

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

MODERN
TRANSPORTATION
SYSTEMS AND
TECHNOLOGIES
peer-review journal

transsyst.ru

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

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

«ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

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

ИНДЕКСАЦИЯ

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

КОНТАКТЫ

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

Научный редактор Ю. Ф. Антонов, доктор технических наук, профессор
Перевод на английский язык А. Ю. Гнатенко
Выпускающий редактор Т. С. Антонова
Редактор сайта А. В. Дитрихс
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://transysst.ru/>
Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://transysst.ru/transysst/about/submissions>

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 7, № 3

2021

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

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

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Мыльников Сергей Владимирович, к.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;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ELECTRONIC PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL

FOUNDER AND PUBLISHER

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

“MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES”

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

INDEXING

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

CONTACTS

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

Science Editor 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://transsyst.ru/transsyst/about/submissions>)

MODERN TRANSPORTATION
SYSTEMS AND TECHNOLOGY

Vol. 7, Issue 3

2021

ELECTRONIC PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF

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

THE SCIENTIFIC EDITOR

Viktor Nikitin, Dr.Sc., Professor, St. Petersburg, Russia

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Aleksandr Bogdanov, Dr. Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;
Vladimir Vereskun, Dr. Sc., Professor, Rector of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Rivner Ganiev, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc..., Professor, Director Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
Johannes Kluehspies, 2nd Dr.'s Degree, Full Professor at Deggendorf Institute of Technology, Munich, Germany;
Vladimir Kolesnikov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc..., Professor, the President Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Irina Kruchinina, Dr.Sc., Acting Director of Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia;
Guobin Lin, PhD, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Director, Professor, Tongji University, Shanghai, China;
Wei Li, Ph.D., Professor, Beijing Jiaotong University, Beijing, China;
Zhixun Ma, PhD, Associate Professor, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Tongji University, Shanghai, China;
Radik Mulyukov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Physics and Mathematics, Director of Superplasticity Metals Institute for Metals Superplasticity Problems at RAS, Ufa, Russia;
Sergey Mylnikov, PhD, Associate professor, Scientific secretary LCC “Eco-Vector”, St. Petersburg, Russia;
Vladimir Nikitenko, Dr. Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics Russian University of Transport, Moscow, Russia;
Fei Ni, PhD, Assistant Researcher, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center, Tongji University, Shanghai, China;
Aleksandr Panychev, PhD, Associate professor, rector Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;
Viktor 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 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Транспортные и транспортно-логистические системы Озбек Р., Кодар М.Ю. Сравнение Hyperloop и существующих транспортных средств с точки зрения безопасности и затрат	5	Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Transport and Transport & Logistics Systems Özbek R., Çodur M.Y. Comparison of hyperloop and existing transport vehicles in terms of security and costs
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов Аверченко Г.А, Борисов В.А., Васильев К.А. Капитальное восстановление массивных опор мостов	30	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Design and Construction of Roads, Subways Averchenko G.A., Borisov V.A., Vasiliev K.A. Major restoration of massive bridge supports
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Волкова Е.М. Факторы, определяющие успех реализации проектов строительства высокоскоростных магистралей	56	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Volkova E.M. Factors determining the success of HSR building projects
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ		ORIGINAL STUDIES
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Электротехнический комплекс магнитолевитационного подвижного состава	76	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Engineering Kireev A.V., Kozhemyaka N.M., Kononov G.N. Electrotechnical complex of maglev rolling stock
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Казымов И.М., Компанец Б.С., Дробязко О.Н. Разработка устройства для контроля параметров электрической энергии в распределительной сети	106	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Engineering Kazymov I.M., Kompaneets B.S., Drobyazko O.N. Development of a device for control of electric energy parameters in the distribution network ock

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Сундуков Е.Ю., Шифрин Б.М., Сундукова В.Е. Многоканальные магнитолевитационные транспортные системы	120	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Engineering Sundukov E.Yu., Shifrin B.M., Sundukova V.E. The multichannel maglev transport systems
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Алмакки А.Н.Дж., Мазалов А.А. Улучшенный DFIG DFTC за счет использования алгоритмов суперскручивания дробного порядка в ветроэнергетических установках	131	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Engineering Almakki A.N.J., Mazalov A.A. Improved DFIG DFTC by using a fractional-order super twisting algorithms in wind power applications
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника Лычковский А.А. Модернизация комплексной технологии возведения земляного полотна	150	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Engineering Lychkovskiy A.A. Modernization of the complex technology of construction of the roadbed
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов Яшнов А.Н., Иванов А.Н. Струнные пролетные строения для магнитолевитационного транспорта	158	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Design and Construction of Roads, Subways Yashnov AN, Ivanov AN. String superstructures for maglev transport
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Чеченова Л.М. Стратегические приоритеты ОАО «Российские железные дороги» в области устойчивого развития	169	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Chechenova LM. Strategic priorities of JSC “Russian Railways” in the sustainable development

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS
Field – Transport and Transport & Logistics Systems

DOI 10.17816/transsyst2021735-29

© R. Özbek, M. Y. Çodur
Erzurum Technical University
(Erzurum, Turkey)

COMPARISON OF HYPERLOOP AND EXISTING TRANSPORT VEHICLES IN TERMS OF SECURITY AND COSTS

Abstract. Technological developments have increased the possibilities, comfort, reliability, and speed of the transportation network in the world. Today, various transport vehicles try to meet the speed, economy, and safety demands of passengers. However, as the passengers' demand increase depending on the population, the requirement for innovation in this field increases. Various studies have been carried out to determine the benefit-cost ratio of Hyperloop, an alternative developed to meet the speed requirement in this respect. The decision to build the Hyperloop anywhere else in the world depends on the system's characteristics, such as sustainability, economy, safety, and response to passenger demands. In this study, Hyperloop and existing systems were compared with comfort, safety, and cost considering these criteria. It was focused on the commercial planes, Maglev, and high-speed train features, as they are similar to Hyperloop in these comparisons. Based on the relevant data, it has been reached that the Hyperloop system could prevent it from becoming a widespread public transport vehicle because of its low passenger capacity and expensive construction and operation.

Key words: feasibility, g-force, high-speed train, Hyperloop, Maglev, pressure, security.

INTRODUCTION

The movement of people and goods has increased day by day with the growth of the world population. This increase has led to the development of technology toward increasing transportation capacity and speed. However, developing technologies are in a race not only in speed but also in comfort, safety, and energy efficiency. The latest and most prominent of these technological advances is Hyperloop. Hyperloop was introduced to a high-speed tube transportation system supported by Elon Musk in 2013. There have been many studies from investors and student initiatives in many countries after it was announced the transportation concept in the Hyperloop Alpha report by Elon Musk. Currently, there are 8 companies in 6 countries (USA, China, Canada, Netherlands, Spain, Poland) working on Hyperloop, over 50 university teams, and over 1000 employees involved in R&D [1]. In this respect, this study was written in order to present the advantages and disadvantages of existing systems and Hyperloop and to contribute to the feasibility studies.

HYPERLOOP HISTORY

Different infrastructures and projects had been presented for a tube transportation idea since 1799 before Elon Musk. The idea of moving freights through cast-iron pipes using air pressure was proposed by George Medhurst in 1799. A railway station was built in London for the purpose of transporting passengers with a pneumatic system in 1844. In the mid-1850s, more pneumatic railroads were built in various places such as Dublin, London, and Paris. Crystal Palace atmospheric railway was constructed in the mid-1860s in South London. New York's oldest subway, the Beach Pneumatic Transit, which served from 1870 to 1873, was developed by Alfred Ely Beach. This underground pneumatic public transport system had a stop in the basement and a one-car shuttle that used compressed air to move. Pneumatic tube systems became common in use for delivering mail and other messages in most major cities in the late 19th century. Some of them are still used today in banks, hospitals, and factories. A train that could travel on magnets in a vacuum-sealed tunnel was designed in 1910 by American rocket pioneer Robert Goddard. The project, which was planned to travel from Boston to New York in 12 minutes, was never realized due to budget constraints and politics. In the early 1990s, a vacuum train system was designed to reduce the travel time to 45 minutes between New York and Boston by researchers at MIT. In the early 2000s, a pneumatic-and-maglev train consisting of car-sized capsules in elevated tubes was designed by ET3 transport company. The food tubes project concept was designed to carry food by traveling 60 miles per hour underground in 2010. If it was built in England, which would have cost \$8 million per mile. A concept called Hyperloop that using magnetic rails in a vacuum-sealed tunnel with a capacity of 28 passengers in each capsule was proposed by Elon Musk in 2013. A submarine railway project that would run at a theoretical speed of 1,240 mph, much faster than Musk's Hyperloop concept was proposed by researchers from the Chinese Academy of Sciences in 2017 [2]. The underwater tests were determined reactions to waves and whether any movements of the Hyperloop allow the “pods” to travel through the tube safely and at sufficient speed by the Netherlands Institute of Marine Research (Marin) in 2019 [3].

Hyperloop first appeared as a vactrain idea by inventor and rocket scientist Robert Goddard in 1904, when he was a first-year physics student at the Worcester Polytechnic Institute in Massachusetts. He presented his idea to Scientific American in 1906. Later, this idea of transportation was taken up by the American physicist Robert M. Salter in 1972-1978 and most recently by Elon Musk in 2013. There are other initiatives on this topic, but this is the most similar attempt to Musk's proposal. Salter's proposals also include estimates of the project construction and the transportation charges to passengers to generate revenue and offset costs for 1972-1978. It was estimated that the transportation system between New York and Los Angeles would be between \$250-500 billion

in 1978 (between \$1 trillion and \$2 trillion, according to 2019 inflation). It was suggested an initial collaboration with the military to create and use these underground tunnels to transport resources (transport materials such as gas, water, and electricity, and they would pay for usage with fees) across the United States to pay for the project by Salter. It was estimated that \$50 would pay for each passenger (the US \$200 in 2019), and \$5.3 billion will be gained annually by carrying 300,000 people from 100 passengers per vehicle per day in the project. However, this project was never built in actual life because of public and cost policies [4].

There have been many feasibility studies of many entrepreneurs for market search in several countries of the world since it was published a white paper by Elon Musk. It was planned to build a 65 km Hyperloop line that could help revive the 21st-century Silk Road between Russia and China, which would be cost about \$1.5-2.3 billion, in 2017 [5]. It was planned a 150km system between Abu Dhabi and Dubai which would reduce to 12 minutes' travel time, would be cost about \$20 to \$40 million per km, by the Hyperloop Transport Technology company in 2019 [6,7]. The Hyperloop system which would reduce to 25 minutes travel time to be ready by 2029 for the 148 km corridor between Mumbai-Pune has been negotiated by Hyperloop One company and India's government officials [8,9]. The Netherlands has become one of the important representatives of Hyperloop in Europe [10] (Tab. 4).

HyperPoland company, which is interested in Hyperloop technology in Poland, presented the idea of realizing Hyperloop in 3 steps. In the first step, it has been planned to implement the hybrid system known as Magrail, which would increase the speed of the train to 300-415km/h with the passive magnetic lift pod, which would be positioned in the middle of the existing traditional train tracks, in 5-8 years. The cost has been estimated to be between 6 million and 8 million Euros per kilometer, excluding additional structures. In the second step, the Hyperrail system, which has been planned to reach a speed of 600-1000 km/h, has been aimed to be implemented by closing Magrail with vacuum tunnels. In the third and last step, it has been planned to realize the Hyperloop that the special infrastructure surrounded by vacuum tubes that would enable acceleration to 1200 km/h [11].

HIGH-SPEED TRAIN HISTORY

Japanese Tokaido Shinkansen, which was opened in 1964 between Tokyo and Osaka, is considered the world's first modern and commercial high-speed train. France was the first country to introduce the first commercial HSR line (for passengers) in Europe in 1981 after a few diverse initiatives. The system used in France, unlike the Japanese system, is fully compatible with the existing railway network, so the use of the same standard dimensions reduced construction costs. Germany was the next country to launch HSR with the

InterCity Express (ICE) connecting Hannover and Würzburg, beginning service in 1991. Spain integrated French and German technology with a system akin to Japanese technology between Madrid and Sevilla by opening the Alta Velocidad Española (AVE) in 1992 [12].

MAGLEV HISTORY

Maglev technology was first patented in 1969 by two American scientists, James R. Powell and Gordon T. Danby. Germans and Japanese spearheaded further development in the early 1970s [13]. In the early 1970s, Germany created the Transrapid train, which was the world's first Magnetic Levitation rail system. The concept of this system had patented in 1934 by Hermann Kemper in addition, there are many scientific patents and studies that contribute to the development of Maglev in many parts of the world [12,14]. Transrapid train technology is based on the attractive electromagnetic forces (EMS) levitation of trains over ferromagnetic guideways with an apart levitation and guidance technology. Shanghai Pudong Airport Transrapid, which has been operating in China since 2003, is the only commercial line using transrapid technology [12]. In 1984 the first commercial Maglev line was opened in Birmingham, England, but was closed in 1995 as it was deemed unreliable[14,15]. Japan, developing High Speed Surface Transport (HSST) technology based on EDS technology in 1972, opened its first commercial line HSST Linimo in Nagoya in 2005. After HSST Limino, the second commercial line, Incheon Airport Maglev, was opened in South Korea. The desire to develop a simplified and more economical Maglev has led the USA to build the Inductrack, a repulsive force electrodynamic magnetic levitation system (EDS) that has never been a reality. Inductrack is a cheaper EDS besides it has auxiliary wheels support in situations that may cause decreased levitation, such as system failure or low speed. A new dynamic superconducting EDS, the SCMAGLEV, was also designed by Japan. In this case, the train is fitted with some superconducting magnets in its bogies, which enable the vehicle to raise about 10 cm above the guides and use an asynchronous ironless motor to propel it. The Chuo Shinkansen, the world's first commercial SCMAGLEV intended to span the Tokyo-Nagoya distance, has been under construction since 2014 and was projected to open in 2027, extending to Osaka in 2045 [12].

MAGLEV SYSTEM

Hyperloop is designed magnetism-based and inside a vacuum-sealed tube to increase the efficiency of Maglev and its derivatives. Maintenance costs and energy losses due to friction are low as both systems because of based on magnetism. Maglev technology is based on 3 basic principles; The principle of magnetic levitation, lateral guidance, and repulsion (Fig.1).

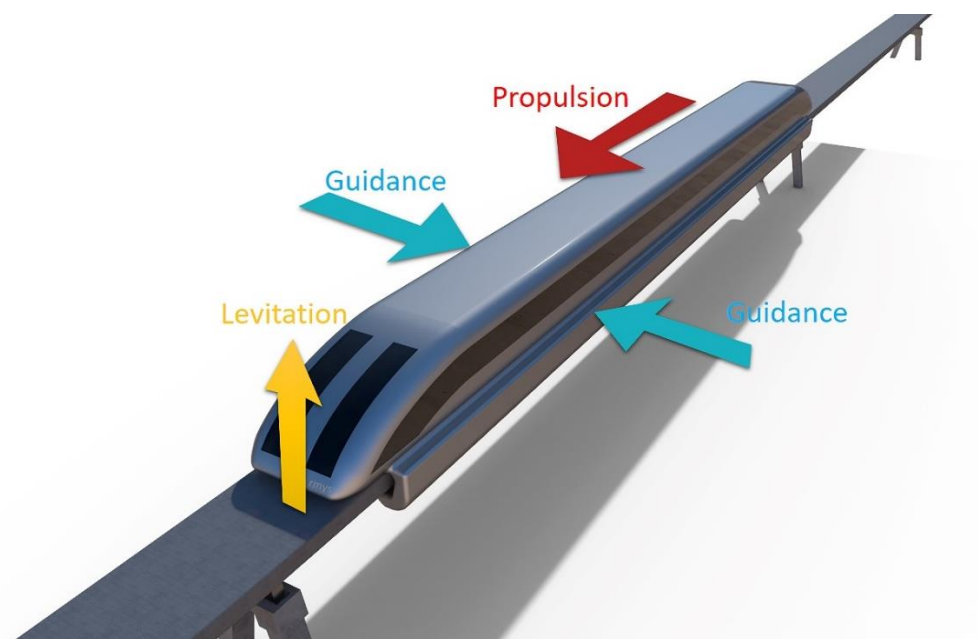


Fig. 1. Maglev technology principle(redraw) [16]

The Maglev system can be classed as an electrodynamic suspension (EDS) system, an electromagnetic suspension (EMS) system, a permanent magnet electrodynamic suspension system (PM-EDS), or a hybrid electro-magnetic suspension system (HEMS), depending on the mechanism employed to achieve levitation [17]. EDS and EMS, which are two fundamental levitation technologies, are focused on in this study (Fig. 2).

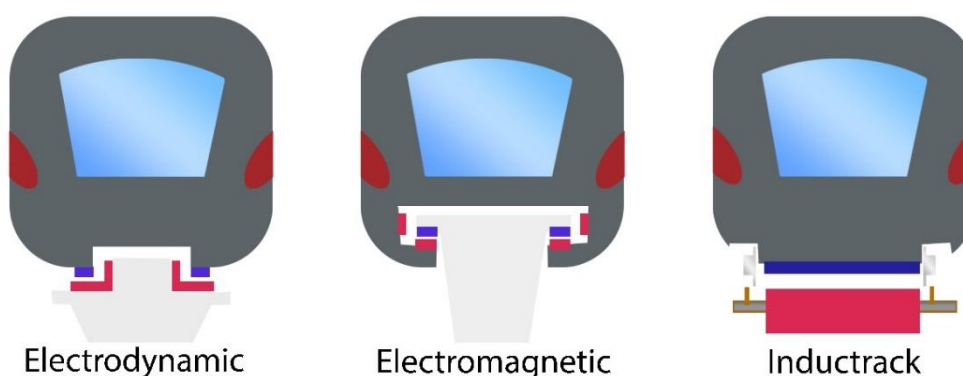


Fig. 2. Levitation techniques

EMS system employs magnetic attractive forces for accomplishing levitation. Magnetic attractive forces occur as a result of interaction between the guideway and the on-board electromagnets assembled below the guideway, as shown in Fig. 3. Standard electromagnets are used, which need an electrical power source to be active. It occurs 10-15 mm thick levitation thanks to magnetic attractive forces. However, as the speed of the train increases, it

becomes difficult to control the air gaps, which leads to a lack of stability. The advantage of EMS is that the train can stay in the air in any situation, even at zero speed. This results in making the travel more comfortable for the passengers. The EMS system is used in the Shanghai Maglev, Korean UTM, Japanese HSST, and The German Transrapid TR09 [12,17,18].

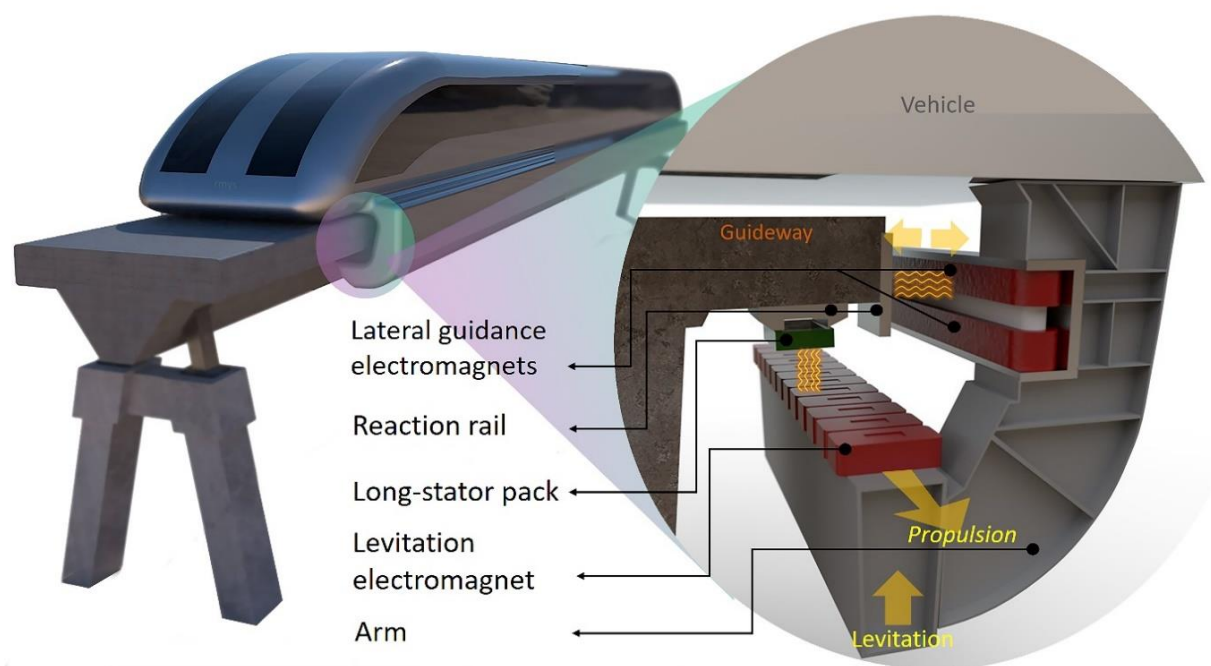


Fig. 3. Maglev EMS system modeling

EDS system uses magnetic repulsive forces to induce levitation, as shown in Figure 4. This thrust can lift the vehicle to 10 cm. It is used superconducting magnets (SCMs) in the EDS system. The powerful magnetic field created by superconducting magnets can pass through the train, cause disturbing passengers. These magnets raise the cost of the system. The system needs rubber tires until it reaches a lift-off speed. In the electrodynamic propulsion system. The levitation principle is provided by the coils placed on the sides of the guideway and the superconducting magnets on the vehicle. When the Maglev train passes at a high speed about a few cm below the center of these coils, an electric current is induced into the coils and the Maglev train is lifted into the air, allowing it to move. Lateral guidance principle; It is a necessary system to prevent lateral displacement. Electro pulling lateral guidance function in electrodynamic thrust system, lateral guidance function is provided by coils placed on both sides of the guideway [17,18].

