7	69,4	74,2	78,9	83,7	88,5
Сооружения и передаточные устройства	16,0	399,5	426,8	454,0	481,3	508,6
Машины и оборудование	3,6	122,8	129,2	135,6	142,0	148,4
Транспортные средства	4,4	116,9	124,4	131,8	139,2	146,6
Инвентарь и другие виды ОС	0,1	3,8	4,0	4,2	4,3	4,5
Всего	26,9	712,5	758,5	804,5	850,5	896,5

Данные Табл. 8 показывают, что амортизации, начисленной по всем группам ОС в 2018 г., недостаточно для снижения коэффициента износа. Следовательно, необходимо привлекать дополнительные инвестиционные

ресурсы из прибыли, заемных источников и т. п. В противном случае уровень износа будет повышаться на 1–2 % в год. Низкий уровень износа по отчетности ОАО "РЖД" требует корректировки расчета при реальной оценке объемов инвестиций. При расчетах с уровнем реального износа потребный объем ввода ОС может быть скорректирован в сторону уменьшения в 1,3–1,6 раза.

В работе [11] рассмотрен механизм управления воспроизводством основного капитала с выделением бюджета амортизации. Использование пороговых значений коэффициентов износа и прироста ОС в механизме нормативно-целевого бюджетного управления позволяет обоснованно распределять ресурсы на осуществление инвестиционной деятельности.

На Рис. 3 приведена концептуальная схема оценки влияния конъюнктуры транспортного рынка на процессы обновления основных средств транспортной инфраструктуры с учетом уровня износа ОС.

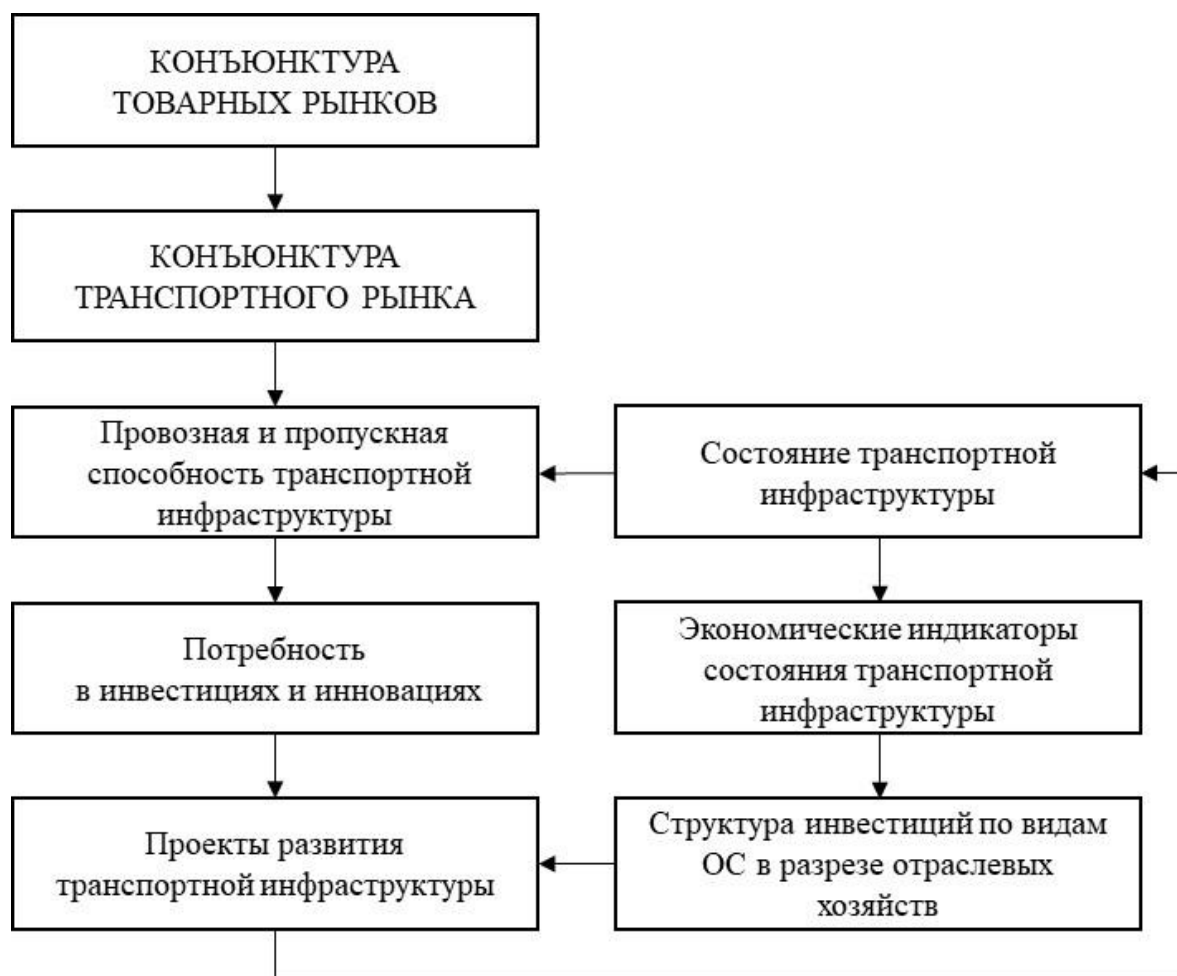


Рис. 3. Концептуальная схема оценки влияния конъюнктуры транспортного рынка на процессы обновления основных средств транспортной инфраструктуры с учетом уровня износа основных средств