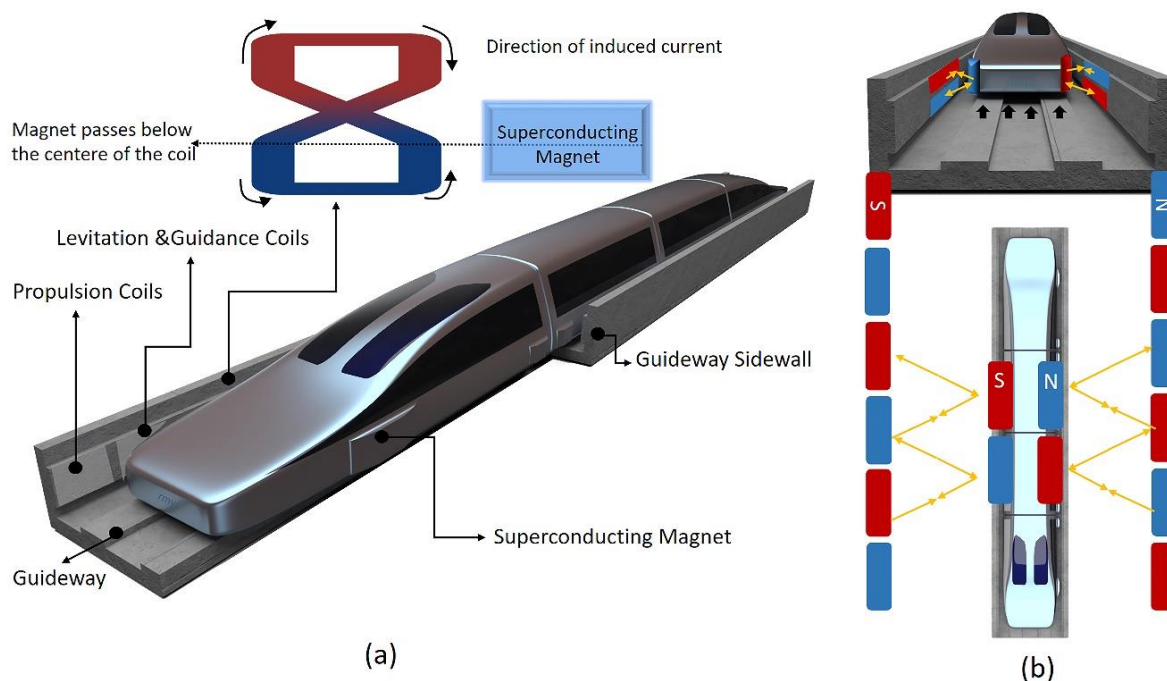


Fig. 4. Maglev EDS system modeling (general description)

The forward movement and braking of the train are the same as the electric motor in the operating principle. The motor windings lined up along the guideway function as a stator and the electromagnets on the vehicle act as a rotor. The alternating current supplied to the motor windings creates magnetic flux that moves the train. The speed of maglev trains is adjusted depending on the frequency of the alternating current and is realized by creating a magnetic force in the opposite direction of train braking [18].

HYPERLOOP SYSTEM

Hyperloop comprises capsules that create an air cushion with the help of compressors and motors in a pressure-relieved tube, reducing friction with the "air hockey" principle and providing fast transportation at maximum efficiency. It is designed in two types, cargo, and passenger. It will be built on poles that ensure the continuity and smoothness of the line at various heights from the ground. It is aimed to provide maximum energy gain by covering the top surface of the tubes with solar panels. Tubes will be made of steel material with a diameter of 3.3 meters. The surface of the tubes will be covered with solar panels that will provide both the production and storage of the energy to be used in the movement of the capsules [19]. It was stated that setting up the system on pylons would reduce the land costs (Fig. 5). However, it will require some legal regulations regarding the use of air rights. Lawyers in the USA and Dubai discuss the legal infrastructure on this issue [20].

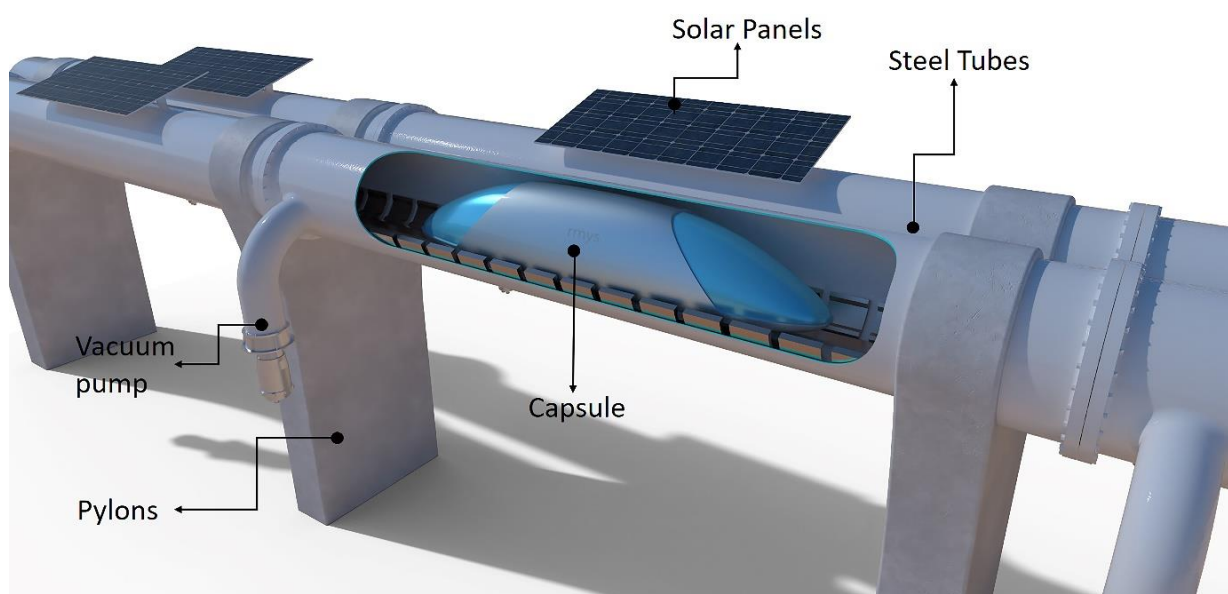


Fig. 5. Hyperloop 3D predictive modeling

In the original concept of the Hyperloop Alpha, a concept in which capsules float on a layer of compressed air has been proposed [21]. It is not yet known exactly what will happen in practice. Hyperloop Transportation Technology company talked about the Inductrack system, which it considers safe to give the same effect. In this method, magnets are placed under the capsules in a Halbach array. The magnetic force of the magnets is focused on one side of the array, while the field on the opposite side is nearly entirely cancelled out. As the capsules travel past electromagnetic coils implanted in the road, these magnetic fields allow capsules to float. The linear motors' thrust propels the capsules forward. Hyperloop One also employs a passive magnetic levitation technology, in which permanent magnets on the capsule's side repel a passive track, with the capsule's speed being the only source of energy. To aid the passage of the capsules, the air pressure in the tunnels is decreased using air pumps in both systems. Because low air pressure significantly lowers friction, relatively a little quantity of electricity is necessary to reach the greatest speeds [22].

SECURITY

Security is the most noticeable issue for Hyperloop. In case of any malfunction in the system, passengers will be at risk. Therefore, the engineering reliability of Hyperloop has been discussed in subjects such as emergency interventions, g-force, structural behavior during earthquakes.

The security performance of a transportation system is evaluated in two ways; interior security and exterior security. Interior security is concerned with

the risks of damage from the system itself. Exterior security is concerned with the potential risks of accidents caused by its environment [23]. This study has been included g-force and pressure in interior security, and earthquake factor in exterior security.

When Hyperloop is evaluated in terms of route safety, it is not affected by weather events, unlike other means of transportation. However, it is vulnerable to human influences, as with highways and rail routes. Hyperloop's high-value property may make it a target of potential terrorist attacks along the route. Additional measures should also be taken regarding this [24]. In the Hyperloop Alpha report, it is stated that the security precautions to be taken at the station will be similar to airports [19].

There is a lithium-ion battery system in the capsules to complete the travel in case of potential power outages. Also, it is claimed that the travel will be completed without requiring additional power after the pod moves in Hyperloop Alpha [19].

When an emergency occurs in a capsule on the road, the capsules are allowed to get help by contacting the station. It was stated that there were hostesses and first aid equipment in the capsules during the travel. When an emergency is encountered in an aircraft, there is a waste of time in returning the aircraft to the runway because of implementing many protocols. Therefore, it is claimed that Hyperloop can respond faster in emergencies than aircraft. However, no information has been given about how the first aid team will reach and how the communication will be with the other capsule in the depressurized tube, and how this will affect the other capsules traveling.

A similar system has also been the subject of the Maglev train. If the power from the public grid fails while the vehicle is running, only the propulsion system (motor) will not work because the vehicle levitation and guidance systems as well as all onboard equipment are powered by on-board batteries, so the vehicle continues to move forward with its current momentum. If the next station is too far away, the vehicle will automatically brake to stop at 'safe stopping area' planned for this purpose along the route [13].

NASA has calculated Hyperloop's emergency stop distances in case of system failure. Assuming that the capsules are launched every 30 seconds at a maximum speed of 295 m/s (660mph) with an acceleration of 0.5g and that the front capsule can be stopped immediately, it has been concluded that a 30-second advance is appropriate for stopping to prevent the collision [24].

PRESSURE

Hyperloop technology aims to reduce friction and increase energy efficiency and speed by depressurizing tubes with vacuum pumps. However, there are some security concerns.

According to the Hyperloop Alpha report, low pressure will be created around 0.015 psi (100 Pa, 0.75 torr) of the in-tube pressure (approximately 1/6 of the pressure on Mars or 1/1000 of the pressure on Earth) that will provide optimum airflow [19]. When this pressure value is placed in as shown in Eq. 1, it is seen that the pressure value of 100 Pascal corresponds to the flight from 32450 m above sea level (Eq. 2). This altitude is much higher than commercial airline flights (10,000m).

$$P = 101325x(1 - 2.25577 \times 10^{-5}h)^{5.25588} \quad (1)$$

Where p = air pressure (Pa) and h = height above sea level in meters (m)

$$100 = 101325x(1 - 2.25577 \times 10^{-5}h)^{5.25588} \quad (2)$$

$$h = 32450.438 \text{ meters}$$

Such low pressure can be difficult and costly to apply in large areas, especially in case of leakage [25].

Sudden pressure loss is a serious condition. The person can lose consciousness in a short time. The time between sudden pressure reduction and loss of ability to perform a beneficial activity is called "The Time of Useful Consciousness" or TUC. The action to be taken to correct the problem must be done before the TUC ends. Commercial aircraft routinely fly over distances of over 10,000 meters. TUC is less than one minute at these altitudes [26,27].

Passenger aircraft flying at 35,000 feet (10,000m) without protection causes hypoxia (oxygen deficiency), lack of vision, and death because of physical changes in the human body. However, the reason passengers are unaffected by this is that the plane has a pressurized cabin [27]. This system is undoubtedly necessary for the Hyperloop, considering during travel in the depressurized tube and the pressure balancing processes for the evacuation at the stations. However, traveling in a low-pressure environment is a proven technology thanks to airplanes. Besides having Hyperloop autonomous driving, the pressure in the tube is planned to be kept under constant control. In the event of any pressure-related mishaps on the aircraft, the life of the passengers during the TUC period will depend on the skills and expertise of the pilots. In this respect, Hyperloop is more advantageous.

EARTHQUAKE

Earthquakes are dangerous for all structures. However, road geometry and vehicle design can increase or decrease the destructive effect of the earthquake. The long side of the Hyperloop and railways has a relatively weak-inertia compared to the short side. The weak inertia side is more easily damaged during an earthquake. It can lead to fatal consequences because of the vehicle in motion overturning more easily, the train derailment, or route destruction.

Since Hyperloop is most similar to railways in terms of structure, it has the same disadvantages as railways during an earthquake. There is an existing technology used for earthquakes for high-speed trains and Maglev. This technology is suggested in Hyperloop [28]. The system is an early warning system that cuts off the train's power supply before seismic waves reach the train tracks to slow down or even stop the train as soon as possible during an earthquake. Two different seismographs are used on the Shinkansen train, positioned at regular intervals along the coastline and in transformers. This system succeeded in safely stopping the Shinkansen train, which traveled at an average speed of 320 km/h in 2011, without derailment, in an earthquake of 8.9 magnitudes [29]. Some experts believe that this system is inadequate because even if the system works properly, considering the delay time of at least 26 seconds of the system. The train may get derailed or overturned, or crash into a collapsed building when an earthquake occurs directly underneath the area where the train is running at high speed [30].

The moving tipper pylons proposed by Hyperloop Alpha for on-the-road pods are aimed at both protecting the line and ensuring the safety of passengers by reducing the effects of an earthquake and thermal expansion [19]. In severe earthquakes, it is also possible to remotely control the emergency braking systems in the capsules [24].

COMFORT

Ride comfort is a complex concept that is affected by various stimuli such as temperature, acoustic noise, arrangement of the seat, visual stimuli, humidity, odor, vibrational, and changes according to the person [31]. There are several methods used to evaluate ride comfort. The evaluation of ride comfort in terms of vibration is an influential method and is directly related to vehicle dynamics performance. Ride quality depended on people's comfort evaluation includes not only the amount of movement but also the human interaction variables. Ride comfort is usually measured by the acceleration experienced by the passenger during the movement of the vehicle. Each organ in the human body has its own frequency ranges that are sensitive to vibration, so excessive exposure to vibration will reason disturbance and health issues. The human body is much more sensitive to vertical vibrations in the 4-8 Hz frequency range. While the stomach is negatively affected by the frequencies of 5-6 Hz, the head and neck are disturbed by the frequencies of 20 Hz. These frequency investigations incorporate weighted acceleration concepts to determine the comfort level based on ISO 2631-1. It is difficult to determine the ride comfort standard on a global scale due to the vibration characteristics of the vehicle, the differences in the vehicles stability, the country-specific quality standards of the railways and roads and the technological differences in each country [32,33].

Hyperloop is not expected to generate any external noise affecting the nearby population. Since the Hyperloop does not come into contact with the tube, the absence of vibration flow and low air pressure in the tube prevents the noise from the capsule from propagating. The noise of vacuum pumps is assumed to be negligible [23]. In addition, the absence of vibration provides comfortable driving for the passenger. It can be said that the Maglev train has the same characteristics for noise and smooth ride.

The approximately 3 cm thick steel pipe used in the malfunction of the Hyperloop is a distressful situation for claustrophobia patients (Fig. 6). Herbert Einstein, US University MIT's tunneling expert, has been advocated for claustrophobia patients that progressing through a closed windowless tube is tolerable to reach the goal faster [34]. However, it may vary dramatically in severity from person to person.

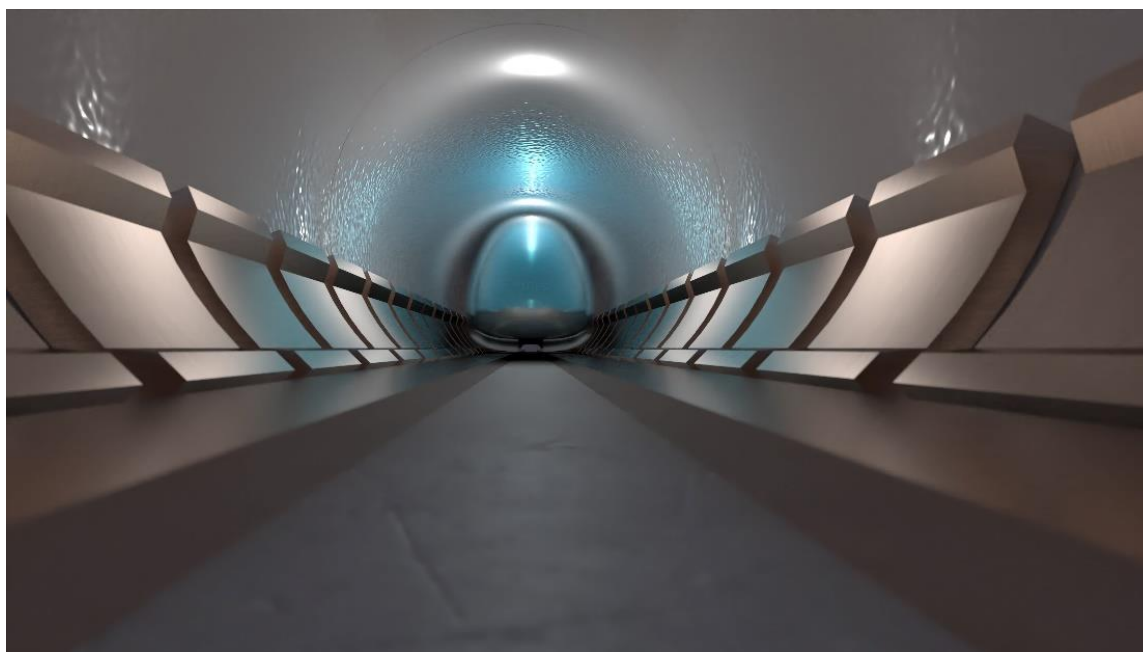


Fig. 6. Inside of the Hyperloop 3D modeling

It has been suggested that the lack of a window and focal point at which the human brain can detect the speed at high speeds can affect a person's balance, sensor, motor, and other nervous systems function [35]. Therefore, various solution suggestions have been presented on this issue. The Zoetrope technique, which was emerged in 1865, was introduced by Virgin Hyperloop One and Bjarke Ingels Group (BIG).

The pictures, each of which will be positioned 10 meters apart, are aimed to create an uninterrupted blurred view when the Hyperloop pods move fast enough [36]. Another technology proposed by the Hyperloop One company is electronic windows that show air temperature, speed, and time together with augmented reality images [37].

Lack of toilet has also been mentioned in some studies, but should not be a problem for most people traveling on trips less than an hour [24]. In addition, Maglev also has toilets for long-distance travel between cities, but not for short distances [13].

G force is a measure of comfort as well as safety in transportation. Passengers may die from internal bleeding without any physical injury during a collision due to g-force. The negative effect of the g-force on humans increases in direct proportion to the acceleration/deceleration. G-force occurs in 3 cases. Linear acceleration occurs when an object's speed increases and decreases without changing its direction in a straight line (occurs landing, taking off, braking, acceleration, deceleration). Radial acceleration occurs when an object with constant velocity changes its direction (happens in a sharp turn, pushes over into a dive, or pulls out of a dive). Angular acceleration occurs when an object both speed and direction change simultaneously (happens in spins and climbing turns) [38]. The tolerance of the force G depends on the acceleration axis, the magnitude of the acceleration, the initial velocity of the acceleration, the duration of action, and the position of the body. It is difficult to determine the G-force tolerance. Because G-force tolerance may change among individuals and fluctuate from day to day for the same person [39]. The effects of G-forces on the human body are shown in Fig. 7.

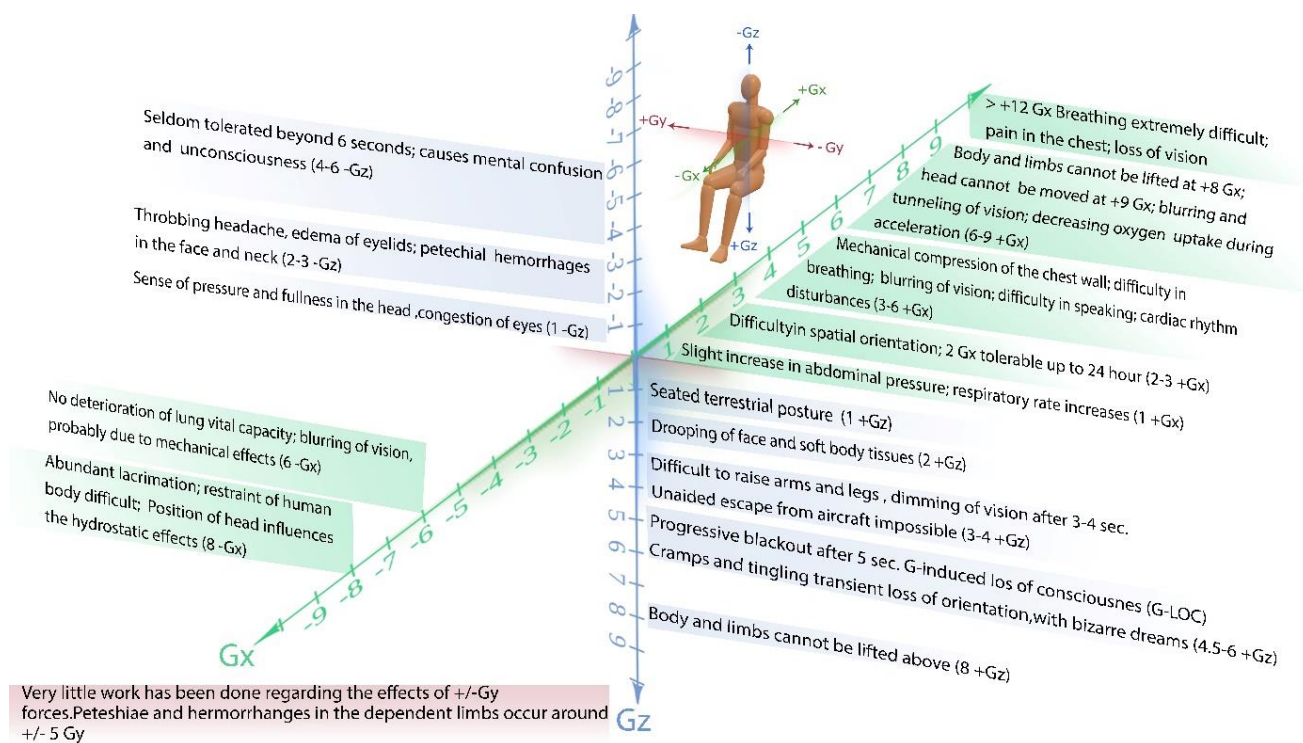


Fig. 7. The effects of G-forces on the human body

The G-force is seen in the Gx and Gy direction on highways and railways. The G-forces generated by the movement of vehicles on highways and railways are not fatal as long as there is no collision and prolonged exposure. The maximum braking acceleration that can be tolerated is 20 g for adult humans (for a short time). In terms of safety, 0.32g braking acceleration is recommended for road vehicles, and over 0.32g is disturbing. However, studies have shown that drivers decelerate above 4.5 m/s^2 at a sudden obstacle and 90% of them deceleration above 3.4 m/s^2 . These values are accelerations that can be stopped without losing control of the steering in its lane on wet surfaces [40].

While take off in a conventional aircraft will produce some increase in +Gx, and landing may give rise to -Gx. However, it is seen that the tolerance of the human body in the Gz direction is low in Figure 8. In civilian commercial flying operations, pilot exposure to excessive G force is not encountered during normal flight, with any exception, for example during turbulence, in moderate to severe turbulence, g loading may occur in less than 0.5 seconds. G levels in commercial airline operations tend to be relatively constant around a narrow range centered on +1 Gz and very rarely exceed +2 Gz. No circumstance was found of exposure to more than +2.7 Gz. In normal flight, -0.5 to +1.5 Gz is typical and the upper level is rarely exceeded even with tight radius turns in police or survey aircraft. There have not been any cases of such as causes of A-LOC or G-LOC in general or commercial aviation in 'more than 25 years' [of experience]. Avoiding the harmful effects of g-force in aviation depends on the skill and training of the pilots [41].

The maximum acceleration of the commercial Maglev trains is 0.16g (16 m/s^2) and the maximum jerk is 0.25g (2.5 m/s^3) [42].

It is stated that 1g force will not be exceeded during the travel in Hyperloop Alpha. The comfort acceleration for Hyperloop was stated as 0.5 g in various studies. It was determined that the acceptability criteria that 95 percent of passengers will not hesitate to travel again are lower values than 0.3 g for positive vertical acceleration and 0.2 g for negative vertical acceleration in a study published by the Volpe Center in 1994. [24].

The Virgin Hyperloop has studies that its model is capable of 4.5 times tighter turning radius, with near-zero lateral acceleration inside the pod [8]. For the Hyperloop, the potential impact of simultaneous g-forces applied to multiple axes will need to be addressed, and these will constrain the final operational parameters of any design [43].

Some experts believe that using this new technology on cargo-type will be safer than testing it on passengers. [24]. For the Hyperloop cargo type, the g-force may be greater, depending on the cargo to be transported. This situation also may cause various geometry standard differences such as minimum horizontal bend radius in cargo type Hyperloop. However, the g-force would still need to be kept under control, as it may also have effects on the Hyperloop infrastructure such as tubes, vacuum seals, supports, and internal rails [43].

Maglev, Hyperloop, and an airplane can reach lethal levels of g-force easily because of their high-speed potential. Especially in aviation, the g-force effect is felt more. However, it is also a solvable issue for Hyperloop with correct route geometry and speed planning.

ROUTE AND GEOMETRY

The speed, capacity, and maximum gradient data of Maglev, Hyperloop, and HSR types were compared in Table 1. Geography and the geometric features of the route are the major factors that increase the cost of earthworks. The idea proposed in Hyperloop Alpha is to move alongside the highway to reduce earthworks between San Francisco and Los Angeles. Considering the restrictive geometric standards of highways (such as small-diameter horizontal curves), it is not possible to use this recommendation in every geography for high-speed trains. The minimum curve radius is effective in limiting the maximum speed on the curve so that the vehicle can move without derailment or damage to the rail [44].

Table 1. Basic specifications HSR, Maglev, Hyperloop [1]

-	High-Speed Rail	Maglev	Hyperloop
Current max. speed	380 km/h (236mph)	431 km/h (270 mph)	387 km/h (240 mph) Virgin Hyperloop One
Speed record	TGV (2007) 574.8 km/h (357.2 mph)	YMLT (2015) 603 km/h (375 mph)	-
Max. Design speed	402 km/h (250 mph)	604 km/h (375 mph)	1.223 km/h (760 mph)
Max. Seating capacity	1500	824	28 per capsule
Min. Horizontal curve	7.6 km (4.7 miles)	9.1 km (5.7 miles)	4.8 km (3.0 miles)
Max. gradient	4%	not applicable	not applicable
Technology maturity	mature	almost mature	infant

A near-linear route must be preferred to speed up without being affected by g-forces in the Hyperloop route geometry. Geometric constraints are not determined completely for the route in Hyperloop. Since the route specified in Hyperloop Alpha belongs to the highway, the longitudinal gradient of 6% in Table 1. has been accepted as the maximum longitudinal gradient value described so far for Hyperloop. The maximum longitudinal gradient value is 10% in Maglev, 4% on the high-speed train [45,46].

The minimum horizontal curb radius changes according to the speeds of the High-Speed train ICE and Shanghai Maglev are shown in Table 2 [46]. In the Hyperloop studies conducted in the UK, the relationship between speed and

minimum horizontal curve radius of Hyperloop is shown in Table 3 [43]. Also, it is seen that the minimum radius of Maglev and Hyperloop are very similar in the graphic in Figure 8 [44].

Table 2. Comparison between two German trains of ICE-03 HSR and TR-08 maglev [46]

Parameter	Inter City Express (ICE) 3 ICE-03 the type series 403	Transrapid Shanghai Maglev TR-08 SMT the type series TR 08
Max. Longitudinal gradient	3.5	10
Max. Side Acceleration	1 m/s ²	
Speed (km/h)	Curve Radius (m)	
200	1400	705
250	2250	1100
300	3200	1590
350	-	2160
400	-	2825
450	-	3580

Table 3. Summary Table of Indicative Alignment Minimum Curves based on 0.5 lateral g-forces, not allowing for capsule rotation (cant) [43]

Capsule Velocity km/h (mph)	Approx. Minimum Tunnel Alignment Radii (m) (without can't allowance)
160 (100)	410
320 (200)	1630
483 (300)	3700
643 (400)	6500
805 (500)	10200
965 (600)	14675
1125 (700)	20000

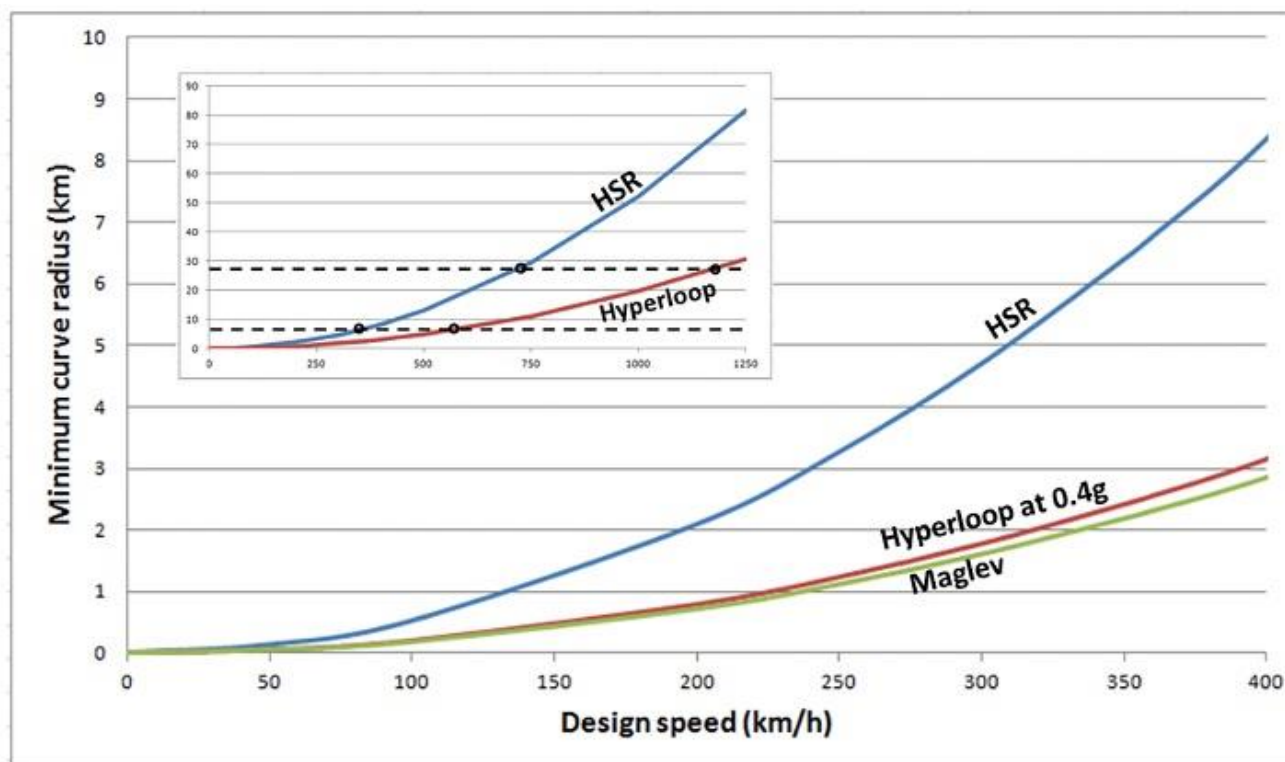


Fig. 8. Estimated minimum horizontal curve radius for HSR, Maglev and Hyperloop [44]

HYPERLOOP COST

Hyperloop first came out with the claim that it would be faster and less costly than the high-speed train planned to be built between San Francisco and Los Angeles in the United States. Therefore, most studies have been on feasibility and cost for Hyperloop. Because of the Hyperloop system similarity, it is mostly compared to Maglev in terms of cost. Since Hyperloop is not a current application area, the information in this study is included in the reports of the relevant companies and the costs in the places planned to be made because of the agreements with the countries. The costs are divided into three categories: capital, operating, and overhead. The costs of constructing infrastructure (rails, stations) and acquiring vehicles are referred to as capital costs. Operating costs are the costs associated with the maintenance of infrastructure and vehicles and the operation of vehicles and stations [23].

Table 4. Hyperloop Project

Hyperloop Project	Cost	Length (km)	Note
Los Angeles-San Francisco	Hyperloop Alpha: \$6-7.5 million [19]	563	These costs are only the construction costs of the system, land acquisition and station costs are not included. Hyperloop Alpha has estimated the construction costs of the station at \$125 million. It has been stated that with a capsule capacity of 28 people, per person ticket prices will be \$20 [19]

Hyperloop Project	Cost	Length (km)	Note
Abu Dhabi-Dubai	\$20-40 billion per km [6,7]	150	It has been declared that the system will reduce the travel from approximately 45 minutes to 12 minutes by plane, and the system is efficient enough to compensate itself within 8-15 years [6,7]
Russian-China	\$1.5-2.3 billion [5]	65	Annual operating income of \$250 million, operating costs of \$77 million are estimated. Average speed 540 km/h [5]
India	\$10.1 billion [47]	148	It is stated that ticket fares between Mumbai-Pune will not be more than HSR. (Mumbai- Ahmedabad High-Speed train ticket would be around ₹3,000 ~ \$40) [8,48]
Netherlands	The Netherlands is the country where Hyperloop, which is planned to reach Brussels in less than 30 minutes from Amsterdam and 90 minutes to Paris, has important studies and entrepreneurs in Europe [10]		
Poland	Poland has prepared a long-term project for Hyperloop by gradually improving the existing infrastructure system [11]		

Information on Hyperloop projects is given in Table 4. However, the same structures built in the same country or different places show the difference in cost and requirement because of their geographical features. The rough terrain between Russia and China, the desert floor between Abu Dhabi and Dubai, will cause additional costs. System costs alone outside of the land will vary depending on the company implementing the project. There are additional costs in the Hyperloop cargo type. When carrying big bulk goods that are not time-sensitive, freight train offers an advantage, so Hyperloop is unlikely to have a substantial impact on rail market share. Hyperloop cargo version would probably be similar to the aircraft cargo system. Airfreight is currently costly, and it is only utilized for time-sensitive, high-value, or perishable cargo. Furthermore, creating a similar hub-and-spoke system with the same geographic reach as the air network would necessitate a massive expenditure [24].

As a result of NASA's feasibility, energy and ticket pricing per person in Hyperloop are shown in Table 5 [25]. According to Table 5, the needed energy has increased with the passenger capacity, but the ticket cost per person has decreased. Considering that there are 28 people in a capsule, the approximate cost per person is slightly less than \$76. According to these values, it is seen that a capacity of 100 people in a capsule is needed for the \$20 ticket fee mentioned in the Hyperloop Alpha.

Table 5. Energy and ticket cost per person in Hyperloop [25]

Passenger per pod	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Energy Cost (\$M)	28.2	28.6	29	29.5	29.9	30.3	30.7	31.1	31.6	32
Total \$/Passenger	226	113	76	57	45	38	33	29	25	23

Station construction costs were estimated at \$125 million for Hyperloop Alpha. Station locations planned in Hyperloop Alpha are outside of the city in both San Francisco and Los Angeles. Station construction is more costly in an urban location, and being outside of the city will cause a different means of transportation to get to the station and indirectly a waste of energy and time. The addition of intermediate stations and branches will have a cost-increasing effect. Even if it is aimed to reduce the excavation operations thanks to the positioning of the poles at the desired height on the route, the land prices may be much higher than expected and soil improvements may be required [24].

Costs for two stations of the current Maglev line near Shanghai are \$1.33 to \$1.2 billion, which is \$130 million for these two stations significantly less than Musk's mention for the Hyperloop. However, Hyperloop stations are more complex than Maglev stations because access must be given to vehicles in evacuated tubes [23].

The operating cost at the station is also not specified in Hyperloop Alpha. Although the Hyperloop Alpha proposal defines an electronic ticketing system that will eliminate the human factor in ticketing, it is likely that personnel will be needed in services such as station capsule maintenance or cleaning, security, customer service, and customer baggage assistance [24].

Station operating costs should be added to the total cost, but the need for personnel, labor, etc. in operating costs is also in question in Maglev and air transportation. The special technical requirements in the Hyperloop station, which is different from other transportation modes, is the most important reason that increases the cost.

MAGLEV COST

According to the United States Railway Administration in 2005; While the construction cost of the one-kilometer Maglev train line varies between \$31.25 million and \$62.50 million, the benefit of Maglev trains becomes even more clear with the ideal travel length of over 240 kilometers [49]. The lengths and costs of existing Maglev lines in China, Japan, and South Korea are shown in Table 6. Estimated project costs according to routes planned for Hyperloop and costs of existing Maglev systems are shown in this study. However, building the same system in a different location in the same country has different costs due to geographical conditions. Therefore, competitive distances that provide maximum benefit in transportation, which is a requirement of feasibility, are shown in Figure 9 [49,50].

Table 6. Maglev lines and their costs [51]

Maglev Project (Year of Cost)	Country	Total Project Cost Including Trains (\$)	2016 Costs with CPI Inflation (\$)	Length (miles)	Project Cost Per Mile (\$)
Shanghai (2004)	China	\$1,580,000,000	\$2,021,873,054	18.6	\$108,700,000
Linimo (2005)	Japan	\$922,000,000	\$1,141,188,623	5.5	\$207,500,000
Incheon Airport (2012)	South Korea	\$342,000,000	\$360,076,126	3.8	\$94,700,000
Changsha (2016)	China	\$674,000,000	\$674,000,000	11.5	\$58,600,000
Chuo Shinkansen (2016)	Japan	\$90,000,000,000	\$90,000,000,000	310.7	\$289,700,000
Skytran (2016)	Israel	N/A	N/A	N/A	\$13,000,000
Baltimore Washington DC (2016)	USA	\$12,000,000,000	\$12,000,000,000	40	\$300,000,000
U.S. Maglev Network (2013)	USA	\$970,000,000,000 ¹⁵	\$999,355,000,000	29,000	\$34,500,000

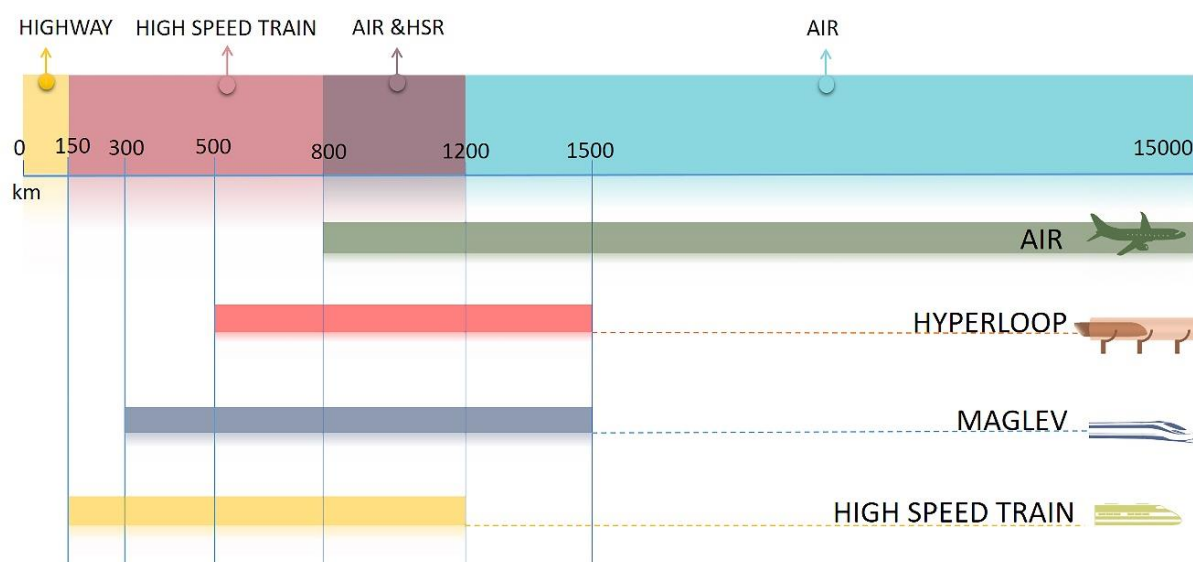


Fig. 9. Competitive travel distance for Maglev, Hyperloop, High-Speed Train and Airplane (not scale)

CONCLUSION

The advantages and disadvantages of Hyperloop and other vehicles have been revealed under security and cost issues by comparing them. The Hyperloop will be costlier because of its additional requirements (vacuum pump, tube, etc.) of the Maglev system under the same conditions. However, the high estimated cost of construction will be reflected in passenger fees. When these fees are distributed to 28 people traveling in a capsule, the high cost will prevent the spread of this system and serve the society whose income is above a certain level. However, Hyperloop's attractive features, such as high speed, utilization of solar energy, and weather resistance, can make it a means of transportation to operate in certain places, despite its cost. Although Concorde was the most expensive and the fastest aircraft in the past, the reason it went out of use was not its cost but the accidents and political crises of the period [52]. In this respect, cargo transportation at the first stage may be an effective solution to increase and prove the reliability of Hyperloop. With the development of technology, when experience is gained about more economical solutions, designs and managerial or engineering deficiencies that may arise in the cargo type Hyperloop installed before, the passenger type Hyperloop application may be more acceptable in the community with reliability and cost. Hyper Poland company mentioned that the standard of Hyperloop infrastructure should be the same in every country, and the companies interested in this issue should reach a consensus. This suggestion can be useful in terms of increasing the widespread and applicability of Hyperloop. However, as in the history of the Maglev train, technological competition in the world may prevent the implementation of this idea.

ACKNOWLEDGMENT

The authors declared no conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article. The authors also declared that this article is original, was prepared in accordance with international publication and research ethics, and ethical committee permission.

References

1. Gieras J. Ultra high-speed ground transportation systems: Current Status and a vision for the future. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020;1(9):3-9. doi:10.15199/48.2020.09.01
2. Garfield L. 15 remarkable images that show the 200-year evolution of the Hyperloop. Business Insider. 2018 Feb 21; [cited 2020 May 1]. Available at: <https://www.businessinsider.com.au/>.
3. Buitendijk M. Marin Tests First Transatlantic Underwater Hyperloop. *SWZ MARITIME*. 2019 Sep 10; [cited 2021 Jan 13]. Available at: <https://www.swzmaritime.nl/>.

4. Thompson PJ. *A Scientific and Economic Analysis of the Hyperloop as it Pertains to Mass Transportation*. Case Western Reserve University; 2019. [cited 2020 Sep 10]. Available at: <https://etd.ohiolink.edu/> .
5. Upbin B. Hyperloop on the Silk Road Shuttling Cargo Between Russia and China at 540 km/h. *REconnecting Asia*. 2017 Jan 31. [cited 2020 Apr 10]. Available at: <https://reconnectingasia.csis.org/> .
6. Khaleej Times. Dubai-Abu Dhabi 12-minute Hyperloop by 2020. *Khaleej Times*. 2019 Jan 17. [cited 2020 March 15]. Available at: <https://www.khaleejtimes.com/> .
7. Arabian Business. UAE's Hyperloop System to Cost up to \$40m per km. *ArabianBusiness*. 2017. [updated 2017 Jan 17; cited 2020 Mar 15]. Available at: <https://www.arabianbusiness.com/> .
8. Singh J. Is India Ready for Hyperloop? An Engineer Who Rode It First, Says Yes. *Gadgets-360*. 2021. [updated 2020 Dec 9; cited 2020 Dec 20]. Available at: <https://gadgets.ndtv.com/> .
9. CNBC-TV18. Hyperloop in Mumbai-Pune, Bengaluru may be ready by 2029, says Virgin Hyperloop One. 2020. [updated 2020 Oct 30; cited 2021 Jan 30]. Available at: <https://www.cnbctv18.com/> .
10. Boffey D. Amsterdam to Paris in 90 minutes? . *The Guardian*. 2020 Apr 10. [cited 2020 Sep 25]. Available at: <https://www.theguardian.com/international> .
11. Kennedy C. Future of Rail/ Poland's First Step to Hyperloop High Speed Transport. *New Civil Engineer*. 2020 Jun 19. [cited 2020 Oct 25]. Available at: <https://www.newcivilengineer.com/> .
12. González E, Nogués S. Railways Of The Future: Evolution And Prospects Of High-speed Rail, Maglev And Hyperloop (1st Part) . *DYNA INGENIERIA E INDUSTRIA*. 2017;92(4):371-373. doi: <http://dx.doi.org/10.6036/8269> .
13. HNTB, PBSJ&, SANDAG. *SANDAG Maglev Study Phase 1 Final Report*. 2016:185. [cited 2021 Feb 19]. Available at: <https://www.sandag.org/> .
14. Yadav M, Mehta N, Gupta A, Chaudhary A, Mahindru DV. Review of Magnetic Levitation (MAGLEV): A Technology to Propel Vehicles with Magnets. *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical & Mechanics*. 2013;13(7)
15. BBC. The Magnetic Attraction Of Trains. BBC. 1999 Nov 9. [cited 2021 May 13]. Available at: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/488394.stm> .
16. Raheel A, Jun YL, Azhar MF, Junejo NUR. Comprehensive Study and Review on Maglev Train System. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;615:347-351 doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.615.347> .
17. Prasad N, Jain S, Gupta S. Electrical Components of Maglev Systems: Emerging Trends. *Urban Rail Transit* 2019;5:67-79. doi: <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0104-1> .
18. Lee HW, Kim KC, Lee J. Review of Maglev Train Technologies. *IEEE Transactions On Magnetics*. 2006;42(7):1917-1925. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.875842> .
19. Musk E. Hyperloop Alpha SpaceX. 2013. [cited 2019 Nov 12]. Available at: https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf .
20. Ammori M, Benkler Y. Hyperloop Law: Autonomy, Infrastructure And Transport Startups. *Berkman Klein Center for Internet & Society at Harvard University and Harvard Journal of Law & Technology*. 2017. [cited 2020 July 18]. Available at: <https://cyber.harvard.edu/> .
21. Delft Hyperloop. Levitation Systems for the Hyperloop. *Hyperloop Connected* 2019. [cited 2020 Apr 28]. Available at: <https://hyperloopconnected.org/> .