Предлагаемый подход к определению потребности в инвестициях с учетом влияния конъюнктуры товарных рынков для обновления ОС позволяет определить комплекс мероприятий по снижению уровня износа ОС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях высокого уровня износа ОС использование алгоритма оценки влияния конъюнктуры транспортного рынка на процессы обновления ОС транспортной инфраструктуры с учетом уровня их износа позволяет:

- прогнозировать состояние ОС по группам в разрезе отраслевых хозяйств железнодорожного транспорта;
- планировать реализацию проектов развития транспортной инфраструктуры с учетом динамики конъюнктуры товарных рынков;
- определять потребный объем инвестиций, необходимый для обновления ОС в разрезе отраслевых хозяйств;
- осуществлять мониторинг процессов обновления ОС для целей ограничения роста уровня износа ОС в разрезе отраслевых хозяйств;
- устанавливать пороговые индикаторы изменения коэффициента износа ОС, способствующие реализации механизма контроллинга их воспроизводства.

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. Терешина Н.П., Подсорин В.А., Овсянникова Е.Н. Исследование конъюнктуры транспортного рынка в условиях цифровизации процессов управления // Экономика железных дорог. – 2018. – № 6. – С. 27–34. [Tereshina NP, Podsorin VA, Ovsyannikova EN. Research of a conjuncture of a transport market in conditions of digitalization of management processes. *Railway Economy*. 2018;(6):27-34. (Russ., Engl.). Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35103883> Ссылка активна на: 20.01.2020.
2. Малов В.А. О ходе работы «Прогноз реального состояния основных фондов ОАО «РЖД» и обоснование потребных инвестиций в разрезе хозяйств». // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» – 2012. – № 1. – С. 19–40. [Malov VA. O khode raboty “Prognoz real'nogo sostoyaniya osnovnykh fondov ОАО “RZHD” i obosnovanie potrebnnykh investitsij v razreze khozyajstv”. *Bulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta ОАО “RZHD”*. 2012;(1):19-40. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19127890> Ссылка активна на: 20.01.2020.

3. Б.М. Лapidус, Д.А. Мачерет и др. Стратегическое развитие железнодорожного транспорта в России / Под ред. Б.М. Лapidуса. – М.: МЦЭФР, 2008. – 304 с. [Lapidus BM, Macheret DA. *Strategicheskoe razvitie zheleznodorozhnogo transporta v Rossii*. Lapidus BM, editor. Moscow: MTSEHFR; 2008. p.304. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19884498> Ссылка активна на: 20.01.2020.
4. Рышков А.В. Исследование экономической конъюнктуры железнодорожного транспорта (методология, анализ, оценки): дис. ... д-ра экон. наук. – М., 2009. – 355 с. [Ryshkov AV. *Issledovanie ehkonomicheskoy kon'yunktury zheleznodorozhnogo transporta (metodologiya, analiz, otsenki)* [dissertation]. Moscow; 2009. 355 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003467276> Ссылка активна на: 20.01.2020.
5. Экономическая безопасность России: Общий курс: Учебник / Под ред. В.К. Сенчагова. – М.: Дело. 2005. – 896 с. [Senchagova VK, editors. *Ehkonomicheskaya bezopasnost' Rossii: Obshhij kurs: Uchebnik*. Moscow; Delo; 2005. 896 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004876664> Ссылка активна на: 20.01.2020.
6. Авдийский В.И., Сенчагов В.К. Методологии определения пороговых значений основных (приоритетных) факторов рисков и угроз экономической безопасности хозяйствующих субъектов // Экономика. Налоги. Право – 2014. – № 4. – С. 73–78. [Avdijskij VI, Senchagov VK. *Metodologii opredeleniya porogovykh znachenij osnovnykh (prioritetnykh) faktorov riskov i ugroz ehkonomicheskoy bezopasnosti khozyajstvuyushhikh sub"ektov*. *Ehkonomika. Nalogi. Pravo* 2014;(4):73-78. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22635124> Ссылка активна на: 20.01.2020.
7. Транспорт в России. 2018: Стат. сб./ Росстат. – М., 2018. – 101 с. [Transport v Rossii. 2018: Stat. sb./ Rosstat. Moscow; 2018. 101 p. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/transp18.pdf Ссылка активна на: 20.01.2020.
8. Транспорт в России. 2009: Стат. сб./ Росстат. – М., 2009. – 192 с. [Transport v Rossii. 2009: Rosstat. Moscow; 2009. 192 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.gks.ru/folder/210/document/13229> Ссылка активна на: 20.01.2020.
9. Транспорт в России. 2003: Стат. сб./ Госкомстат России. – М., 2003. – 182 с. [Transport v Rossii. 2003: Goskomstat. Moscow; 2003. 182 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.gks.ru/folder/210/document/13229> Ссылка активна на: 20.01.2020.
10. Годовые отчеты ОАО "РЖД". Доступно по: http://ir.rzd.ru/static/public/ru/accessible?STRUCTURE_ID=32 Ссылка активна на 20.01.2020 [Godovye otchety ОАО "RZHD" [Internet]. [cited 2020 January 20]. Available from: http://ir.rzd.ru/static/public/ru/accessible?STRUCTURE_ID=32 (In Russ.)].
11. Подсорин В.А. Экономические методы управления процессом обновления технических средств и систем транспортной компании [Текст]: дис. ... д-ра экон. наук. – М., 2015. – 333 с. [Podsorin VA. *Ehkonomicheskie metody upravleniya protsessom obnovleniya tekhnicheskikh sredstv i sistem transportnoj kompanii* [dissertation]. Moscow; 2015. 333 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005563682> Ссылка активна на: 20.01.2020.
12. Мачерет Д.А., Измайкова А.В. Экономическая роль инноваций в долгосрочном развитии на транспорте (монография). – М.: МИИТ, 2016 – 162 С. [Macheret DA, Izmajkova AV. *Ehkonomicheskaya rol' innovatsij v dolgosrochnom razvitii na transporte (monografiya)*. Moscow; МИИТ, 2016. 162 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008809496> Ссылка активна на: 20.01.2020.

13. Волков Б.А., Гудков П.А. Износ и ввод основных средств на железных дорогах // Мир транспорта – 2014. – № 3 (52). – С. 76–83. [Volkov BA, Gudkov PA. Iznos i vvod osnovnykh sredstv na zheleznykh dorogakh. Mir transporta 2014;3(52):76-83. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21692679> Ссылка активна на: 20.01.2020.
14. Bogataj D, Bogataj M, Drobne S. Interactions between flows of human resources in functional regions and flows of inventories in dynamic processes of global supply chains International Journal of Production Economics. 2009;209:215-225 doi: 10.1016/j.ijpe.2017.10.018
15. Jaworski P, Liberadzki K, Liberadzki M. Principles of the toll roads pricing. Archives of Transport 2018;45(1): 53-62 doi: 10.2139/ssrn.3087990
16. Макконел К.Р., Брю С.Л. Экономикс: учебник – М.: ИНФРА-м, 2003. – 983 с. [Makkonel KR., Bryu SL. EНkonomiks Moscow: INFRA-m; 2003. 983 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://institutiones.com/download/books/805-economics.html> Ссылка активна на: 20.01.2020.

Сведения об авторах:

Подсорин Виктор Александрович, д.э.н., профессор;
адрес: 127994 г. Москва, ул. Образцова, д. 9., стр. 9.;
eLibrary SPIN: 1168-4110; ORCID: 0000-0002-2552-8536;
E-mail: podsorin@mail.ru

Овсянникова Елена Назымовна;

eLibrary SPIN: 9247-8184;
E-mail: elena-ovs.21@yandex.ru

Information about the authors:

Victor A. Podsorin, Doctor of Economical Science, Professor;
address: 9 st. Obraztsova p. 9., 127994 Moscow, Russia;
eLibrary SPIN: 1168-4110; ORCID: 0000-0002-2552-8536;
E-mail: podsorin@mail.ru

Elena N. Ovsiannikova;

eLibrary SPIN: 9247-8184;
E-mail: elena-ovs.21@yandex.ru

Цитировать:

Подсорин В.А., Овсянникова Е.Н. Обновление основных средств транспортной компании с учетом динамики конъюнктуры рынка // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 146–160. doi: 10.17816/transsyst202061146-160

To cite this article:

Podsorin VA, Ovsiannikova EN. The transport company capital assets modernization according to market condition dynamics. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):146-160. doi: 10.17816/transsyst202061146-160

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.025.4

DOI 10.17816/transsyst202061161-173

© С. А. Смирнов, О. Ю. Смирнова, Я. В. Соколова

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

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТОВ ОТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА НОВЫХ ЛИНИЙ ПАССАЖИРСКОГО МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Обоснование: Целью функционирования систем транспортного обслуживания населения является повышение качества оказываемых услуг при постоянной конкуренции различных видов транспорта за объемы и маршруты перевозок. Для комплексной и объективной оценки эффектов, возникающих при возможном строительстве линии пассажирского магнитолевитационного транспорта, необходима разработка методики, которая сфокусирована на выявлении изменений в качестве транспортного обслуживания населения и в антропогенной нагрузке на окружающую среду.

Цель: Формирование методики, позволяющей осуществить сравнительную оценку комплекса эффектов, возникающих при внедрении в схему организации транспортного обслуживания населения дополнительного вида транспорта – магнитолевитационного.

Методы: Математическая статистика, социологические исследования, сравнительный анализ, моделирование.

Результаты: Для оценки эффективности отдельных видов транспорта для транспортного обслуживания населения разработан подход к определению интегрального показателя потребительской привлекательности вида транспорта; для оценки практических выгод от внедрения магнитолевитационного транспорта разработан подход к оценке прямых и косвенных эффектов, которые закладываются в основу расчета кумулятивного эффекта. Кроме того, сформирован подход к расчету дополнительных эффектов, позволяющих оценить улучшение условий транспортной доступности, производственные эффекты и экологические эффекты.