22. Cassandra. How Does Hyperloop Work? Everything You Need To Know About Magnetic Levitation. *alphr*. 2020. [cited 2021 Jan 10]. Available at: <https://www.alphr.com/> .
23. Goeverden K v, Milakis D, Janic M, Konings R. *Performances of the HL (Hyperloop) transport system*. 2017:29-43. *Towards an Autonomous and Interconnected Transport Future*. [cited 2020 June 10]. Available at: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A7dc4b712-f8f8-49f4-ac93-cc0003283b72> .
24. Catherine L. Taylor DJH, Lawrence C. Barr. *HyperloopCommercial Feasibility Analysis: High Level Overview*. Library NT; 2016:47. [cited 2021 Jan 19]. Available at: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/12308> .
25. Decker K, Chin J, Peng A, et al. *Conceptual Feasibility Study of the Hyperloop Vehicle for Next-Generation Transport*. 2017:22. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170001624> .
26. Tarver WJ, Volner K, Cooper. JS. Aerospace Pressure Effectss. StatPearls. StatPearls Publishing; 2021. [cited 2021 Feb 1]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK470190/> .
27. Stull R. Altitude and Pilot Physiology. The University of British Columbia. 2021. [updated 2020 May ;cited 2021 Dec 3]. Available at: <https://www.eoas.ubc.ca/> .
28. Santangelo A. Hyperloop As An Evolution Of Maglev. *Transportation Systems And Technology*. 2018;4:44-63. doi:<http://doi.org/10.17816/transsyst20184444-63> .
29. Railway Technology. How Japan's Rail Network Survived the Earthquake. Railway Technology. 2011. [updated 2011 Jun 27 ;cited 2021 Feb 25]. Available at: <https://www.railway-technology.com/> .
30. Yoshimitsu S, Eiichi N, Toshikazu D. *Lessons from the Great Hanshin Earthquake*. Creates-Kamogawa Publishers 2005. [cited 2021 Mar 12]. Available at: http://www.shinsaiken.jp/oldweb/hrc-e/publish/lessons_ghe/ .
31. Suzuki H. Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 1998;212(1) (Part F: Journal of Rail and Rapid Transit):61-72. doi:10.1243/0954409981530689
32. Kim Y-G, Kwon H-B, Kim S-W, Kim C-K, Kim T-W. Correlation of ride comfort evaluation methods for railway vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2003;217(2):73-88. doi:10.1243/095440903765762823
33. Samah AAA. *Whole Body Vibration Analysis for Ride Quality of LRT Passenger*. Batu Pahat: Universiti Tun Hussein Onn Malaysia; 2016. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/83541259.pdf> .
34. Street F. How long until Hyperloop is here? CNN. [updated 2019 Dec 10;cited 2021 Feb 10]. Available at: <https://edition.cnn.com/travel> .
35. Stump J. The Need For Speed – And Science: Virgin Hyperloop To Benefit From WVU Neuroscientists' Expertise On Brain, Body Impacts. WVUTODAY. 2020. [cited 2021 Feb 18]. Available at: <https://wvutoday.wvu.edu/> .
36. Alsammarae R. Virgin Hyperloop One and BIG Reveal Videos Showing Hyperloop's 'Zoetrope' Windows. Middleeast Architect. 2018. [cited 2020 Mar 15]. Available at: <https://www.middleeastarchitect.com/> .
37. Bell K. Hyperloop CEO Shows Off Augmented Reality Window Concept. Mashable. 2016. [cited 2021 Jan 1]. Available at: <https://mashable.com/> .

38. Wyrick B.C, Brown J.R, Acceleration in Aviation: G-Force. FAA Civil Aerospace Medical Institute. (Administration United States Department of Transportation). [cited 2020 Mar 15]. Available at: <https://www.faa.gov/pilots/safety/pilotsafetybrochures/media/acceleration.pdf> .
39. Kumar KV, Norfleet WT. *Issues on Human Acceleration Tolerance After Long-Duration Space Flights*. 1992:58. [cited 2021 Feb 5]. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930020462> .
40. Kumaş H, Gencer C, Maraş H. Ağır Araçlar İçin Yol Eğimi Ve Viraj Yarıçapı Dikkate Alınarak En Hızlı Güzergâhın Belirlenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 2012 2011;27:385-395.
41. Evans S. Enquiry into the Risk of Cognitive Impairment Due to G Forces. UK Civil Aviation Authority; 2020. p. 182. [cited 2021 Mar 20] Available at: <https://www.caa.co.uk/home/> .
42. General Atomics Low Speed Maglev Technology Development Program (Supplemental #3) Final Report. U.S. Department of Transportation. (Federal Transit Administration) 174 (2005). [cited 2020 Sep 16]. Available at: <https://www.transit.dot.gov/> .
43. London Bridge Associates Ltd, British Tunnelling Society. *BTS Hyperloop Challenge: Tunnels for Hyperloop* 2019:121. [cited 2020 Mar 27]. Available at: <https://britishtunnelling.com/> .
44. Taylor N. B, Supplementary Information for Comparative Analysis of Transport Modes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*. ICE Publishing [cited 2020 Mar 30]; doi: <https://doi.org/10.1680/jtran.18.00150> .
45. SIEMENS. Shanghai Maglev Transrapid Technology. SIEMENS. 2006. [cited 2021 Jan 1]. Available at: <https://www.ft.dk/> .
46. Yaghoubi H, Barazi N, Aoliaei MR. Maglev. In: Perpinya DX, ed. *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*. In Tech; 2012:123-176:chap Maglev. doi: 10.5772/35339 Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/34787> .
47. Jadhav R, Reuters Staff. India Grants Infrastructure Project Status to \$10-Billion Hyperloop Plan. Reuters. 2019. [updated 2019 Aug 1; cited 2020 March 6]. Available at: <https://www.reuters.com/> .
48. Mint. Mumbai-Ahmedabad bullet train fare to be around ₹3,000. mint. [updated 2019 Sep 12 ;cited 2021 Jan 1]. Available at: <https://www.livemint.com/> .
49. Çodur MY. Türkiye’de Maglev Trenlerinin Uygulanabilirliğinin Araştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 2017;7(1):207-215. doi: <https://doi.org/10.21597/jist.2017127433> .
50. Lawrence M, Bullock R, Liu Z. Group WB, ed. *China’s High-Speed Rail Development*. International Development in Focus;. Washington, DC: World Bank. 2019:101. [cited 2021 Jan 20] Available at: <http://documents1.worldbank.org/curated/en/933411559841476316/pdf/Chinas-High-Speed-Rail-Development.pdf> .
51. Dona S, Singh A. *The Workings Of Maglev: A New Way To Travel*. 2017. [cited 2021 Feb 20]. Available at: <http://www.cee.hawaii.edu/wp-content/uploads/2016/05/UHM-CEE-17-01.pdf> .
52. Razi K, Wu N, Wang C, et al. Consumer Desirability of the Proposed Hyperloop. University of California. 2018. [cited 2020 Apr 23]. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/3w5414sm>

Information about the authors:**Rümeysa ÖZBEK**

ORCID: 0000-0003-1110-3710;

E-mail: rumeysa.ozbek08@erzurum.edu.tr

Muhammed Yasin ÇODUR

Scopus ID: 29667475400; ORCID: 0000-0001-7647-2424; ResearcherID: A-6290-2013;

E-mail: mycodur@erzurum.edu.tr

To cite this article:

Özbek R, Çodur MY. Comparison of Hyperloop and Existing Transport Vehicles in Terms of Security and Costs. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):5-29. doi: 10.17816/transsyst2021735-29

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов

УДК 351.811.112

DOI 10.17816/transsyst20217330-55

© Г. А. Аверченко, В. А. Борисов, К. А. Васильев

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

КАПИТАЛЬНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ МАССИВНЫХ ОПОР МОСТОВ

Объектом исследования в данной статье являются способы восстановления массивных опор мостов, в зависимости от характера и объема разрушения. Работа выполнена на основе анализа публикаций отечественных и зарубежных ученых, методом теоретического изучения, анализа и обобщения материала. В организационном отношении мелкие работы по ремонту опор могут быть выполнены распоряжением самих дорог, что же касается крупных работ, то они резко различаются от работ по временному восстановлению. Ремонт поврежденных опор с расстроенной части кладки мало отличается от ремонта и усиления опор, производимого на существующих мостах. Наибольшие трудности представит ремонт опор в подводной части. Для производства работ на каждом отдельно взятом объекте ремонта, необходимы организации, обладающие большой мобильностью, квалифицированной рабочей силой и достаточным запасом материалов.

Ключевые слова: опоры мостов, кладка, инженерные сооружения, разлопатки, драни, бык, ряжевое основание, шпренгель, ряж, шпальные клетки.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Design and Construction of Roads, Subways

© G. A. Averchenko, V. A. Borisov, K. A. Vasilev

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

MAJOR RESTORATION OF MASSIVE BRIDGE SUPPORTS

The object of research in this article is the methods of restoring massive bridge supports, depending on the nature and volume of destruction. The work is based on the analysis of publications of domestic and foreign scientists, by the method of theoretical study, analysis and generalization of the material. From an organizational point of view, minor work on the repair of supports can be carried out by the order of the roads themselves, but as for large-scale work, they are sharply different from work on temporary restoration. The repair of damaged supports from a broken part of the masonry is not much different from the repair and reinforcement of supports performed on existing bridges. The greatest difficulties will be the repair of supports in the underwater part. To work on each individual repair facility, organizations with high mobility, skilled labor and a sufficient supply of materials are needed.

Key words: bridge supports, masonry, engineering structures, raz shovels, drani, bull, ryazhevoe base, sprengel, row, sleeper cages.

ВВЕДЕНИЕ

В период Великой отечественной войны мосты на железных дорогах подвергаются значительным разрушениям. Эти разрушения распространяются не только на пролетные строения, но и на опоры мостов.

Повреждения и разрушения опор требуют трудоемких работ по их восстановлению, поэтому они подвергаются особенно серьезным разрушениям.

Разрушения и повреждения опор мостов разнообразны по характеру и глубине их распространения. Этот характер повреждений опор зависит от степени воздействия на них средств разрушения, а также от повторности разрушения.

Разрушения в опорах мостов, подвергшихся воздушным налетам, в результате взрыва авиабомб около опор обычно не настолько серьезны и их можно отнести к поверхностным и местным повреждениям по боковой поверхности кладки без образования глубоких трещин.

К серьезным повреждениям можно отнести разрушения, вызванные взрывом авиабомб большой взрывной силы непосредственно на опоре или рядом с опорой.

Большая часть мостов с серьезными повреждениями расположена в тыловых районах, и их капитальное восстановление сводится к ремонту опор обычно средствами и материалами соответствующих организаций НКПС и во время войны.

Довольно большая группа мостов подвергалась и подвергается разрушениям отступающим противником, и, как практика войны показывает, эти разрушения, вызванные неоднократными и повторными взрывами той или иной стороной, являются довольно серьезными и распространяются не только в надводной части, но и в подводной части с образованием глубоких трещин в теле опор мостов.

При восстановлении мостов на старой оси опоры мостов очень часто используются как основание для соответствующей надстройки из рам деревянных или металлических, или для шпальных клеток или ряжей.

При загромождении русла обломками пролетных строений и опор в ряде случаев восстановление мостов является настолько трудоемким и по объему и по времени, что восстановление мостов производится на новой оси, а поврежденные или разрушенные опоры подвергаются дальнейшим разрушениям в результате воздействия на них воды и других вредных факторов.

Кроме этой группы мостов, восстановление которых затруднительно в военное время ввиду серьезных разрушений, имеется значительная

группа мостов, поврежденных или разрушенных при вынужденном отходе наших войск в первое время войны и не восстановленных противником ввиду их расположения на второстепенных направлениях. Кроме повреждений, вызванных взрывом, опоры имеют разрушения, вызванные различными вредными факторами. Обломки кладки опор в результате действия воды заилены, и восстановление таких опор требует серьезных мер и специальных методов работы.

Особенно это относится к опорам, разрушение которых вызвано в минных камерах. В результате взрыва в таких камерах, кроме общих повреждений, ниже камеры на значительную глубину распространяются образовавшиеся трещины. Эти трещины, распространенные в подводной части, в результате воздействия воды в дальнейшем имели тенденцию к углублению и расширению [1].

Такие опоры требуют предварительного и тщательного осмотра и анализа целесообразности восстановления их по сравнению с устройством новой опоры.

При капитальном восстановлении моста на старой оси необходимо в каждом случае решить целесообразность восстановления разрушенной опоры, учитывая трудоемкие способы их ремонта, особенно разборки старой кладки как в подводной, так и в надводной части. В реках с судоходными пролетами при восстановлении мостов на старой оси для сохранения необходимых судоходных пролетов придется капитально восстанавливать опоры, разрушенные как в надводной, так и в подводной части.

На поймах или на реках с малой глубиной возможно произвести восстановление мостов с устройством новых опор при малых пролетах, что в ряде случаев может быть экономично.

На значительной части мостов восстановление опор возможно путем разборки старой кладки и устройства новой кладки. Такие работы должны быть произведены в мостах, ранее временно восстановленных, при нормальном или ограниченном движении и без перерыва такового.

При восстановлении опор мостов, использованных как основание для разного рода надстроек, во избежание значительных работ по устройству временных опор и перестановки пролетных строений на эти опоры, лучше произвести новую кладку без снятия надстройки [2].

При восстановлении опор таких мостов, а также опор мостов, временно ранее не восстановленных, новую кладку рекомендуется применять из бетона или бутобетона.

Кладка опоры из отдельных бетонных блоков, изготовленных на стройдворах, для высоких массивных опор требует специального оборудования для транспортирования их с берега на опоры и подъемки их ввиду их значительного веса в 2–3 т. Бетонирование опор в опалубке имеет

ряд преимуществ перед кладкой из отдельных блоков ввиду простоты транспортировки бетона: при помощи кабель-крана, баржами и подъемниками. При ремонте опор, которые были использованы при временном восстановлении, кладка из блоков также неудобна, так как требует снятия надстройки и перестановки пролетного строения с опор на новые временные опоры, устройство которых не всегда удобно ввиду значительных загромождений русла вокруг опоры каменными обломками.

Повреждения разрушения опор мостов могут быть сведены к следующим:

- 1) повреждения подферменников или подферменной площадки;
- 2) повреждения шкафной части устоя;
- 3) повреждения крыльев устоя;
- 4) повреждения облицовки опоры или ледорезной части как в надводной, так и в подводной части опоры;
- 5) разрушение надводной части кладки опоры;
- 6) разрушение опоры с повреждением подводной части кладки опоры;
- 7) повреждение кладки (трещины, крены, сдвиги) вследствие взрыва авиабомб или сброса с опоры пролетного строения.

Повреждения и разрушения опор по их способам локализации могут быть сведены к повреждениям мелкого характера, которые могут быть выполнены местными средствами и строительными организациями дорог НКПС и к более серьезным, ремонт которых может быть выполнен специальными ремонтными группами мостопоездов Мостотреста НКПС.

Исправление повреждений в подферменниках или железобетонных подферменных площадках, в крыльях устоев и шкафной части, а также повреждения облицовки и ледорезной части могут быть отнесены к мелкому ремонту [3].

К более серьезным повреждениям, исправление которых требует специальных приемов и оборудования, относятся все повреждения и разрушения опор, сопровождаемые трещинами в кладке опор и отколами части кладки.

Эти работы по ремонту могут быть выполнены при помощи цементации и торкретирования, а также при помощи устройства железобетонных поясов и оболочек; в подводной части ремонт повреждений может быть выполнен при помощи каркасных перемычек, подводного бетонирования и в крайнем случае при помощи съемных кессонов, применение которых всегда сопряжено со значительными неудобствами, особенно в связи с необходимостью разборки старой кладки ручными способами. При наличии хорошего грунта и при отсутствии каменных обломков ввиду простоты забивки шпунта деревянного или металлического ремонт повреждений в подводной части может быть произведен открытым способом.

МЕЛКИЙ РЕМОНТ ОПОР

Ремонт и смена подферменников и подферменной железобетонной площадки. Повреждение подферменников или подферменной железобетонной площадки может быть в результате взрыва авиабомб на опоре.

Трещины или сколы в подферменных камнях вне пределов распространения давления не представляют никакой опасности и лишь требуют мероприятий, обеспечивающих соответствующий отвод воды. Для этого сколы подферменников покрываются цементной штукатуркой. При незначительных повреждениях в подферменниках можно ограничиться постановкой хомутов.

Подферменные камни со значительными сколами и трещинами должны быть сменены. В мостах с нормальным или временным движением поездов смена подферменников производится после того, как окончены все работы подготовительного характера [4].

Под опорной поперечной балкой или под фермами на площадке устанавливаются клетки из бревен или брусьев или металлических балок. Подъемка ферм и их опускание на клетки производятся одновременно для обеих ферм, независимо от того, сколько подферменников сменяется. Верхние и, по возможности, нижние балансиры опорных частей подвешиваются хомутами к фермам. После подъема ферм катки и нижние подушки опорных частей вынимаются, а подферменники удаляются, после чего производится постановка новых подферменников (при здоровом верхе опоры) из естественного камня, лучше из железобетона, а при повреждении кладки верха опоры производится устройство новой, железобетонной подферменной площадки.

Устройство новой железобетонной площадки особенно желательно для опор, подвергшихся сотрясению от взрыва авиабомб и возможного наличия в них необнаруженных волосных трещин, вследствие способности железобетонной подушки к равномерной передаче нагрузки на опору. Устройство такой площадки необходимо и в случае повреждения с разрывом арматуры старой железобетонной подферменной площадки.

В устоях поврежденные подферменные площадки заменяются новыми. Одновременно при повреждении стенки шкафа необходимо устроить и железобетонную стенку, которая обеспечит прочность шкафа и предохранит от атмосферных воздействий шкафную часть устоя.

Ремонт крыльев устоя. Поврежденные железобетонные крылья устоев со сколом и разрывом арматуры должны быть полностью заменены новыми, для чего необходимо произвести разборку кладки и арматуры до заделки арматуры в тело устоя и произвести тщательную зачистку поверхности кладки. Новую арматуру устанавливать с частичной заделкой

ее в старую кладку на достаточную глубину и произвести бетонировку. На время производства работ по ремонту крыльев под путь подводятся пакеты из рельсов или балок с минимальной строительной высотой таких пролетных строений. Они одним концом опираются на переднюю стенку устоя, а другим на временную опору вне пределов будущего котлована. Котлован удобнее устраивать в виде поперечной прорези земляного полотна с упором распорок крепления ее стенки в переднюю стенку устоя.

Перекладка облицовки опор. Перекладку облицовки опор необходимо произвести, если она разрушена или расстроена. Ледорезные камни при значительных сколах, а также, если состояние ледореза и облицовки, особенно в части, где опора омывается водой, внушает опасение, также должны быть заменены новыми.

Работы по перекладке облицовки и ледореза производить в сухом ограждении, что можно обеспечить устройством шпунтового ограждения.

При невозможности устройства шпунтового ограждения перекладку расстроившихся ледорезных камней, а также смену облицовочных камней опор около горизонта меженной воды удобно производить в зимнее время в тепляках.

Сухое ограждение возможно обеспечить при помощи выморозки и последовательного выкалывания льда вокруг ледореза. Вырубку льда производить на небольшую толщину, чтобы не дать пробиться воде, которая может затопить выморозку. Процесс выморозки длительный и возможен в районах с холодной зимой [5].

При повреждениях бетонной облицовки или расстройстве каменной облицовки производится укрепление ее при помощи бетонирования по металлической сетке.

Это бетонирование лучше производить посредством торкретирования.

РЕМОНТ КЛАДКИ ТЕЛА ОПОР

Трещины в теле каменных и бетонных опор могут быть вследствие подрывания опоры, сотрясения опор при воздушной бомбардировке моста, в арочных мостах вследствие взрыва арки.

При обнаружении трещин необходимо выяснить их характер и распространение. Трещины могут быть поверхностные только в облицовке или же проникать и вглубь кладки.

Необходимо выяснить наличие трещин также и в подводной части опоры, нет ли откола части кладки, нет ли сдвига массива опоры при наличии горизонтальных сквозных трещин, каково состояние основания опоры.

При незначительных трещинах, не сопровождаемых сдвигом или отколом части кладки, восстановление опор производится нагнетанием в трещину под давлением цементного раствора, а при расстроившейся поверхности кладки и торкретированием ее поверхности.

При трещинах, сопровождаемых отколом, но распространенных в верхней части опоры, следует или снять поврежденную кладку и заменить ее новой кладкой или же укрепить ее постановкой железобетонных поясов или оболочек с одновременным нагнетанием цементного раствора.

Таким же образом без разборки опоры ремонтируется кладка в нижней подводной части опоры, если трещины не дают полного откола верхней части опоры от нижней по плоскости со значительным наклоном, по которой могло бы произойти сползание.

При наличии сдвига верхней части опоры по горизонтальной или слабо наклонной трещине в зависимости от величины сдвига и расположения по высоте восстановление опоры может быть осуществлено либо снятием всей сдвигающей части опоры путем подрывания кладки, либо постановкой мощной железобетонной оболочки с инъекцией раствора в кладку [6].