Заключение: В результате разработки и последующего применения методики оценки эффектов от реализации проектов строительства новых линий пассажирского магнитолевитационного транспорта становится возможным объективно оценить выгоды от внедрения нового вида транспорта в систему транспортного обслуживания населения на отдельном маршруте, что создает предпосылки для использования методики в практической деятельности.

Ключевые слова: пассажирский магнитолевитационный транспорт, пригородно-городские пассажирские перевозки, транспортное обслуживание населения.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© S. A. Smirnov, O. Yu. Smirnova, Ia. V. Sokolova
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

APPROACH OF EVALUATION THE EFFECTS FROM IMPLEMENTATION THE PROJECTS OF CONSTRUCTION NEW PASSENGER MAGLEV LINES

Background: the aim of public passenger transportation service systems is improvement of the services quality while the competition between different modes of transport for transportation volumes and routes. Complex and objective evaluation of effects caused by construction of a passenger maglev line require the research of approach, which focused on detecting the changes in quality of public transportation services and anthropologic impact on environment.

Aim: research of the approach, which allow to do comparative evaluation of complex of effects, which appear while implementation the maglev transport into the public passenger transportation service system.

Methods: mathematical statistics, sociological researches, comparative analysis, modelling.

Results: for evaluation of effectiveness of different modes of transport for public passenger transportation services researches the approach to calculation the integrated index of consumer appeal of a mode of transport; for evaluation of practical benefits of maglev transport implementation researched the approach to calculation direct and indirect effects, which are the basis of a cumulative effect calculation. In addition, researched the approach for calculation the additional effects, which allow to evaluate the improvement of transportation accessibility, operational effects and ecological effects.

Conclusion: The approach allows to do objective evaluation of benefits of implementation new transportation mode into the system of public passenger transportation service at particular routes, which is the basis of its implementation into the practice.

Keywords: passenger maglev transport, urban passenger transportation, public passenger transportation services.

ВВЕДЕНИЕ

Системы транспортного обслуживания населения формируются в крупных городах и городских агломерациях. Их специфика и индивидуальность определяется целым комплексом факторов, а элементами каждой из систем выступают различные виды транспорта. Целью функционирования всех систем транспортного обслуживания населения является повышение качества оказываемых услуг при постоянной конкуренции различных видов транспорта за объемы и маршруты перевозок. Поэтому транспортные системы с течением времени претерпевают изменения. Изменяется соотношение между элементами

транспортных систем, усложняется их структура. При этом могут в системах добавляться новые виды транспорта, несмотря на сложные условия выхода на рынок [1, 2].

Новейшим видом пассажирского транспорта является транспорт, основанный на технологии магнитной левитации. Разработки магнитолевитационного транспорта активно ведутся на протяжении последних нескольких десятилетий. Магнитолевитационный вид транспорта применяется в ряде стран мира и уже положительно оценен с точки зрения своей своевременности, экономической целесообразности, социальных и других важных эффектов [3, 4, 5].

Оценка эффектов от реализации проектов строительства новых линий пассажирского магнитолевитационного транспорта должна фокусироваться на выявлении изменений в качестве транспортного обслуживания населения и в антропогенной нагрузке на окружающую среду. Именно такой подход обеспечивает комплексный анализ влияния строительства новых линий на антропогенную среду [6, 7].

Для комплексной и объективной оценки эффектов, возникающих при возможном строительстве линии пассажирского магнитолевитационного транспорта сформирована методика, которая сфокусирована на выявлении изменений в качестве транспортного обслуживания населения и в антропогенной нагрузке на окружающую среду.

АНАЛИЗ

Одним из ключевых критериев выбора вида транспорта является его удобство для пассажиров, которое, в рамках методики оценки эффектов от реализации проектов строительства новых линий пассажирского магнитолевитационного транспорта, измеряется с помощью интегрального показателя потребительской привлекательности (далее – ИППП). Сущность данного показателя заключается в оценке места отдельного вида транспорта в перевозках пассажиров на отдельном направлении. ИППП учитывает такие параметры, как:

- годовой пассажиропоток на маршруте;
- частота курсирования подвижного состава;
- время в пути между конечными точками маршрута;
- количество пересадок на маршруте;
- стоимость проезда по маршруту.

С учетом коэффициентов ценности параметров ИППП рассчитывается для всех вариантов маршрутов для определенного направления – как прямых, так и с пересадками, в том числе с использованием различных видов транспорта.

Важным для расчета ИППП является определение границ направления, в рамках которых осуществляется расчет. Поскольку методика оценки эффектов от реализации проектов строительства новых линий пассажирского магнитолевитационного транспорта предполагается к использованию для новых линий магнитолевитационного транспорта, то в качестве границ выступает зона тяготения маршрута строительства новой линии пассажирского магнитолевитационного транспорта. При этом принимаются во внимание его конечные и пассажирообразующие промежуточные остановочные пункты [8, 9].

В целях дальнейшего анализа составляется матрица объемов пассажиропотока и параметров транспортных услуг по всем альтернативным видам транспорта, задействованным на исследуемом маршруте (Табл. 1) [10].

Таблица 1. Пример матрицы объемов пассажиропотока и параметров транспортных услуг по видам транспорта, курсирующим на маршруте

№ п/п	Наименование параметра	Вид пассажирского транспорта		
		Метрополитен	Муниципальный автобус	Коммерческий автобус
1	Годовой пассажиропоток на маршруте, тыс. чел.	1 000	200	400
2	Частота курсирования подвижного состава, мин	1-3	20	10
3	Время в пути, мин	20	45	35
4	Количество пересадок	0	1	0
5	Стоимость проезда, руб.	45	40+40	50

Пример расчета ИППП по видам транспорта, курсирующим на исследуемом маршруте, приведен в Табл. 2. Пример сравнения годового пассажиропотока и ИППП, полученных в Табл. 2, по видам транспорта, курсирующим на маршруте, графически представлен на Рис. Данный рисунок иллюстрирует зависимость пассажиропотока от ИППП.

Таблица 2. Пример расчета интегрального показателя потребительской привлекательности по видам транспорта, курсирующим на исследуемом маршруте

№ п/п	Наименование параметра	Вид пассажирского транспорта								
		Метрополитен			Муниципальный автобус			Коммерческий автобус		
		значение параметра	ценность параметра	удовлетворенность пассажиров	значение параметра	ценность параметра	удовлетворенность пассажиров	значение параметра	ценность параметра	удовлетворенность пассажиров
1	Годовой пассажиропоток на маршруте, тыс. чел.	1000			200			400		
2	Частота курсирования подвижного состава, мин	1-3	1	96,4	20	0,5	63,3	10	1	75,1
3	Время в пути, мин	20	1	96,3	45	0,44	68,5	35	0,5714	75,7
4	Количество пересадок	0	1	100	1	0,5	100	0	1	100
5	Стоимость проезда, руб.	45	1	74,7	80	0,56	67,9	50	0,9	67,6
	ИППП	367			150			279		

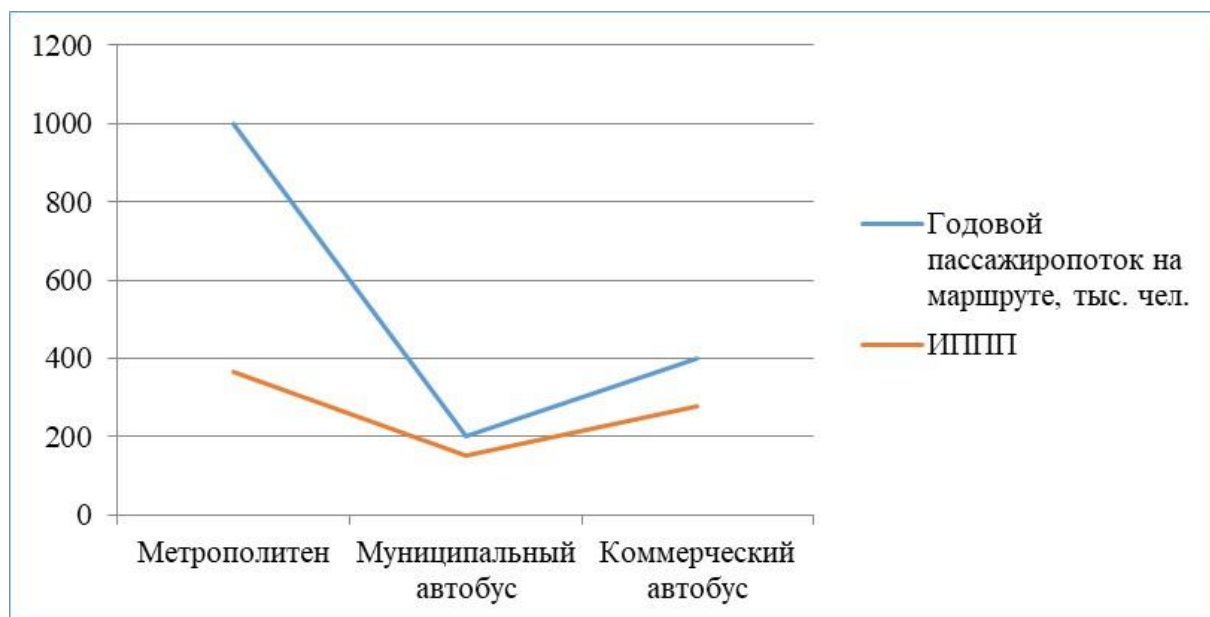


Рис. Пример сравнения годового пассажиропотока и ИППП по видам транспорта, курсирующим на маршруте

В связи с тем, что востребованность вида транспорта (маршрута) имеет тесную корреляцию с величиной ИППП в сравнении с альтернативными вариантами поездки, то можно сделать следующие выводы:

1. ИППП нового вида транспорта на рассматриваемом маршруте должен быть не ниже аналогичного показателя других видов транспорта, если предполагается не только привлечение значительного пассажиропотока, но и обеспечение прибыльности его функционирования;

2. Максимизация значений ИППП достигается оптимизацией ключевых параметров для каждого из проектируемых маршрутов и основывается на всестороннем анализе данных социологических опросов и конкурентных преимуществ уже функционирующих видов транспорта.