Если кладка потревожена и в подводной части опоры, то ее укрепление можно произвести применением шпунтовых стенок в виде опалубки с расстоянием стенки от кладки в 50 см с заполнением промежутка бетоном.

В арочных мостах наиболее серьезным повреждением опоры является кран ее вследствие поворота основания, что будет иметь место при значительном одностороннем распоре. Подобное разрушение сопровождается обычно глубокими трещинами в теле опоры, что ведет к довольно сложным работам по переустройству моста.

При взрыве надводной части опоры восстановление ее производится путем бетонирования в специальных деревянных или металлических разборных формах, либо выравниванием верха разрушенной опоры с постановкой металлических или железобетонных опор.

В случае разрушения не только надводной, но и подводной кладки опор восстановление можно производить либо бетонировкой опор, под защитой шпунтовой перемычки, если есть возможность произвести забивку шпунта, либо при помощи каркасных перемычек или подводного бетонирования в опалубке или в крайнем случае при значительной глубине при помощи съемного кессона, деревянного или металлического.

Цементация. Цементация или пропитка – способ укрепления кладки массивных опор путем введения в нее под давлением цементного раствора, обладает значительными достоинствами и способностью заполнять все поры и связывать отдельные части кладки, придавая им монолитность, прочность и водонепроницаемость. Этот метод усиления поврежденных

опор заключается в том, что через серию отверстий, пробиваемых в кладке в местах трещин и вделываемых и замазываемых в них коротких отрезков труб, в сооружение вводится под давлением 5 – 10 ат цементный раствор [7].

При наличии волосных трещин употребляется цементное молоко, при крупных трещинах применяется раствор. В зависимости от срока до сдачи сооружения в эксплуатацию можно применять обычный или быстротвердевающий цемент.

Для производства инъекции раствора в кладку применяются: 1) ручные и механизированные насосы и 2) нагнетательные приборы пневматического действия, работающие от компрессорной установки.

К ручным насосам относится насос СССР-046.

При ведении малых работ по цементации ручные насосы особенно удобны, легки и просты в употреблении и не требуют специальных приспособлений и оборудования.

К более тяжелым нагнетателям относятся насосы системы ВСН 100/150, ВСК 130/200 и РН – 1 производительностью соответственно 3 м³/ч – 5 м³/ч и 6 м³/ч.

Может быть рекомендована для работ по цементации и переконструированная цемент-пушка. При помощи нее можно одновременно нагнетать раствор в несколько скважин.

При цементации не рекомендуется одновременно производить цементацию и бурение скважины на одной и той же опоре во избежание передачи сотрясения на раствор кладки, подвергшейся цементации.

Торкретирование. При повреждениях как внутри кладки, так и, особенно, на поверхности опоры с отделением облицовки или частичного повреждения бетонной или каменной поверхности кладки наряду с цементацией применяется торкретирование, покрытие которого обладает высоким механическим сопротивлением сжатию и растяжению, повышенным сопротивлением, химическим и атмосферным воздействием, повышенной прочностью и водонепроницаемостью. Торкретное покрытие может быть армировано металлической сеткой, что значительно повысит прочность такого усиления.

Для нанесения торкретного покрытия применяются компрессор с давлением в 4–5 атмосфер, цемент-пушка, водяной бак, воздухоочиститель и сопло, которые соединяются между собой штангами.

При толщине торкретного покрытия больше 20–25 см торкрет наносится несколькими слоями, толщина которого 10–15 мм.

Первый цементный слой в торкретном покрытии имеет особо важное значение, так как он обеспечивает прочное сцепление с телом опоры, а поэтому перед нанесением торкрета поверхность смачивается. Нанесение

следующего слоя может производиться лишь после полного схватывания предыдущего слоя, время которого определяется лабораторным способом.

Во время нанесения торкретного покрытия при солнечной или ветровой погоде необходимо место работ защитить устройством брезентного навеса. После нанесения каждого слоя торкрета его поверхность должна поддерживаться во влажном состоянии.

Устройство железобетонных поясов. При наличии трещин, указывающих на раскалывание опоры, устраиваются железобетонные пояса (кольца) (Рис. 1).

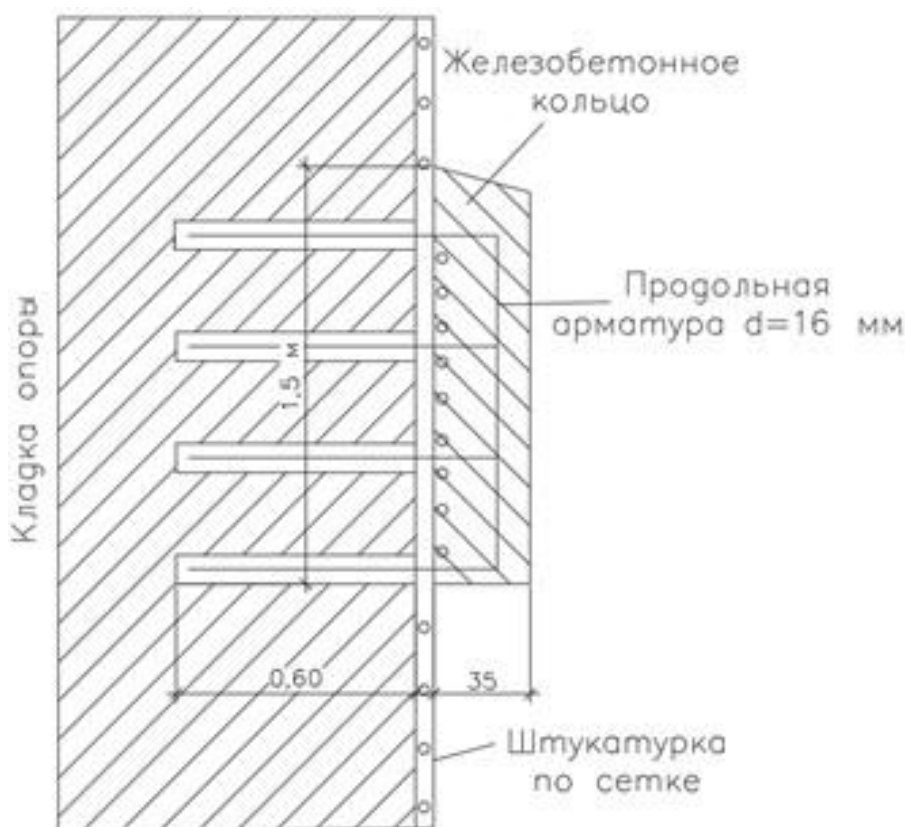


Рис. 1. Поперечный разрез железобетонного кольца

Железобетонный пояс представляет собой полосу, обхватывающую бык кругом, а устои по наружному очертанию его с трех сторон. На расстоянии друг от друга на высоте в 2–3 м устраиваются пояса из железобетона шириной в 1,5 м.

В качестве арматуры можно применять полосовое железо или угольковое железо от старых ферм или же из круглых стержней $d=10\text{--}16\text{ мм}$.

Толщина пояса обычно принимается от 20 до 40 см в зависимости от рода арматуры. Для связи поясов с кладкой через тело быков пробиваются камеры, через которые пропускаются болты или же на глубину 0,5–0,6 м заделываются штыри $d=20\text{ мм}$, связываемые с арматурой пояса.

Работу по устройству железобетонных колец иногда совмещают одновременно с цементацией кладки опор.

Бетонировка поясов производится бетоном марки не ниже 170 с устройством через 8–10 м усадочных замыкающих клиньев. После снятия опалубки в случае необходимости производится штукатурка остальной незакрытой и выветрившейся облицовки по металлической сетке $d=2-4$ мм, установленной на закрепленных в кладке железных крючьев и частично заведенной в бетон кольца. Раствор штукатурки рекомендуется наносить торкретом.

Устройство железобетонной оболочки. При наличии глубоких трещин с отколами части кладки опоры, а также при опорах, сооруженных из мягких пород камня, или когда кладка их выполнена на известковом растворе, для укрепления опор, наряду с инъекцией раствора в тело опоры устраиваются железобетонные оболочки (Рис. 2).

Для устройства оболочки необходимо с наружной поверхности опоры удалить расстроенную облицовку вместе с мелкими частицами камня.

После очистки в твердых частях кладки делается насечка, а для установки анкеров в кладке делаются анкерные дыры на расстоянии 0,5–0,6 м в квадратном или шахматном расположении.

Дыры рекомендуется располагать наклонно под углом $15-20^\circ$ к горизонту. В устоях глубина дыр обычно устраивается 0,7–0,8 м; в быках эту дыру лучше устраивать, сквозной в направлении меньшего размера быка. Анкеры закрепляются в дырах на цементном растворе. Анкеры применяются железные с крючком снаружи и завершенной поверхностью на другом конце стержня. К анкерам прикрепляется металлическая сетка из арматуры $d=10$ мм.

Толщина бетонного слоя оболочки обычно принимается в пределах 15–20 см с защитным слоем в 3 см. Бетон принимается марки 170 и выше. Для предупреждения появления в бетоне усадочных трещин устраивают через 8–10 м вертикальные швы замыкания толщиной до 0,50 м, которые спустя месяц заполняются бетоном.

Устройство оболочки рекомендуется производить с одновременным устройством на подферменной площадке железобетонного прокладника, если верх опор или устоя в шкафной части требует укрепления подферменной площадки.

При временном восстановлении мостов могут быть случаи восстановления массивных опор при помощи устройства металлического корсета.

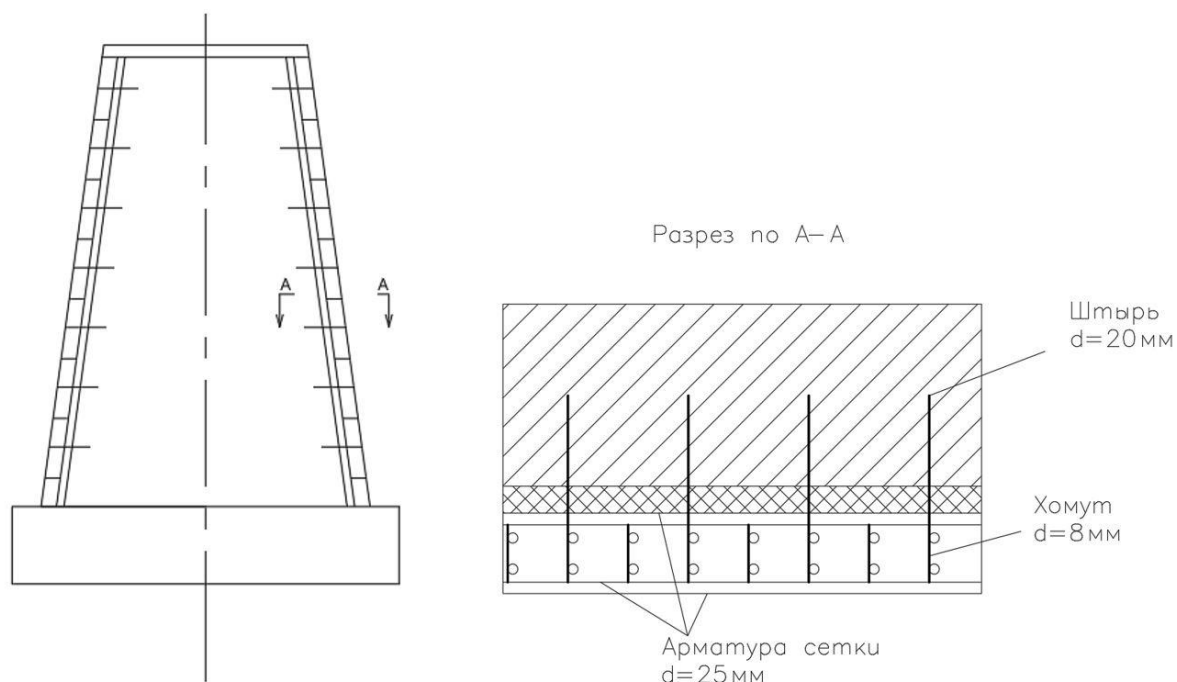


Рис. 2. Железобетонная оболочка

Обычно корсеты устраиваются для предотвращения отвала по трещинам части кладки. Корсеты, охватывающие опору, состоят из ряда вертикальных стоек, щитов и горизонтальных поясов. Для стоек обычно используются рельсы, редко бревна. Пояса делаются, из сортового железа с возможностью последующего их натяжения, для чего в систему их входят натяжные приборы (клины, болты, вагонные стяжки и т. п.).

При капитальном восстановлении такой опоры необходимо произвести заделку трещин путем нагнетания цементного раствора (если это не было сделано ранее), а корсет металлический использовать как жесткую арматуру с добавлением необходимого количества стержней и устройством сетки оболочки, которую после установки опалубки забетонировать, превратив металлический корсет в железобетонную оболочку рассмотренного выше типа [8].

Порядок работы по переустройству корсета в железобетонную оболочку, следующий:

- 1) очистка поверхности от выветрившейся облицовки и откалывающихся частиц кладки;
- 2) промывка водой поверхности и металла пескоструйным аппаратом;
- 3) заделка всех трещин при помощи нагнетания цементного раствора под давлением;
- 4) устройство сетки по поверхности опоры с оставлением элементов корсета в системе арматуры;
- 5) бетонировка в опалубке или торкретирование.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОДВОДНОЙ КЛАДКИ ОПОР

Восстановление подводной кладки опор может производиться открытым способом или при помощи подводного бетонирования.

Восстановление опоры открытым способом можно производить при помощи шпунтового ограждения, а в зимнее время – способом вымораживания.

При двойном шпунтовом ограждении открытый котлован может быть устроен глубиной 7–8 м.

При применении металлического шпунта типа Ларенса с двойным замком глубину открытого котлована можно довести до 20 м. Наличие вокруг опоры камня от разрушенной кладки может затруднить устройство шпунтового ограждения с применением дерева; в этом случае металлический шпунт является наиболее надежным, так как его легче забить даже при наличии небольших каменных частей. Металлический шпунт имеет и то преимущество, что он может быть использован несколько раз и его забивка и вытаскивание не представляют трудности ввиду небольшой толщины его стенок [9].

После вытаскивания шпунта из грунта небольшая щель, образованная шпунтом, не влияет на осадку фундамента опоры. Для забивки металлических шпунтин наиболее удобным снарядом является свайный молот. Требуется большая точность забивки прямых участков и мест перелома. Рекомендуется для небольшой длины прямых участков предварительная сборка стенки в вертикальном положении. Отдельные шпунтины поддерживаются от падения подкосами и растяжками.

Иногда шпунтины забиваются не сразу, а постепенно на небольшую глубину. Для устройства перегибов и переломов заготавливаются специальные ветви для соединения под углом двух полос шпунтин.

Когда значительная глубина и каменные обломки исключают устройство шпунтовых ограждений, работы рекомендуется производить при помощи каркасных перемишек или при помощи подводного бетонирования. Были случаи применения и съемных кессонов для восстановления опор.

Съемные кессоны. К съемным кессонам при работе в сжатом воздухе следует прибегать в крайних случаях из-за сложности работы.

В 90-е года 20 века при восстановлении опоры одного из мостов были применены съемные кессоны, устроенные из дерева. Кессон, устроенный на всю опору, собирался на подмостях, устроенных над опорой. Потолочное пространство заполнялось бетоном, что исключило из повторное использование.

Применение песка в виде заполнителя потолочного пространства усложнило бы значительно работу по регулировке положения кессона при опускании.

Методы разборки разрушенной опоры в камере съемного кессона не же, что и в обычных кессонах.

Отдельные куски разрушенной опоры в данном случае приходилось разбирать вручную при помощи долот и кувалд.

Применение пневматических инструментов также не облегчило бы эту довольно тяжелую работу, так как бетон очень плохо поддается разработке, а применение способа подрывания в камере тоже не дает достаточной эффективности.

При одностороннем или частичном повреждении подводной кладки опор устройство съемного кессона особенно нерационально, так как кессон все равно необходимо устраивать по размерам в плане большем опоры.

Подъемка съемного кессона по мере возведения кладки производилась 4 домкратами гидравлического действия, установленными на шпальных клетках в рабочей камере.

Промежуток между кессоном и каменной кладкой быка засыпали постепенно песком, прошлюзованным снаружи, с тщательной подбивкой его под нож. Всего подъемок кессона было четыре. Как только кладка быка в кессоне была возведена над горизонтом воды, дутье воздуха в рабочую камеру было прекращено, после чего шлюзовой аппарат и шахтовые трубы были сняты и кладку быка продолжали вести открыто.

Такой способ может быть рекомендован только в исключительных случаях, когда повреждения в подводной части являются общими для опоры и устройство других ограждений исключается.

Восстановление опор способом каркасных перемычек. При отсутствии благоприятных условий для забивки шпунта восстановление возможно вести методом «жесткого пластыря», представляющего собой комбинацию деревянной проконопаченной, судового типа, обшивки и металлического остова из уголкового железа [10].

Этот способ был предложен инженером Шубиным при восстановлении в 1923-1924 гг. моста у города Бобруйска на западных железных дорогах (Рис. 3).

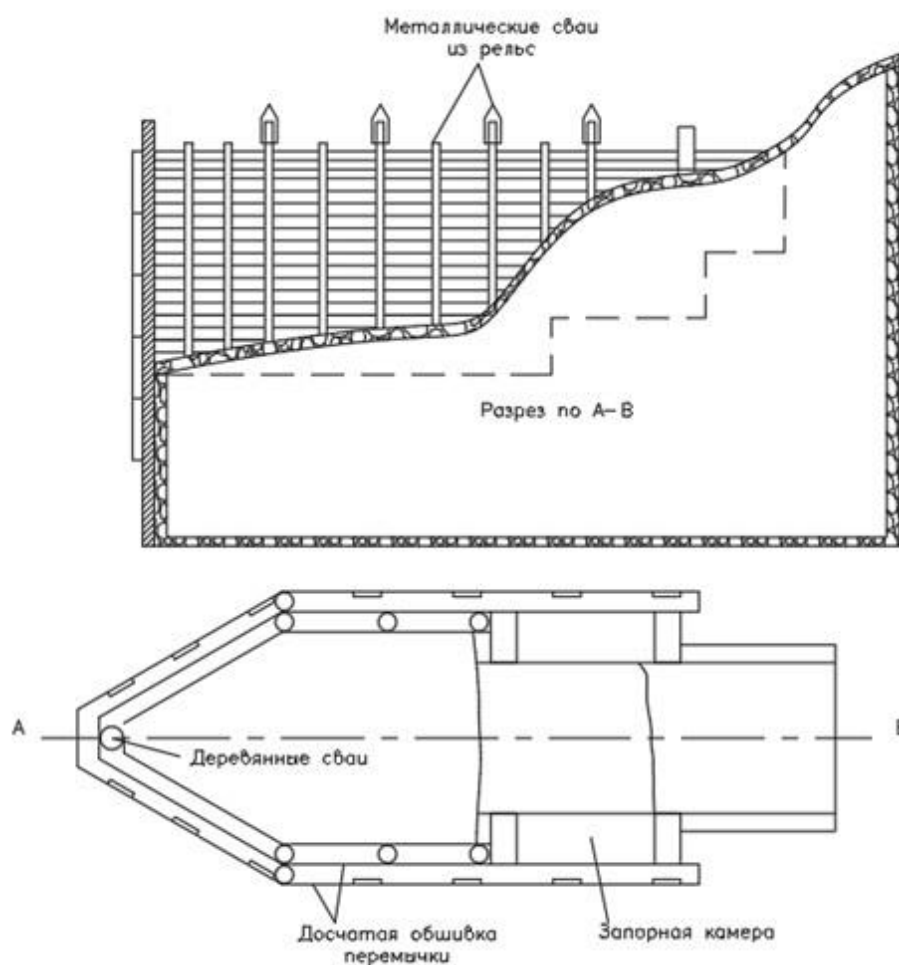


Рис. 3. План и продольный разрез каркасной перемычки

На протяжении от 6 до 12 м с каждой стороны, считая от нока быка, где была разрушена кладка опора, вокруг верховой части быка были устроены перемычки. Глубина воды у разрушенных быков была от 4 до 5 м при меженном горизонте воды, что давало максимальный столб давления воды, с учетом волны, в среднем 6 м. Для такой глубины шпангоуты из дерева вышли бы очень громоздкими, а потому был применен металлический каркас из уголкового железа сечением 150x100, сопряженным в раскосную систему между параллельными поясами, с деревянной обшивкой.

Для удобства сборки перемычка была разбита на ряд горизонтальных звеньев высотой в 1,5 м, ограниченных сверху и снизу параллельными поясами из уголкового железа [11–12].

Горизонтальные звенья в свою очередь составлялись из двух симметричных половин (полузвеньев). Уголки располагались широкой стороной внутрь камеры, а вертикальные полки, обращенные наружу, служили плоскостями для соединения звеньев перемычки друг с другом.

Стойки и раскосы устраивались также из уголков. Для облегчения пришивки досок и для большей непроницаемости обшивки в местах переломов перемишки к металлическим стойкам прикреплялись на болтах деревянные квадратного сечения бруски, к которым затем пришивались гвоздями доски обшивки (Рис. 4).