Если ИППП магнитолевитационного транспорта отражает объективные преимущества его использования перед альтернативными вариантами, то практическую пользу от его внедрения можно оценить посредством прямых и косвенных (аддитивных) эффектов.

Основой для расчета прямых эффектов является количественная оценка миграции пассажиров на магнитолевитационный транспорт. Для этого необходимо, в первую очередь, определить параметры зоны тяготения линии магнитолевитационного транспорта: численность пассажиров иных видов общественного транспорта, а также численность пользователей личного автомобильного транспорта, готовых перейти на общественный транспорт при соблюдении ряда условий – изменений в параметрах времени в пути, количестве пересадок, стоимости проезда.

Основой для оценки миграции пассажиров являются результаты социологических исследований.

Географический размах зоны тяготения для пассажиров общественного транспорта определяется параметрами ИППП, основными из которых являются стоимостной и временной. Для очерченной зоны тяготения осуществляется расчет ИППП с включением в расчет магнитолевитационного транспорта. В соответствии с ИППП магнитолевитационного транспорта осуществляется пропорциональное перераспределение пассажиропотока.

Для пользователей личного автомобильного транспорта расчет зоны тяготения определяется временным параметром, а также сравнительной стоимостью поездки. Численность пользователей личного автомобильного транспорта, переходящих на магнитолевитационный транспорт, определяется на основе числа пользователей, готовых перейти на общественный транспорт при улучшении качества поездки по временным и стоимостным параметрам, и средней загрузки автомобиля.

Основным эффектом для пассажиров, осуществляющих поездки общественным транспортом, является повышение уровня комфортности поездки. Данный эффект является результатом увеличения предложения транспортных услуг и приводит к снижению загрузки транспортных средств.

Оценка эффекта осуществляется на основе данных о пиковой загрузке на существующих линиях общественного транспорта и расчете прогнозируемой загрузки в результате перераспределения пассажиропотоков между различными видами транспорта.

Для других видов общественного транспорта положительным эффектом от перераспределения пассажиропотоков является «обрезка» пиковых объемов перевозки, что выражается в снижении потребности в избыточном подвижном составе, который на текущий момент эффективно выполняет свои функции только в часы пик.

Расчет данного эффекта осуществляется на основе определения потребного количества подвижного состава с учетом пиковых объемов перевозок (после перераспределения пассажиропотоков) и установленного уровня загрузки транспортных средств (на уровне не выше текущего – до перераспределения пассажиропотоков).

В качестве прямого эффекта для улично-дорожной сети выступает снижение количества транспортных средств, возникающее в результате отказа пассажиров от личного автомобильного транспорта в пользу магнитолевитационного.

Расчет эффекта осуществляется как отношение переходящих на общественный транспорт пользователей личных автомобилей и средней загрузки автомобилей в данном регионе / городе. Эффект рассчитывается

только для основных магистралей, по которым осуществляется массовая маятниковая миграция.

Возникновение аддитивных эффектов обуславливается перебалансировкой системы транспортного обслуживания населения. В результате ввода в эксплуатацию магнитолевитационной магистрали и последующего перераспределения пассажиропотоков будут изменяться значения компонентов ИППП для остальных видов транспорта [11, 12].

Эффекты, возникающие при строительстве линии магнитолевитационного вида транспорта, направлены на пассажиров, другие виды транспорта, ситуацию (загрузку) на улично-дорожной сети и отражены в Табл. 3.

Таблица 3. Состав и характеристика прямых и косвенных эффектов, возникающих при строительстве линии магнитолевитационного вида транспорта

№ п/п	Эффект	Тип эффекта	Порядок расчета (в долях единицы)
1	Изменение уровня комфортности поездки	прямой	Средняя загрузка транспортных средств в час пик после ввода в эксплуатацию магнитолевитационной линии к аналогичному показателю до ввода в эксплуатацию магнитолевитационной линии
2	Изменение потребности в подвижном составе	прямой	Рабочий парк транспортных средств на маршруте с учетом резерва в час пик после ввода в эксплуатацию магнитолевитационной линии к аналогичному показателю до ввода в эксплуатацию магнитолевитационной линии
3	Изменение трафика на улично-дорожной сети	прямой	Длительность проезда через наиболее «узкое место» на маршруте после ввода в эксплуатацию магнитолевитационной линии к аналогичному показателю до ввода в эксплуатацию магнитолевитационной линии
4	Изменение затрат на маятниковую миграцию	косвенный	Удельная стоимость поездки (тарифа) после ввода в эксплуатацию магнитолевитационной линии к аналогичному показателю до ввода в эксплуатацию магнитолевитационной линии
5	Изменение непрямых народнохозяйственных затрат	косвенный	Удельная внешняя стоимость поездки (по заработной плате) после ввода в эксплуатацию магнитолевитационной линии к аналогичному показателю до ввода в эксплуатацию магнитолевитационной линии

В результате расчетов по каждому виду транспорта формируются следующие показатели [13]:

- показатели финансовой эффективности инвестиционного проекта (NPV, IRR, срок окупаемости);
- интегральный показатель потребительской привлекательности;
- кумулятивный эффект.

Кумулятивный эффект рассчитывается как произведение значений прямых и косвенных эффектов. Положительный вклад новой магистрали в повышение качества транспортного обслуживания населения принимается при значении показателя меньше единицы, отрицательный – при значении больше единицы. При сравнении альтернативных вариантов кумулятивный эффект с наименьшим значением является наиболее предпочтительным.

Комплексность методики обеспечивается расчетом следующих дополнительных эффектов, представленных в Табл. 4.

Таблица 4. Дополнительные эффекты, возникающие при строительстве линии магнитолевитационного вида транспорта

№	Эффект	Сущность	Порядок оценки
Улучшение условий транспортной доступности			
1	Число жителей, обеспеченных скоростным пригородно-городским общественным транспортом	Улучшение транспортной доступности агломераций посредством скоростного транспорта	Численность населения районов тяготения
2	Сокращение времени на связь с городской агломерацией	Снижение времени, необходимого для поездки в городскую агломерацию	Разница между временем в пути на существующих видах транспорта и на маглеве
3	Изменение провозной способности на связи с городской агломерацией	Увеличение предложения пассажиро-мест общественного транспорта, повышение комфорта пассажиров	Разница между наличной и будущей провозной способностью по количеству мест (в час, сутки), изменение загрузки транспортных средств в пиковые часы
Производственные эффекты			
1	Провозная способность	Предложение пассажиро-мест	Расчетный параметр
2	Объем дотаций	Объем дотаций на компенсацию потерь от тарифного регулирования	Разница между тарифом для льготных категорий и базовым тарифом, умноженная на прогнозную величину перевозок льготников

№	Эффект	Сущность	Порядок оценки
3	Снижение аварийности	Снижение аварийности в связи со снижением трафика	Произведение: аварийность на 1000 транспортных средств, снижение количества транспортных средств
<i>Экологические эффекты</i>			
1	Снижение выбросов CO ₂	Снижение выбросов CO ₂ : - за счет уменьшения пробега автомобилей при переходе на новый вид транспорта; - за счет уменьшения количества автобусов	Произведение: нормы выброса по классам ТС, протяженность автомобильных и автобусных маршрутов, объем снижения использования автомобилей и автобусов
2	Снижение выбросов иных вредных веществ (пыль, тяжелые металлы) и снижение акустического загрязнения	Снижение выбросов: - за счет уменьшения пробега автомобилей при переходе на новый вид транспорта; - за счет уменьшения количества автобусов	Произведение: объемы выбросов по видам транспортных средств, протяженность автомобильных и автобусных маршрутов, объем снижения использования автомобилей и автобусов

Совокупность представленных эффектов позволяет объективно оценить выгоды от внедрения нового вида транспорта в систему транспортного обслуживания населения на отдельном маршруте, что создает предпосылки для использования разработанной методики в практической деятельности [14, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика оценки эффектов от реализации проектов строительства новых линий пассажирского магнитолевитационного транспорта является универсальным инструментом для оценки эффективности осуществления транспортных проектов на выделенных линиях (маршрутах). Показатели, приведенные в методике, ориентированы на магнитолевитационный транспорт, поэтому ряд вопросов, в частности, выбросы, в расчетах игнорируются. При использовании методики для иных видов транспорта требуется корректировка показателей в соответствии с особенностями данных видов транспорта.

Методика рекомендуется к использованию при анализе вариантов организации транспортного обслуживания на магистральных линиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Научно-образовательного инженерного кластера «Российский Маглев».

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. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г.: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р [Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 g.: utv. Rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 22.11.2008 g. № 1734-r. [Internet]. (In Russ)]. Доступно по: http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13008. Ссылка активна на: 12.03.2020.
2. Паспорт национального проекта «Цифровая экономика Российской Федерации» [Электронный ресурс]. [Pasport nacional'nogo proekta "Cifrovaya ekonomika Rossijskoj Federacii" [Internet] (In Russ.)]. Доступно по: <https://digital.gov.ru>. Ссылка активна на: 12.03.2020.
3. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Роль и место грузового магнитолевитационного транспорта в мировой экономике // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 106–117. [Smirnov SA, Smirnova OYu. Magnetic Levitation Cargo Transport Role in World Economy. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):106-117. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201952106-117
4. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Морозова Е.И., Талашкин Г.Т. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны. – СПб: НП-Принт, 2015. – 140 с. [Zaitsev AA, Sokolova IV, Morozova EI, Talashkin GT. Magnitolevitatsionnyi transport v edinoi transportnoi sisteme strany. St. Petersburg: NP-Print; 2015. 140 p. (In Russ.)].
5. Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: ответ на вызовы времени // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 5–19. [Zaitsev AA. Magnitolevitatsionnyy transport: otvet na vyzovy vremeni. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(1):5-19. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst2017315-13
6. Вакуумно-левитационные транспортные системы: научная основа, технологии и перспективы для железнодорожного транспорта: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / Под ред. Лапидуса Б.М., Нестерова С.Б. – М.: ООО «РАС», 2017. – 192 с. [Lapidus BM, Nesterov SB, editors. *Vakuumno-levitatsionnye transportnye sistemy: nauchnaya osnova, tekhnologii i perspektivy dlya zheleznodorozhnogo transporta: kolektivnaya monografiya chlenov i nauchnykh partnerov Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD"*. Moscow: OOO RAS; 2017. (In Russ.)].