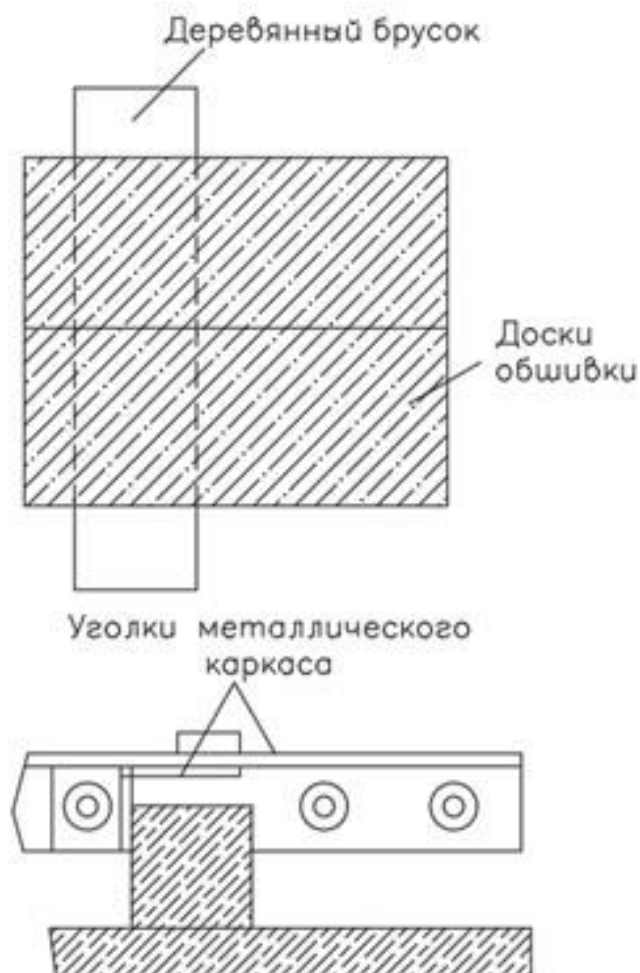


Рис. 4. Пришивка досок обшивки перемишки

Стык досок в пределах прямой плоскости устраивался вплотную на стойках. В местах же перелома перемишки у линии разлопатонок и по обе стороны носового ребра пришивались дополнительные деревянные стойки с выступающим на толщину доски гребнем (по типу носового бруса деревянных судов). В пределах последних стоек примыкающие к ним доски заделывались в четверть. Стойки с гребнями прикреплялись к поясным уголкам сквозными болтами, втопленными в тело стоек.

Головки болтов проконопачивались вокруг паклей, заливались смолой и зашивались пластинками из просмоленного кровельного железа.

Обшивочные доски перед употреблением их в дело фуговались в «шаркант», так что при нашивке с нажимом клинья доски с внутренней

стороны соприкасались вплотную, с наружной же стороны в швах оставались зазоры в 5–6 см.

В этот зазор вводились две пряди скрученной конопатки, которые пригонялись до отказа специальной металлической конопаткой без забоя и порчи кромок досок.

Поверх швов накладывались полосы драни, пришиваемые к обшивке проволочными оцинкованными скобами.

Проконопачивание швов производилось перед перевозкой перемычек на место работ.

Обшивка каркаса на берегу производилась не на всю высоту элементов перемычки, крайние доски нашивались на расстоянии 130 мм от торцевых плоскостей и оставшиеся зазоры в одну доску между двумя соседними звеньями зашивались и законопачивались в момент их соединения перед погружением в воду.

Для плотности шва между поясами соседних элементов прокладывались дюймовые доски и только уже после этого пояса соседних элементов сшивались болтами [13].

Расчистка поверхности дна у самих быков производилась водолазами. Выравнивание и планировки дна велись с большой тщательностью во избежание возможных перекосов перемычки, что создало бы расстройство швов перемычки.

На площадке укладывалась опорная подушка каркасной перемычки, которая должна находиться в строго горизонтальном положении.

Для правильности опускания звеньев перемычки в требуемое положение применялись в качестве направляющих металлические и деревянные сваи. Лучше применять деревянные сваи при хорошем грунте, так как они более устойчивы и к ним удобнее прикреплять направляющие обшивки фундамента и легко закреплять распорные клинья между поясами перемычек и направляющими сваями в момент откачки воды из рабочей камеры.

Металлические сваи из клепанных рельсов пружинили, что создавало ряд неудобств при их забивке в грунт.

Перемычки соединялись понтонами и опускались по направляющим сваям постепенно по мере соединения их звеньев. Низ камеры между телом быка и перемычкой бетонировался под водой, равно как и запорные камеры в местах примыкания перемычки к боковым поверхностям опоры.

Перед бетонированием плотность камер испытывалась цементным молотком, во время взмучивания которого водолазы с внешней стороны перемычки подконопачивали все места с признаком пропуска цементной мути.

Бетонирование камер производилась при помощи деревянных труб сечением 20х20 см, причем вначале бетоном заполнялись запорные камеры

до верха, а затем рабочие камеры на высоту 0,7 м от дна в пределах пространства между стенками опоры и внутренней стороны каркасных перемычек. Нижние звенья вынуть из воды было нельзя после бетонирования, и они оставались [14].

Бетон выстаивался в перемычке 10–12 дней, после чего перемычка освобождалась от воды.

Откачка воды производилась насосами, а во избежание деформации перемычек от давления воды необходимо было подбивать клинья, расположенные между поясами перемычек и направляющими сваями. Клинья во избежание их ослабления и всплытия пришивались гвоздем к сваям.

Рабочие камеры на ночь заполнялись водой. Как показала практика, перемычки во время работы воду не пропускали и обсыхали с внутренней стороны.

После откачки воды производится разборка слабой или тронутой взрывом бутовой кладки. Фундамент разбирается горизонтальными уступами для получения наиболее прочной связи с вновь возводимой кладкой быков.

Для удобства и быстроты восстановления по направляющим сваям с их внутренней стороны была нашта сплюшная дощатая опалубка по контуру носовой части фундамента быка, в пределах которой по промывке старой кладки цементным молотком велась новая бутовая кладка.

При работе неполные сутки рабочие камеры желателъно заливать водой с последующей откачкой воды перед началом работ во избежание нарушений работы перемычки от воздействия воды. Перед работой после откачки воды кладка промывается цементным молотком, после чего по заранее выравненной поверхности опоры производилась кладка.

Каркасные перемычки применены и для полного окружения быка, с тем, чтобы в пределах осевой плоскости быков расположились вертикальные стыки звеньев по устройству аналогично горизонтальным поясам соединениям. Работа в этом случае будет удобна, так как возможность боковой фильтрации из-под кожухов исключена, п с фильтрацией через дно могут справиться насосы [15].

Ели каркасная съемная перемычка охватывает не весь бык, надо обратить особенное внимание на возможное плотное примыкание поперечных стенок к поверхности быка.

Кроме вышеуказанного способа изоляции рабочей камеры от воды в виде устройства запорных камер можно рекомендовать и другой способ.

Для этого ребра щитов перемычки, примыкающие к быку, снабжаются подушками из брезента, плотно набитыми просмоленной паклей.

Все щели в примыкании поперечной стенки к кладке конопатятся под водой водолазами. При откачке воды из-за перемычки она будет плотно прижата подушками к поверхности быка. Подобные перемычки не следует при перерывах работы заливать водой, так как плотность примыкания поперечных ее стенок к быку будет нарушаться.

Каркасные перемычки имеют следующие преимущества:

1) Перед съёмными кессонами – вследствие большой простоты конструкции возможность вести работы с большей скоростью без необходимости разработки здоровой каменной кладки для опускания кессона до требуемой глубины;

2) Перед двойным шпунтовым ограждением при наличии на дне каменной наброски, затрудняющей, а в некоторых случаях не допускающей забивки деревянных шпунтовых ограждений и при большой глубине реки, когда придание водонепроницаемости междушпунтовому заполнению весьма затруднительно;

3) Перед двойными ряжевыми перемычками при большой глубине и наличии большого продольного или поперечного уклона дна реки и в следствие попадания на дно реки камня от разрушенной подводной и надводной части опор;

4) Удобство заготовки на берегу и доставки на место установки частей перемычки в следствие делимости ее на отдельные полуженья сравнительно небольшого веса.

Подводное бетонирование. Каркасные перемычки, применяемые для ремонта подводной части опоры, требуют довольно тщательной работы по обеспечению водонепроницаемости и не всегда они могут быть применены, особенно в случае, когда повреждена кладка на значительной глубине.

Идею каркасной перемычки возможно применить со значительным упрощением ее конструкции при условии производства бетонирования опоры в подводной части без водоотлива. Для этого каркасная перемычка заменяется каркасной опалубкой с простейшим конструктивным устройством, обеспечивающим устойчивость ее на оставшейся части опоры. Перед постановкой опалубки водолазами производится разборка поврежденной кладки с очисткой ее от илистых отложений промывкой из брандспойтов.

Опалубка устраивается по форме опоры с последующей установкой ее на оставшуюся часть опоры. После установки опалубки производится подводное бетонирование с предварительным, если необходимо, нагнетанием цементного раствора в кладку в местах, где будут обнаружены пустоты и повреждения в виде трещин.

Подводное бетонирование может быть произведено по так называемому шведскому способу. При подводном бетонировании по

шведскому способу бетон получается хорошего качества, который полностью защищается от выщелачивания, так как монолитность бетона не нарушена илистыми прослойками.

Бетон подается по трубам. Применяются трубы диаметром 25–30 см [16]. По мере подачи бетона труба постепенно приподнимается вертикально вверх, причем бетонная масса наращивается по всей площади основания. Трубы в период бетонирования из бетона не вынимаются, а вновь поступающий бетон не соприкасается с водой, что обеспечивает ему высокое качество

Посредством одной трубы отливаются массивы площадью до 6 х 6 м. При значительных площадях бетонирование производится отдельными отсеками при одной трубе или сразу по всей площади несколькими трубами. Отливка должна производиться сразу в один прием без перерывов. Этот способ применим и для бетонирования подводных сопряжений, армированных железом.

Для подводного бетонирования применяют и бетонные насосы, подающие в котлован густой, тестообразный пластичный бетон, регулируя его выход соответствующим напором. Наибольшее расстояние подачи бетона насосом достигает по горизонтали 200 м, по вертикали в 45 метров и с часовой производительностью 15 м^3 . Бетононасосы изготавливают производительностью до $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ при диаметре бетоновода $d=12 \text{ см}$. Изменение направления трубопроводов делается изгибом труб при радиусе 1,5 м.

Бетонные смеси на 1 м^3 раствора содержат обычно 250–320 кг цемента и 600–800 кг песка. Максимальная величина инертных заполнителей 75 мм; лучше применять гравий или мелкую тальку, а также цемент пуццолановый с добавками трепела или трасса.

ПЕРЕКЛАДКА ОПОР

Если повреждения кладки настолько серьезны, что нельзя применить вышеуказанные способы ремонта, необходимо произвести перекладку опоры.

Прежде чем приступить к кладке опоры, необходимо произвести разборку поврежденной части кладки опоры. Разборку верхней части кладки можно производить ручным способом при помощи отбойных молотков (для опор из бута) или при помощи взрывчатых веществ – подрыванием (опоры из бетона).

На московских мостах бутовую кладку разбирали отбойными молотками сравнительно легко по 5 м^3 на молоток в смену. Бетонную кладку отбойными молотками разобрать очень трудно. Лучшим способом разборки бетонных опор является способ подрывания, хотя этот способ

опасен для рядом расположенных пролетных строений в силу значительной воздушной волны, возникающей во время взрыва и разлета осколков.

Работы по разборке верха опоры при помощи взрывных работ сводятся к следующим операциям:

- 1) Выделка шпуров перфораторами;
- 2) Закладка зарядов в шпуре и производство взрыва;
- 3) Расчистка верха опоры от обломков кладки.

Снятие верха быка производится до неповрежденной части тела быка, после чего производится на выравненной площадке установка опалубки и бетонирование опоры на прежнюю высоту.

Если опоры разрушены полностью, то кладка ведется обычно, так же как и новой опоры. Проводится предварительная подготовка основания опоры, если нужно, с введением в нижнюю оставшуюся часть опоры цементного раствора под давлением. Необходимо иметь в виду, чтобы во время разборки не оставалась поврежденная кладка, новая кладка возводилась на надежной части опоры.

При восстановлении опоры с надстройкой верхней части ее при помощи новой кладки могут иметь место случаи, когда пролетное строение необходимо снять с опоры на новые временные опоры. В этом случае необходимо рядом с опорой возвести временные опоры [17]. Временные опоры могут быть устроены на свайном основании, если грунт позволяет произвести забивку свай, или на рамно-лежневом основании, если вокруг опоры имеется значительная каменная отсыпь, которая препятствует произвести работы по забивке свай. Необходимо также выровнять каменную наброску с добавкой камня и на этом основании установить рамную опору.

Ряжее основание следует применять, если глубина и грунт исключают применение свайной, так и рамно-лежневой опоры. При устройстве временных опор могут быть использованы металлические опоры системы ЛИИЖТ. Рама такой опоры рассчитана на опирание пролетного строения 23 м пролета, но они могут быть спарены в одной опоре.

Перестановка пролетного строения производится при помощи домкратов.

При устройстве новых временных опор желательно точку опирания выбирать под узлом, а не в панели. В этом случае если и будет усиление, то в значительно меньшем объеме и с меньшей затратой по времени.

При умеренных пролетах, до 40–50 м, временные опоры могут быть устроены по бокам пролетного строения с опиранием его на мощную поперечную балку из двутавровых балок или на балку, поддержанную шпренгелем. Подобное устройство дает возможность применения свайного

основания и при меньшей высоте моста, когда капер не помещается над пролетным строением, а при ряжевом основании может избавить работы по расчистке дна для установки ряжей или уменьшить объем этой работы [18].

Убирать временную надстройку на массивной опоре, устроенную при временном восстановлении, не всегда обязательно. Если эта надстройка из металла или хотя бы из дерева, и в виде рам, а не клеток или ряжа, можно произвести бетонировку опоры без разборки временных опор и перестановки пролетного строения. Это значительно облегчит работы по капитальному восстановлению, сократит время работ и не потребует прекращения движения поездов. На Яхромском мосту через канал Москва – Волга этот способ был применен, и деревянные стойки надстройки были забетонированы в опоре. Схватки при бетонировке опоры постепенно снимались.

Если над опорой устроена металлическая надстройка, то она может быть целиком забетонирована. Это придаст опоре прочности, мы получим опору более высокого качества [19].

При бетонировании деревянных и металлических опор необходимо тщательно произвести осмотр с последующей очисткой и удалением ржавчины, гнили, краски и т. д. При таком способе не требуется устройство временных опор, и перестановка пролетного строения производится только в период устройства железобетонной подферменной площадки и верхней части опоры.

Перекладку опор производят по частям:

- между опорными частями возводят шпальные клетки;
- переустанавливают на опорные части пролетного строения при помощи домкратов;
- убирают старые опорные части;
- срезают верхние концы стоек опор;
- производят бетонирование оставшейся части опор.

При таком способе работ потребуется небольшое усиление опорной поперечной балки в месте временного опирания пролетного строения на шпальные клетки.

Бетонирование верхней части опоры производится обычными способами с устройством опалубки.

Наличие на опоре деревянных или металлических рам облегчает работы по устройству опалубки, которую значительно проще и надежнее можно устроить и установить на опоре.

Надстройка опоры при разрушении и подводной части производится в том же порядке, как описано выше. В этом случае требуется сначала возвести подводную кладку опоры способами, которые уже были описаны выше.

При возведении новой кладки из бетона или бутобетона нужен бетонный завод со всеми необходимым оборудованием. Учитывая то, что работы на каждом мосту будут по объему небольшие при значительном количестве таких мостов и отдельных объектов, рационально иметь бетонный завод на колесах. Рекомендуется применять подвижный бетонный завод.

При значительных работах в одном месте возможна организация стационарного бетонозавода на берегу с доставкой бетона на опору или по наплавному мосту, или при помощи кабель-крана, или отдельными баржами при ограниченном количестве точек. Наиболее целесообразно применять кабель-кран, который облегчит транспорт бетона, как по горизонтали, так и по вертикали. Такой способ в настоящее время достаточно освоен строительными организациями при восстановлении мостов.

При необходимости вертикальной подачи бетона рекомендуется использовать бетононасосы, которые дают высокую производительность. Использование бетононасосов при наличии оборудования в мостопоездах возможно и желательно. Могут быть использованы и шахтоподъемники, и краны-укосины, и другие способы, известные в практике строительства опор.

Техника укладки бетона общеизвестна и здесь не приводится.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Капитальное восстановление массивных опор мостов больших пролетов в каждом частном случае будет иметь много индивидуальных особенностей.

2. Ремонт поврежденных опор с расстроеной части кладки мало отличается от ремонта и усиления опор, производимого на существующих мостах.

3. Восстановление полуразрушенных опор по удобствам в производственном отношении преимущественно следует производить бетонированием, а разборку слабо поврежденной кладки подрыванием.

4. Наибольшие трудности представит ремонт опор в подводной части. Во многих случаях стальные шпунтовые перемычки дадут экономию в работе и упрощение, вследствие чего желательно иметь у организаций, производящих работу, инвентарный запас стальных шпунтовых свай.

5. Разборные каркасные перемычки ввиду своих многих преимуществ могут быть использованы при подводных работах, но ввиду ряда особенностей в их конструкции и установке необходимо разработать

несколько типовых проектов таких перемычек и их установки, которые облегчат их применение на местах

6. В организационном отношении мелкие работы по ремонту опор могут быть выполнены распоряжением самих дорог, что же касается крупных работ, то они резко различаются от работ по временному восстановлению, в которых восстановительные организации приобрели опыт за время Отечественной войны.

Работы по капитальному восстановлению опор потребуют и иного оборудования, и руководителей, и рабочей силы несколько иных специальностей.

В связи с этим необходимо будет создание специальной организации, которая специализировалась бы на работах по восстановлению разрушенных и полуразрушенных опор.

Основные виды работ, выполняемые ею, будут: разборка кладки, бетонные и железобетонные работы, устройство перемычек и водоотлив, подводное бетонирование, инъекция раствора, торкретирование.

Объем работ на каждом объекте будет обычно не очень велик, но количество объектов весьма значительно, в силу чего производственные единицы организации нужны не особенно мощные, но обладающие большой подвижностью в виде поездов с необходимым оборудованием, квалифицированной силой и достаточным запасом различных материалов.

РЕКОМЕНДАЦИЯ К ПЕЧАТИ

Кандидат военных наук, доцент ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого» Алексеев Сергей Викторович является научным руководителем авторов статьи и рекомендует данную статью к публикации.

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. Прокопов А.Ю., Онисар В.Р. Влияние общего и местного размыва на опоры мостов // Материалы национальной научно-практической конференции. – 2018. – С. 574–576. [Prokopov AYu, Onisar VR. Vliyanie obshchego i mestnogo razmyva or opory mostov. *Materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii*. 2018;574-576. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37285437>. Ссылка активна на 17.03.2021.
2. Казеннов Е.А. Методы обследования и восстановления внутренней кладки массивных опор эксплуатируемых мостов: дисс. канд. техн. наук. Москва, 2009. – 26 с. [Kazennov EA. *Metody obsledovaniya i vosstanovleniya vnutrennej kladki*

- massivnyh opor ekspluatiruemyh mostov: dissertation of the Candidate of technical Science. Moscow; 2009. 26 p. (In Russ.)). Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004406662>. Ссылка активна на 17.03.2021.
3. Талантова К.В. Сталефибробетон в восстановлении и усилении опор автодорожных мостов // Дефекты зданий и сооружений: усиление строительных конструкций. – 2015. – С. 154–158. [Talantova KV. Stalefibrobeton v vosstanovlenii i usilenii opor avtodorozhnyh mostov. *Defects in buildings and structures strengthening of building structures*. 2015;154-158. (In Russ.)). Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24228415>. Ссылка активна на 17.03.2021.
 4. Федосеев И.А. Предложение по применению конструкций башенных кранов в строительстве военных мостов из местных материалов // Аллея науки. – 2018. – № 2 (18). – С. 107–113. [Fedoseev IA. Predlozhenie po primeneniyu konstrukcij bashennyh kranov v stroitel'stve voennyh mostov iz mestnyh materialov. 2018;2(18):107-113. (In Russ.)). Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32642714>. Ссылка активна на 17.03.2021.
 5. Юшков В.С., Кычкин В.И., Бармин Н.Д. Реализация диагностики и ремонта мостовых сооружений // Вестник МГСУ. – 2016. – № 6. – С. 118–125. [Yushkov VS, Kychkin VI, Barmin ND. Realizaciya diagnostiki i remonta mostovyh sooruzhenij. *Vestnik MGSU*. 2016;(6):118-125. (In Russ.)). Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26210458>. Ссылка активна на 17.03.2021.
 6. Копыленко В.А. Малые водопропускные сооружения на дорогах России: учеб. пособие. – М.: УМЦ по образованию на ж/д транспорте. – 2013. – 444 с. [Kopylenko VA. *Malye vodopropusknye sooruzheniya na dorogah Rossii: schoolbook*. Moscow: *Training and methodological center for education in railway transport*; 2013. 444 p. (In Russ.)). Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21195264>. Ссылка активна на 17.03.2021.
 7. Тимофеев Д.Р., Тимофеев Д.Д. Усиление мостовых конструкций с использованием композиционных материалов // Актуальные проблемы автомобильного, железно-дорожного, трубопроводного транспорта в Уральском регионе : материалы междунар.науч.-техн. конф. (1–3 декабря 2005 г.). Пермь: ПГТУ. – 2005. – С. 45–51. [Timofeev DR, Timofeev DD. Usilenie mostovyh konstrukcij s ispol'zovaniem kompozicionnyh materialov. Aktual'nye problemy avtomobil'nogo, zhelezno-dorozhnogo, truboprovodnogo transporta v Ural'skom regione: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (1-3 dekabrya 2005 g.). Perm': PGTU. 2005;45-51. (In Russ.)). Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002872497>. Ссылка активна на 17.03.2021.
 8. Бокарев С.А., Засухин И.В. К вопросу о долговечности массивных опор мостов // Вестник томского ГАСУ. – 2018. – С. 185–197. [Bokarev SA, Zasukhin IV. K voprosu o dolgovechnosti massivnyh opor mostov. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2018;185-197. (In Russ.)). Доступно по: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/484>. Ссылка активна на 17.03.2021.
 9. Тимофеева Н.В. Совершенствование оценки состояния подводной части массивных опор эксплуатируемых мостов: дисс. канд. техн. наук. СПб; 1996. – 23 с. [Timofeeva NV. Sovershenstvovanie ocenki sostoyaniya podvodnoj chasti massivnyh opor ekspluatiruemyh mostov: dissertation of the *Candidate of technical Sciences*. St. Petersburg; 1996. 23 p. (In Russ.)). Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000113177>. Ссылка активна на 17.03.2021.