7. Глазьев С.Ю. Трансформация международных отношений в условиях смены технологических укладов. [Glaz'yev SYu. Transformatsiya mezhdunarodnykh otnosheniy v usloviyakh smeny tekhnologicheskikh ukladov. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.myshared.ru/slide/983569>. Ссылка активна на 12.03.2020.
8. Цифровая экономика: глобальные тенденции и практика российского бизнеса: материалы исследования / отв. ред. Д. С. Медовников. – М.: Институт менеджмента инноваций НИУ ВШЭ, 2019. – 121 с. [Medovnikov DS, editor. Cifrovaya ekonomika: global'nye tendencii i praktika rossijskogo biznesa: materialy issledovaniya. Moscow: NIU VSHE; 2019. 121 p. (In Russ.)].
9. Аброскин А.С., Зайцев Ю.К., Идрисов Г.И. и др. Экономическое развитие в цифровую эпоху. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2019. – 88 с. [Abroskin AS, Zajcev YuK, Idrisov GI, et al. Ekonomicheskoe razvitie v cifrovuyu epohu. Moscow: Delo; 2019. 88 p. (In Russ.)]. ISBN: 978-5-7749-1451-7.
10. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. [Ofitsial'nyy sayt Federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.gks.ru/>. Ссылка активна на 12.03.2020.
11. Журавлева Н.А. Методология исследования цифровой трансформации в условиях дестабилизации бизнес-моделей транспортных организаций. В кн.: Методология развития экономики, промышленности и сферы услуг в условиях цифровизации / под ред. Бабкина А.В. – СПб: СПбПУ, 2018. – С. 10–47. [Zhuravleva NA. Metodologiya issledovaniya cifrovoj transformacii v usloviyah destabilizacii biznes-modelej transportnyh organizacij. In: Babkin AV, editor. Metodologiya razvitiya ekonomiki, promyshlennosti i sfery uslug v usloviyah cifrovizacii. St. Petersburg: SPbPU, 2018. pp. 10-47 (In Russ.)].
12. Журавлева Н.А., Панычев А.Ю. Проблемы экономической оценки скорости в транспортно-логистических системах в новом технологическом укладе // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 150–178. [Zhuravleva NA, Panychev AY. Problems of economic assesment of speed in transport and logistical systems in the new technological paradigm. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(4):150-178. (In Russ., Engl.). doi: 10.17816/transsyst201734150-1787
13. Терешина Н.П., Галабурда В.Г., Трихунков М.Ф. и др. Экономика железнодорожного транспорта / под ред. Терешиной Н.П., Лapidуса Б.М., Трихункова М.Ф. – М: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2006. – 801 с. [Tereshina NP, Galaburda VG, Trikhunkov MF. Ekonomika jeleznodorojnogo transporta. Tereshina NP, Galaburda VG, Trikhunkov MF, editors. Moscow: UMC po obrazovaniyu na jeleznodorojnom transporte; 2006. 801 p. (In Russ.)].
14. Патент РФ на изобретение № 2549317 / 27.04.2015. Бюл. № 12. Ким К.К., Титова Т.С. Транспортная система на электродинамическом подвесе. [Patent RUS № 2549317 / 27.04.2015. Byul. № 12. Kim KK, Titova TS. Transportnaya sistema na ehlektrodinamicheskom podvese. (In Russ.)]. Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/254/2549317.html>. Дата обращения: 12.03.2020.
15. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения. – М: Физматлит; 2015. – 612 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. Magnitolevitatsionnyy transport: nauchnyye problem i tekhnicheskiye resheniya. Moscow: Fizmatlit; 2015. 612 p. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Смирнов Сергей Александрович; старший научный сотрудник;
адрес: 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9;
eLibrary SPIN: 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Смирнова Ольга Юрьевна; научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Соколова Яна Викторовна; кандидат экономических наук, MBA
eLibrary SPIN: 2817-4647; ORCID: 0000-0002-1230-1893;
E-mail: nozpgups@gmail.com

Information about the authors:

Sergey A. Smirnov, Leading Researcher;
eLibrary SPIN: 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Olga Yu. Smirnova, Senior Researcher;
eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Iana V. Sokolova, PhD in Economics, MBA;
eLibrary SPIN: 2817-4647; ORCID: 0000-0002-1230-1893;
E-mail: nozpgups@gmail.com

Цитировать:

Смирнов С.А., Смирнова О.Ю., Соколова Я.В. Методика оценки эффектов от реализации проектов строительства новых линий пассажирского магнитолевитационного транспорта // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 161–173. doi: 10.17816/transsyst202061161-173

To cite this article:

Smirnov SA, Smirnova OYu, Sokolova IaV. Approach of Evaluation the Effects from Implementation the Projects of Construction New Passenger Maglev Lines. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):161-173. doi: 10.17816/transsyst202061161-173