10. Юдина Н.П. Методы ремонта и усиления опор моста // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом». – 2016. – С. 189. [Yudina NP. Metody remonta i usileniya opor mosta. *International scientific and practical conference "Actual problems of technical sciences in Russia and abroad"*. 2016. p. 189. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25131225>. Ссылка активна на 17.03.2021.
11. Kerpatsoglou K, Karlaftis MG, Bitsikas T, et al. A methodology and decision support system for scheduling inspections in a bridge network following a natural disaster. *Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - Bridge Maintenance, Safety, Managemen.* 2006;32-41. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000129
12. Civera M, Calamai G, Fragonara ZL. System identification via Fast Relaxed Vector Fitting for the Structural Health Monitoring of masonry bridges. *Structures* 30. 2021;277-293. doi: 10.1016/j.istruc.2020.12.073
13. Lu P, Zhang J, Li D, Zhou Y, Shi Q. Conceptual design and experimental verification study of a special-shaped composite arch bridge. *Structures* 29. 2021;1380-1389. doi: 10.1016/j.istruc.2020.12.018
14. Reis ED, Souza DLCE, Carvalho H, et al. Structural Safety and Stability of the Bridge on the Paraopeba River in Moeda, Minas Gerais, Brazil: Case Study. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2021;26(1):05020012. doi: 10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000529
15. Chen X, Li C. Seismic assessment of tall pier bridges with double-column bents retrofitted with buckling restrained braces subjected to near-fault motions. 2021;226;111390. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111390
16. Saydan M, Unal A, Keskin US, Kansun G. An investigation of the current situation of the Misirlioğlu Bridge and possible damages after freeze-thaw by using finite elements analysis, Silile – Konya (Central Anatolia, Turkey). *Engineering Failure Analysis* 117. 2021;104788. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104788
17. Colford BR., Beabes SR., Bulmer VJ. Bridge Design for Inspection and Maintenance — a UK and US perspective. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Bridge Engineering*. 2019;172(4):246-256. doi: 10.1680/jbren.18.00061
18. Zhao J, Zuo MJ, Cai Z, Si S. Post-disaster recovery optimization for road-bridge network considering restoration ability and economic loss. *Proceedings - Annual Reliability and Maintai.* 2020;364-397. doi: 10.1109/rams48030.2020.9153632
19. Charron N, McLaughlin E, Phillips S, Goorts K. Automated Bridge Inspection Using Mobile Ground Robotics. *Journal of Structural Engineering*. 2019;145(11):04019137. doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002404

Сведения об авторах:

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

Борисов Вячеслав Андреевич, студент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 8054-4914; ORCID: 0000-0002-8596-7020;
E-mail: borisov.va@edu.spbstu.ru

Васильев Кирилл Андреевич, студент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 8250-4609; ORCID: 0000-0002-1013-2029;
E-mail: vasiliev2.ka@edu.spbstu.ru

Information about the authors:**Gleb A. Averchenko**, assistant;

eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;

E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Vyacheslav A. Borisov, student;

eLibrary SPIN: 8054-4914; ORCID: 0000-0002-8596-7020;

E-mail: borisov.va@edu.spbstu.ru

Kirill A. Vasiliev, student;

eLibrary SPIN: 8250-4609; ORCID: 0000-0002-1013-2029;

E-mail: vasiliev2.ka@edu.spbstu.ru

Цитировать:

Аверченко Г.А., Борисов В.А., Васильев К.А. Капитальное восстановление массивных опор мостов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 30–55. doi: 10.17816/transsyst20217330-55

To cite this article:

Averchenko GA, Borisov VA, Vasiliev KA. Major restoration of massive bridge supports. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):30-55. doi: 10.17816/transsyst20217330-55

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.027.3

DOI 10.17816/transsyst20217356-66

© **Е. М. Волкова**

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

РАЗВИТИЕ СОВМЕСТНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ В ГОРОДСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Эволюция организации и управления городским транспортом приводит к возникновению новых форм производства и потребления транспортных услуг. Данная тенденция усиливается в период интенсивного развития новых технологий, к которым в настоящий период можно отнести цифровые, результатом использования которых в сфере транспорта является появление «умных» транспортных систем. Однако интеллектуальная транспортная система предполагает не только широкое применение информационно-коммуникационных технологий, но и изменение бизнес-моделей транспортных компаний, форм их взаимодействия с конкурентами и потребителями. К одной из таких новых форм относится совместное потребление транспортных услуг, являющееся частью экономики совместного потребления. Последняя предполагает сокращение частной собственности на различные объекты материального мира и совместное использование благ в разных отраслях. Преимущественно совместное потребление развивается в таких сферах, как аренда жилья, торговля и закупки, поиск работы, проектное финансирование. В последнее время обращает на себя внимание ускоренное развитие совместного потребления транспортных услуг с сопутствующим развитием электронных сервисов поиска попутчиков. Эта тенденция может в ближайшем будущем существенно повлиять на структуру рынка транспортных услуг, а также на формы и способы ведения бизнеса в сфере городского транспорта, поэтому исследование сегмента совместного потребления на транспорте приобретает особую актуальность. Целью данной статьи является классификация новых бизнес-моделей в сегменте совместного потребления транспортных услуг, а также выявление проблем их развития в российских мегаполисах. В качестве исходных данных использовались материалы открытых источников, российских и зарубежных научных статей об экономике совместного потребления.

Ключевые слова: городской транспорт, экономика совместного потребления, каршеринг, пассажирские перевозки, интеллектуальная транспортная система.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© **E. M. Volkova**

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

SHARING ECONOMY DEVELOPMENT IN URBAN TRANSPORT SYSTEMS

The evolution of urban transport systems leads to the emerging of new forms of transport services. This trend is increasing during the period of intensive development of new technologies, for example, digital technologies and smart transport systems. However, smart transport system involves not only implementation of information and communication technologies, but also changes in the business model of transport company, forms of their interaction with competitors and consumers. One of this new forms is transport sharing, which is the part of sharing economy. The latter involves the reduction of private ownership and sharing of benefits in different industries. Sharing economy is mainly develops in such areas as housing rental, trade and procurement, job search, and project financing. Recently, the accelerated development of sharing consumption of transport services with the accompanying development of electronic travel search services has attracted attention. This trend may in the near future significantly affect the structure of transport market, as well as forms and methods of doing business in urban transport, so the study of the segment of shared consumption in transport is of particular relevance. The purpose of this article is classification of new business models in the segment of transport sharing, as well as identification of the problems of transport sharing development in Russian megacities. The material for the research was taken from open sources, available publications and scientific articles on the economy of shared consumption.

Keywords: urban transport, sharing economy, carsharing, passenger transportation, smart transport system.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в развитии рыночной экономики проявляются тенденции развития совместного потребления различных благ. Эти тенденции усиливаются благодаря постоянному появлению новых цифровых сервисов, которые делают взаимодействие участников более быстрым и удобным. Как следствие, можно говорить о том, что экономика совместного потребления становится неотъемлемой частью IV технологического уклада. Само словосочетание «экономика совместного потребления» появилось сравнительно недавно, поэтому данный термин имеет множество синонимов: шеринг-экономика (от англ. share – делиться), экономика peer-to-peer, трастовая экономика и т.д. [1].

Основная идея экономики совместного потребления заключается в уменьшении совокупной потребности в ресурсах и сокращении частной собственности на них путём совместного использования конечных благ, их многократной аренды и перепродажи. Процесс совместного использования, как правило, опосредован современными цифровыми технологиями, предоставляющими информацию о доступных благах и контролирующими их потребление. Социологи видят основную позитивную черту экономики совместного потребления в изменении менталитета потребителя: теперь он не стремится к обладанию благами, их

получению в частную собственность, а пользуется ими в определённые временные отрезки. Это закладывает основу трансформации общества потребления в общество совместного потребления.

В любом случае экономика совместного потребления развивается достаточно быстрыми темпами, расширяется её потенциал в различных отраслях. Так, экономика совместного потребления применяется в таких видах бизнеса, как краткосрочная аренда жилья (например, с использованием цифровых площадок Booking.com) и рабочего пространства (так называемые коворкинги), онлайн-кинотеатры, перепродажа и обмен товаров конечного потребления, сервисы поиска работников, совместное проектное финансирование. Особое место среди отраслей, использующих совместное использование благ, занимает транспорт.

МОДЕЛИ СОВМЕСТНОЙ МОБИЛЬНОСТИ

Модели совместного потребления транспортных услуг, или совместной мобильности (Shared mobility), являются значимой частью экономики совместного потребления. Интересно, что история каршеринга началась в Европе ещё в 1940-х гг. Однако спрос на данный вид услуг значительно вырос в 1990-е гг., и они стали оказываться в странах Северной и Южной Америки, Азии и в Австралии [2]. Несмотря на то, что каршеринг является наиболее распространённой формой совместной мобильности, помимо него существует множество других бизнес-моделей в рассматриваемом сегменте транспортного рынка.

По своему содержанию эти бизнес-модели можно разделить на две большие группы (Рис. 1):

- А) модели совместного использования транспортных средств;
- Б) модели совместных поездок.

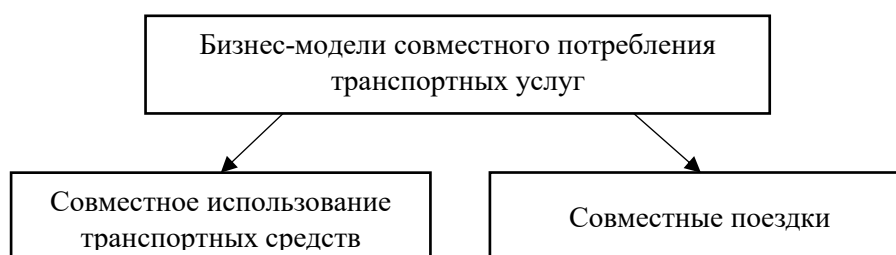


Рис. 1. Классификация бизнес-моделей совместного потребления транспортных услуг

Рассмотрим бизнес-модели, представленные на Рис. 1, подробнее. Совместные поездки предполагают осуществление поездок с попутчиками с использованием специальных онлайн-сервисов. Бизнес-модели совместных поездок, в свою очередь, можно разделить на коммерческие

(райдхейлинг) и некоммерческие (райдшеринг). Последние предполагают кооперацию водителя и пассажиров с целью экономии на транспортных расходах для всех участников. Данная модель реализуется в том числе через коммерческие онлайн-сервисы поиска попутчиков. Коммерческие бизнес-модели совместных поездок (райдхейлинг) по сути представляют собой такси с предварительным заказом через мобильное приложение. Такие модели реализуются как организациями, так и индивидуальными предпринимателями (водителями). Поездки могут быть как с одним пассажиром, так и с несколькими, следующими в одном направлении.

Бизнес-модели совместного использования транспортных средств предполагают краткосрочную (чаще всего поминутную) аренду транспорта с использованием специальных цифровых сервисов для их заказа. Данные бизнес-модели можно классифицировать по виду арендуемого транспорта: каршеринг – аренда легковых автомобилей, байкшеринг – аренда велосипедов, аренда скутеров, самокатов и иных видов транспортных средств. Как уже отмечалось ранее, наиболее распространён среди названных каршеринг.

Каршеринг может быть реализован в B2C (компания – клиент), P2P (частный собственник – клиент), B2B (корпоративный каршеринг) и каршеринг целевого назначения. Также каршеринг можно разделить на использование транспорта по определенным маршрутам с возвратом на определённые стоянки и свободное использование транспорта. Таким образом, существует большое разнообразие бизнес-моделей совместной мобильности в городах, особенно в случае каршеринга.

КАНВА РОССИЙСКИХ БИЗНЕС-МОДЕЛЕЙ СОВМЕСТНОЙ МОБИЛЬНОСТИ

Далее для более детальной идентификации и выделения особенностей российских бизнес-моделей совместной мобильности будет применяться такой инструмент, как канва бизнес-модели (Business Model Canvas), разработанный А. Остервальдером и И. Пинье [3]. Систематизированное описание бизнес-модели и её ближнего окружения представлено в Табл. 1.

В исследовании Gilibert, M., & Ribas, I. [4] канва бизнес-модели совместной мобильности представлена в целом и по трём видам услуг: каршеринг, райдшеринг и райдхейлинг. Однако данное описание не вполне отражает специфику российского рынка, поэтому автором оно доработано и адаптировано с учётом форм и методов государственного регулирования, а также особенностей и проблем рынка транспортных услуг в мегаполисах Российской Федерации.

Таблица 1. Схема описания бизнес-модели (канва)

Ключевые партнёры (Key Partnerships)	Основные виды деятельности (Key Activities)	Ценность для клиента (Value Propositions)	Взаимоотношения с клиентами (Customer Relationships)	Сегменты потребителей (Customer Segments)
	Ключевые ресурсы (Key Resources)		Каналы продаж (Channels)	
Состав затрат (Cost Structure)			Источники дохода (Revenue Streams)	

Источник: адаптировано автором по материалам [3]

Адаптированная канва бизнес-модели совместной мобильности в российских мегаполисах представлена в Табл. 2.

В Табл. 2 курсивом выделены те элементы, которые недостаточно развиты на российском рынке совместной мобильности в мегаполисах. Остановимся на них более подробно.

Среди **пользователей услуг совместной мобильности** за рубежом присутствуют такие сегменты, как бизнес, муниципальные образования, органы государственного регулирования, крупные университеты и туристские сообщества. В России круг пользователей значительно уже вследствие наличия целого ряда факторов, препятствующих развитию данного сегмента рынка [4].

Ключевые ценности для клиентов рассматриваемых транспортных услуг в России и за рубежом в целом идентичны. Среди них следует отметить инновационные подходы к планированию, заказу и оплате услуг совместной мобильности. Помимо этого каждая бизнес-модель совместной мобильности имеет собственные специфические преимущества. Например, коммерческие совместные поездки популярны благодаря невысокой стоимости и высокой точности планирования поездки. Некоммерческие совместные поездки отличаются низкой ценой, поскольку водитель не извлекает прибыль, а только покрывает свои затраты за счёт попутчиков. Кроме того, совместные поездки обеспечивают снижение уровня автомобилизации. Ключевая ценность каршеринга заключается в лёгкости доступа к услуге за счёт отсутствия процесса оформления бумажной документации и близости транспортных средств.

Таблица 2. Канва бизнес-модели совместной мобильности в российских мегаполисах

Ключевые партнеры	Основные виды деятельности	Ценность для клиента	Взаимоотношения с клиентами	Сегменты потребителей
региональные Комитеты по транспорту и органы исполнительной власти, ответственные за разработку транспортной политики; предприятия и организации общественного транспорта; провайдеры интернет-платформ и услуг геолокации; производители транспортных средств; производители топлива и электроэнергии; страховщики и банки; инвесторы; промоутеры водители-фрилансеры (для	оптимизация и управление онлайн-платформами и мобильными приложениями; управление заказами, платежами и договорами; клиентский сервис и маркетинг;	простота оформления заказа через мобильное приложение; безналичная оплата; прозрачность цен; работа 24/7.	единовременная регистрация клиента; работа службы поддержки; система отслеживания репутации клиента.	частные и корпоративные клиенты; разовые и регулярные; внутри города и за его пределами (пригородные пассажиры); дневные и ночные пассажиры; пассажиры общественного транспорта;
	для каршеринга и райдхейлинга: управление парком транспортных средств; предоставление транспортных средств / услуг по заказам; оптимизация географического размещения транспортных средств / водителей; содержание и ремонт транспортных средств (в случае модели B2C); найм водителей и составление графика их работы, управление взаимодействием с собственниками автомобилей.	для райдхейлинга: гибкость, удобство, низкие цены поездок; возможность индивидуальных и совместных поездок; предоставление информации о местоположении транспорта и водителе; дополнительный источник дохода для водителей-фрилансеров (в модели P2P).	для райдхейлинга: веб-сервисы для контакта водителей и попутчиков.	бизнес; органы государственного регулирования.
	для райдшеринга: обеспечение связи водителей с попутчиками; укрепление доверия клиентов. Ключевые ресурсы транспортные средства; мобильные приложения, технологические и цифровые платформы;	для райдшеринга: возможность совместных поездок (в модели P2P); обслуживание как по предварительной договоренности, так и в режиме реального времени. для каршеринга:	Каналы продаж мобильные приложения, в т.ч. для мультимодальных поездок; веб-сайты; колл-центры по обслуживанию	для каршеринга: муниципальные образования; университеты; туристские сообщества.

райдшейлинга); владельцы автомобилей и парковок (для каршеринга)	<i>страховые полисы; инфраструктура для подзарядки;</i> для каршеринга: управляющие парком транспортных средств; парковочные пространства; для райдшейлинга: квалифицированные водители; лицензии; техника и технология для навигации и маршрутизации; техника и технология для расчёта стоимости поездки.	почасовая и поминутная аренда; цифровой код доступа к машине; развитая дифференциация услуг (по марке автомобиля, режиму обслуживания, маршрутам, режиму возврата машин); <i>дополнительный источник дохода для собственников автомобилей, желающих их предоставить в аренду.</i>	и приёму заказов. для райдшейлинга: горячие линии для заказа для райдшеринга: автостоянки; транспортно-пересадочные узлы; службы заказа компаний. для каршеринга: специальные парковки; службы заказа компаний.	
Состав затрат затраты на оплату труда; техническая поддержка программного и аппаратного обеспечения; <i>расходы на НИОКР;</i> маркетинг; содержание инфраструктуры; <i>страховые расходы;</i> для каршеринга и райдшейлинга (в случае модели В2С): приобретение и текущее содержание парка транспортных средств; приобретение и текущее содержание парковочных пространств.			Источники дохода плата за пользование и комиссия за обслуживание. для райдшейлинга: фиксированный тариф плюс ставка за единицу обслуживания (км, мин.); оплата дополнительных услуг. для райдшеринга: абонентская плата доходы от рекламной деятельности. для каршеринга: оплата регистрации и ежемесячная оплата; ставка за единицу обслуживания (км, час, мин.); оплата дополнительных услуг, доходы от рекламы.	

Реализацию ключевых ценностей обеспечивают **каналы продаж**, в основном цифровые. Это в первую очередь мобильные приложения, предоставляемые платформами MaaS (Mobility as a Service), веб-сайты компаний, SMM-каналы и др. Наряду с цифровыми каналами продаж у многих компаний, предоставляющих услуги совместной мобильности, открыты «горячие линии». Услуги райдшеринга могут также предоставляться на остановках общественного транспорта или на территории транспортно-пересадочных узлов, услуги каршеринга – на парковках.

Поскольку цифровые каналы продаж предполагают самообслуживание, особую важность приобретают **способы взаимоотношения с клиентами**, среди которых службы поддержки и обратной связи. В совместных поездках с коммерческой целью взаимодействие с потребителями осуществляется непосредственно через наёмных работников – водителей.

Источники дохода, а также системы тарификации существенно различаются по видам услуг. В структуре доходов от оказания услуг каршеринга можно выделить постоянную и переменную части [5]. Переменная часть зависит от продолжительности поездок или от сочетания их продолжительности и расстояния. Постоянная часть – это оплата абонемента за членство в сообществе пользователей, гранты и государственные субсидии (данная составляющая отсутствует в России), спонсорская помощь и доходы от рекламы. В случае коммерческих совместных поездок возможны различные подходы к ценообразованию: оплата поездки может быть как фиксированной, так и по ставке за единицу расстояния или времени. Дополнительные источники дохода – оказание дополнительных услуг (например, машины премиум-класса или предоставление детских сидений). Сервисы поиска попутчиков получают в качестве доходов комиссионные сборы за каждую поездку или предполагают платную подписку абонентов.

Ключевыми активами компаний, предлагающих услуги совместной мобильности, являются транспортные средства и программное обеспечение, системы электронной оплаты, а также специалисты и информация (данные о пользователях). Состав иных активов зависит от бизнес-модели и вида транспортной услуги.

Поскольку основными активами для компаний, оказывающих услуги совместной мобильности, являются информационно-коммуникационные технологии, управление ими – один из **основных видов деятельности** помимо транспортировки. Кроме того, для каршеринга и коммерческих совместных поездок в число основных видов деятельности входят управление и оптимизация парка транспортных средств и инфраструктуры.

Что касается **ключевых партнёров** компаний, предлагающих услуги совместной мобильности, это могут быть местные органы исполнительной власти, ответственные за управление транспортом. Возможна также кооперация с компаниями, предоставляющими услуги общественного транспорта [6]. Данное направление сотрудничества в России развито в недостаточной степени. В число ключевых бизнес-партнёров компаний, предлагающих услуги совместной мобильности, также входят провайдеры онлайн-сервисов и информационно-коммуникационных технологий, в том числе услуг геолокации; инвесторы; страховщики; рекрутинговые компании для сопровождения найма водителей. Весьма интересным и перспективным представляется ещё одно направление сотрудничества новых участников рынка, пока не развитое в России – сотрудничество с компаниями-производителями в области машиностроения. Кроме того, основными партнёрами являются водители, имеющие собственные автомобили, а также инвесторы и компании, предоставляющие автомобили в аренду и лизинг.

Состав **затрат** компаний, оказывающих услуги совместной мобильности, в целом идентичен. Большинство затрат можно отнести к постоянным: расходы по найму работников, поддержанию работы онлайн-платформ и сервисов сопровождения основных услуг, расходы на НИОКР, амортизация автопарка и транспортной инфраструктуры (при наличии), расходы на маркетинг и продвижение основных услуг. Каршеринг и совместные поездки связаны со значительной долей переменных затрат на топливо, текущее содержание и ремонт автопарка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый выше сравнительный анализ бизнес-моделей совместной мобильности показывает, что все услуги объединяются общими технологиями и способами взаимоотношения с потребителями.

Однако, несмотря на наличие ряда общих характеристик, рассмотренные услуги удовлетворяют разные потребности, поэтому не являются субститутами, а относятся скорее к комплементарным продуктам. Данный вывод подтверждается и зарубежными исследователями. Так, Gilibert, M., и Ribas, I. [7] считают, что различные виды услуг (формы) совместной мобильности подходят для внутригородских и пригородных, регулярных и разовых перевозок (поездок).

Отсюда следует, что оказывающим их транспортным компаниям целесообразно использовать единую цифровую инфраструктуру (интегрированные приложения, базы и каналы передачи данных), тем более, что технологии продаж и взаимодействия с клиентами являются

практически идентичными [8]. Это не только позволит повысить ценность данного вида услуг для клиента, но и обеспечит участникам рынка существенную экономию на постоянных затратах.

Кроме того, компаниям целесообразно вести единую клиентскую базу и совместно обрабатывать большие данные, поскольку подобная информация сама по себе может генерировать значительные доходы. Также у компаний появится возможность развивать дополнительные виды деятельности, например, доставку мелких отправок. Широкие возможности даёт компаниям совместной мобильности и общий круг партнёров. В России, на взгляд автора, было бы весьма актуально государственно-частное партнерство по вопросам развития совместной мобильности в строящихся и труднодоступных районах мегаполисов.

Автор заявляет, что:

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. The Sharing Economy. Consumer Intelligence Series [Internet]. [cited 2021 May 10]. Available from: https://www.pwc.fr/fr/assets/files/pdf/2015/05/pwc_etude_sharing_economy.pdf
2. Duan Q, Ye X, Li J, Wang K. Empirical modeling analysis of potential commute demand for carsharing in Shanghai, China. *Sustainability (Switzerland)*, 2020;12(2). doi: 10.3390/su12020620
3. Osterwalder A, Pigneur Y, Tucci CL. Clarifying Business Models: Origins, Present, and Future of the Concept. *Communications of the Association for Information Systems*, 2005;15. doi: 10.17705/1CAIS.01601
4. Малиновский М.П., Аракелян Т.К. Каршеринг: проблемы участников и сторонних лиц // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2018. – № 3(17). – С. 2. [Malinovskiy MP, Arakelyan TK. Karshering: problem uchastnikov i storonnih lic. *Automobile. Road. Infrastructure*. 2018;3(17):2 (In Russ.)].
5. Farajallah M, Hammond RG, Pénard T. What drives pricing behavior in peer-to-peer markets? evidence from the carsharing platform BlaBlaCar. *Information Economics and Policy*, 2019;48:15-31. doi:10.1016/j.infoecopol.2019.01.002
6. Bellini F, Dulaskaia I, Savastano M, D'Ascenzo F. Business models innovation for sustainable urban mobility in small and medium-sized european cities. *Management and Marketing*, 2019;14(3):266-277. doi:10.2478/mmcks-2019-0019
7. Gilibert M, Ribas I. Synergies between app-based car-related shared mobility services for the development of more profitable business models. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2019;12(3):405-420. doi:10.3926/jiem.2930
8. Papu Carrone A, Hoening VM, Jensen AF, et al. Understanding car sharing preferences and mode substitution patterns: A stated preference experiment. *Transport Policy*, 2020. doi:10.1016/j.tranpol.2020.03.010

Сведения об авторах:

Волкова Елена Михайловна, к.э.н., доцент;

eLibrary SPIN:6886-5796; ORCID: 0000-0003-0620-463X;

E-mail: moonlight34@ya.ru

Information about the authors:

Elena Volkova, Candidate of Economic Sciences, associate professor;

eLibrary SPIN:6886-5796; ORCID: 0000-0003-0620-463X;

E-mail: moonlight34@ya.ru

Цитировать:

Волкова Е.М. Факторы, определяющие успех реализации проектов строительства высокоскоростных магистралей // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 56–66. doi: 10.17816/transsyst20217356-66

To cite this article:

Volkova EM. Factors Determining the Success of HSR Building Projects. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):56-66 doi: 10.17816/transsyst20217356-66

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.331.5

DOI 10.17816/transsyst20217367-105

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

АО «Научно-технический центр «ПРИВОД-Н»

(Новочеркасск, Россия)

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Обоснование: Развитие работ в области создания грузовых магнитолевитационных транспортных систем (МЛТС) связано с разработкой и исследованием электротехнического комплекса подвижного состава для полигона эксплуатации с протяженными перегонами на слабо освоенных территориях.

Цель: Целью работы является обоснование структуры и параметров компонентов электротехнического комплекса подвижного состава, исследование режимов работы.

Методы: Основными методами исследования являются функционально-структурный анализ и синтез, компьютерное моделирование, расчетные исследования, анализ результатов исследований.

Результаты: В результате проведенных исследований выявлены факторы, определяющие облик электротехнического комплекса подвижного состава. Сформулированы основные требования к электротехническому комплексу. Разработана структура и определены параметры компонентов электротехнического комплекса для транспортной платформы с магнитной левитацией. В качестве ближайшего железнодорожного аналога выбрана скоростная вагон-платформа модели 13-6990 для перевозки контейнеров. Разработана компьютерная модель комбинированной тягово-левитационной системы на основе линейного реактивного индукторного двигателя. Приведены результаты расчетных исследований, подтверждающие физическую реализуемость электротехнического комплекса подвижного состава с линейными реактивными индукторными двигателями.

Заключение: Практическая значимость состоит в том, что предложенная концепция построения электротехнического комплекса подвижного состава обеспечивает создание магнитолевитационной транспортной системы с низкозатратной инфраструктурой.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, подвижной состав, магнитная левитация, линейный двигатель, компьютерная модель.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

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

JSC "Scientific and Technical Center" PRIVOD-N"

(Novocherkassk, Russia)

ELECTROTECHNICAL COMPLEX OF MAGLEV ROLLING STOCK

Background: The development of work in the field of creating cargo maglev transport systems is associated with the development and study of the electro technical complex of the rolling stock for the operating range with long stretches in poorly developed territories.

Aim: The aim of the work is to substantiate the structure and parameters of the components of the electro technical complex of the rolling stock, to study the operating modes.

Methods: The main research methods are functional structural analysis and synthesis, computer modeling, computational studies, analysis of research results.

Results: As a result of the research, the factors that determine the appearance of the electrotechnical complex of the rolling stock have been identified. The basic requirements for the electrical complex are formulated. The structure was developed and the parameters of the components of the electrical complex for the transport platform with magnetic levitation were determined. A high-speed flat car model 13-6990 for the transportation of containers was chosen as the closest railway analogue. A computer model of a combined traction-levitation system based on a linear reluctance inductor motor has been developed. The results of computational studies, confirming the physical feasibility of the electrical complex of the rolling stock with linear reluctance inductor motors, are presented.

Conclusion: The practical significance lies in the fact that the proposed concept of constructing an electro technical complex of rolling stock provides for the creation of a maglev transport system with a low-cost infrastructure.

Key words: electro technical complex, rolling stock, magnetic levitation, linear motor, computer model.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование возможности создания скоростной транспортной системы с магнитным подвесом для контейнерных перевозок по Евро-Азиатскому сухопутному мосту [1] показало, что основным препятствием реализации транзитного потенциала России является ограниченная пропускная способность существующих транспортных коридоров. Кардинальным решением проблемы может стать строительство новой высокоскоростной транспортной системы. Выявлены факторы, определяющие условия создание новой транспортной системы. Среди них: использования транспортных возможностей Азово-Черноморского бассейна, обеспечение доступности северных территорий, разработка технических решений обеспечивающих создание транспортной системы с низко затратной инфраструктурой.

Предложена концепция построения новой транспортной системы с учетом характеристик предполагаемого полигона эксплуатации на слабо освоенных территориях. Предполагаемый маршрут высокоскоростной трассы, связывающий Азово-Черноморского бассейн с побережьем Тихого океана, полностью проходит по территории России, включая северные регионы.

Развитие работ в области создания грузовых МЛТС связано с разработкой и исследованием электротехнического комплекса подвижного состава для полигона эксплуатации с протяженными перегонами на слабо освоенных территориях.

Целью работы является обоснование структуры и параметров компонентов электротехнического комплекса подвижного состава, подтверждение физической реализуемости систем.

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Технология Maglev направлена на повышение производительности процесса транспортирования и снижение эксплуатационных расходов транспортной системы. Эти характеристики зависят от конструкции и эффективности электротехнического комплекса, который по существу определяет облик транспортной системы на магнитном подвесе. Основной функцией электротехнического комплекса является преобразование энергии источника энергоснабжения в механическую энергию бесконтактного движения подвижного состава вдоль направляющего путепровода.

Электротехнический комплекс МЛТС включает в себя пять функциональных компонентов: систему энергоснабжения; систему электромагнитного подвеса; систему линейного электропривода; систему боковой стабилизации; систему управления.

Система энергоснабжения преобразует параметры электроэнергии источника питания к параметрам, удобным для использования и передает ее на подвижную единицу транспортной системы. Система электромагнитного подвеса обеспечивает левитацию транспортного средства за счет создания вертикального подъемного усилия. Система линейного электропривода создает тяговое (тормозное) усилие, направленное вдоль путепровода. Система боковой стабилизации создает усилие, направленное перпендикулярно к направлению движения для компенсации бокового смещения подвижной единицы. Система управления обеспечивает бесконтактную пространственную стабилизацию подвижной единицы относительно пути и ее линейное перемещение вдоль направляющего путепровода.

Структура электротехнического комплекса может иметь много вариантов, число которых определяется количеством сочетаний источников магнитного поля, располагаемых на экипаже и в пути. Возможно совмещение различных функций в одних и тех же элементах на основе одновременного взаимодействия одного экипажного источника магнитного поля с двумя или более функционально различными

элементами пути или, наоборот. Наиболее характерные варианты совмещения систем: левитации и линейного электропривода; левитации и боковой стабилизации.

Общей конструктивной особенностью электротехнического комплекса является компоновка силовых компонентов электротехнических систем (линейного двигателя, электромагнитов подвеса и боковой стабилизации) в тягово-левитационный модуль.

Анализ концепций построения электротехнических комплексов пассажирских МЛТС, доведенных до стадии коммерческой эксплуатации, выявил особенность, связанную с пространственной локализацией систем электротехнического комплекса. В низкоскоростных системах (проекты LINIMO, ROTEM) [2] компоненты электротехнического комплекса (привод, магнитный подвес, боковая стабилизация) локализованы на борту. Структура электротехнического комплекса по существу подобна структуре мотор-вагонного подвижного состава железных дорог, с тем отличием, что роль колесно-моторных блоков выполняют тягово-левитационные модули.

Электротехнический комплекс высокоскоростной системы Transrapid [3, 4] разделен на наземную и бортовую части (Рис. 1).

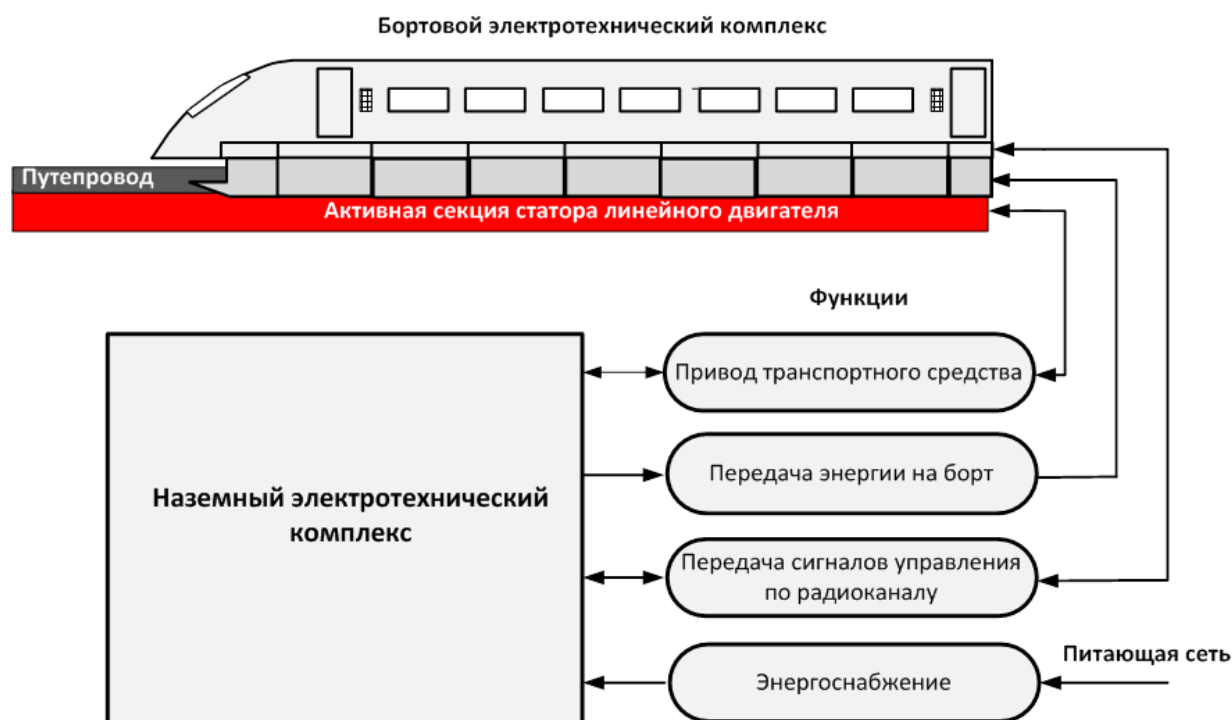


Рис. 1. Структурно-функциональная схема электротехнического комплекса

Наземный электротехнический комплекс обеспечивает функции привода транспортного средства; передачу энергии на борт; передачу и прием сигналов управления по радиоканалу. Энергоснабжение наземного электротехнического комплекса осуществляется от питающей сети.

Бортовой электротехнический комплекс обеспечивает левитацию транспортного средства; прием электроэнергии; передачу и прием сигналов управления по радиоканалу.

Данная концепция построения системы позволяет вынести тяговое оборудование за пределы подвижной единицы, что снимает ограничения на массогабаритные показатели и установленную мощность тягового электротехнического оборудования и позволяет существенно улучшить динамические и скоростные характеристики системы за счет уменьшения массы подвижного состава.

Разделение электротехнического комплекса на наземную и бортовую часть является принципиальным условием функционирования бесконтактной транспортной системы. Связь между этими частями локализована в воздушном зазоре, образованном, в общем случае, тремя парами компонентов: статором и ротором линейного двигателя; электромагнитом системы подвеса и ферромагнитным рельсом; электромагнитом направления и реактивной шиной. В пределах возможна реализация функциональной связи между наземной и бортовой частями электротехнического комплекса одной парой компонентов – статором и ротором линейного двигателя. Это может быть достигнуто за счет совмещения функций левитации, тяги и боковой стабилизации движения. Это свидетельствует о том, что ключевым компонентом, определяющим конструктивно-компоновочный облик электротехнического комплекса, является линейный двигатель.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГРУЗОВЫХ СИСТЕМ

Изначально работы по созданию МЛТС были ориентированы исключительно на рынок пассажирских перевозок. Это предопределяло характеристики предполагаемых полигонов эксплуатации, расположенных на хорошо освоенных, густонаселенных территориях с разветвленной сетью энергоснабжения. Применения МЛТС в сфере грузовых перевозок требует переосмысления концепции построения электротехнического комплекса с учетом характеристик предполагаемого полигона эксплуатации.

В сфере грузовых перевозок известна попытка адаптации магнитолевитационной технологии, разработанной фирмой General Atomics [5], к контейнерным перевозкам. Технология, принятая General

Atomics, использует постоянные магниты на транспортном средстве, расположенные в массиве Хальбаха для "пассивной" электродинамической левитации. Постоянные магниты на транспортном средстве взаимодействуют с трехфазным линейным синхронным двигателем, обмотки которого уложены на путевой структуре. Технология динамического подвеса позволила осуществить левитацию транспортного средства, когда оно достигало скорости более 80 км/ч на колесах. Предложен проект Electric Cargo Conveyor System [6] для обработки контейнеров в морском терминале, предусматривающий операционную скорость 145 км/ч.

В сфере грузовых транспортных систем на основе магнитной левитации специалистами Петербургского университета путей сообщения выполнен цикл фундаментальных исследований по разработке отечественной магнитолевитационной транспортной технологии, с электродинамической левитацией, основанной на явлении высокотемпературной сверхпроводимости [7]. Разработан макет грузовой магнитолевитационной транспортной платформы [8, 9], которая позволяет транспортировать контейнеры серии 1ААА, 1АА или 1А.

Предлагаемые системы – это системы конвейерного типа: груз перемещается на пассивных левитирующих транспортных тележках в автоматическом режиме. Электротехнический комплекс таких систем должен включать следующие компоненты: линейный двигатель, обмотки которого уложены вдоль пути; стационарные подстанции, расположенные вдоль трассы, для обеспечения общего электроснабжения и управления движением; пункты переключения для коммутации участков статорной обмотки линейного двигателя.

Высокие затраты на строительство путевой структуры и обслуживание компонентов электротехнического комплекса, распределенных вдоль пути исключают возможность применения МЛТС конвейерного типа на труднодоступных территориях с протяженными маршрутами. Системы конвейерного типа эффективны при обработке грузов в терминалах с небольшой протяженностью трассы.

Создание МЛТС с низко затратной инфраструктурой предполагает, что путевая структура, как наиболее затратный элемент, должна быть оснащена только пассивными элементами электротехнического комплекса. Активные компоненты должны быть размещены на борту транспортной платформы. Однако это ведет к увеличению массы транспортного средства и, как следствие, снижает транспортную эффективность системы. Возникает задача снижения массы электротехнического оборудования при его локализации на борту транспортного средства. Известна идея интеграции функций тяги, левитации и боковой стабилизации в одном силовом элементе [10]. Практическое воплощение принцип интеграции

получил при создании натурного образца транспортной тележки массой 10 тонн, оснащенный десятью двигателями во Всероссийском научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте электровозостроения (ВЭлНИИ г. Новочеркасск) [11]. Двигатель имел пассивный ротор, интегрированный в путевую структуру и три обмотки: трехфазную тяговую, возбуждения и боковой стабилизации. Обмотки получали питание от силового электрооборудования систем тяги, левитации и боковой стабилизации. Это не позволило существенно снизить массу электротехнического оборудования.

Развитием идеи интеграции является применение линейного реактивного индукторного двигателя в тягово-левитационной системе транспортного средства с магнитным подвесом.

В классе линейных реактивных индукторных машин существуют две разновидности [12, 13] различающиеся направлением замыкания потока, создаваемого фазой двигателя: с продольным замыканием потока (Рис. 2а), совпадающим с направлением движения, и с поперечным замыканием потока, перпендикулярным направлению движения (Рис. 2б).

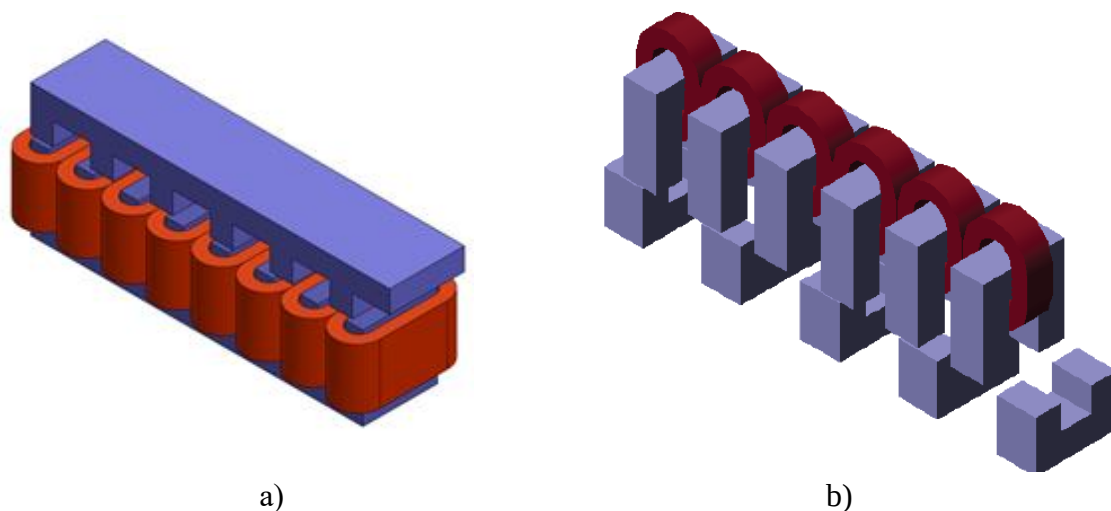
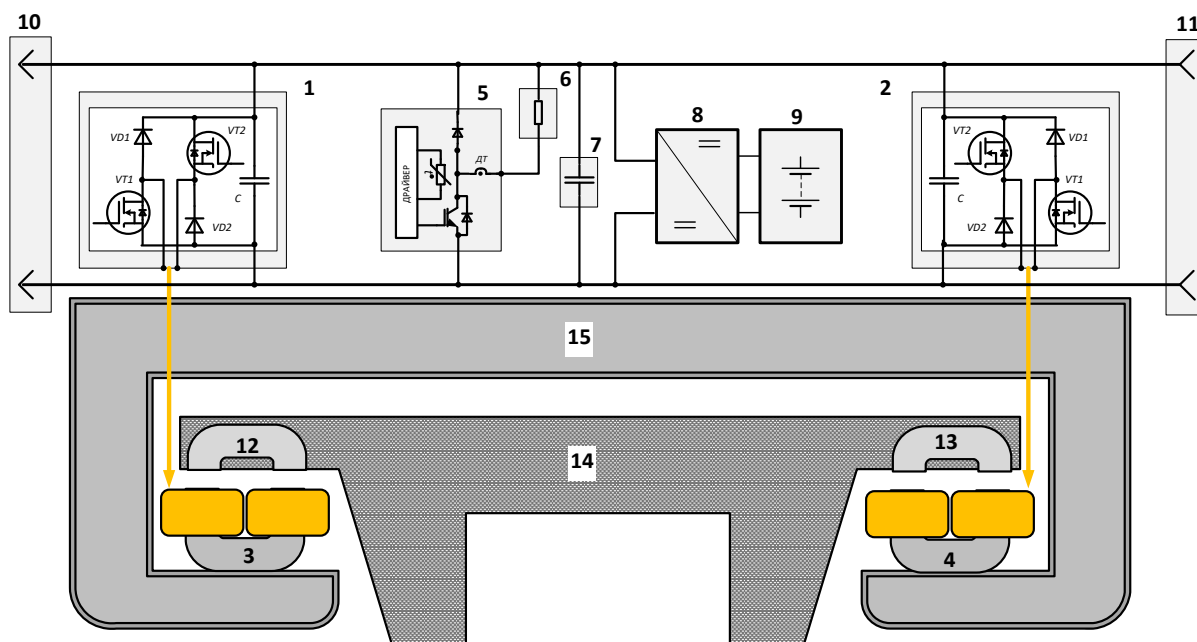


Рис. 2. Типы линейных реактивных индукторных двигателей

Эти машины просты, технологичны, механически устойчивы и имеют малые потери, а их системы питания имеют простую схему. Предпочтительным является двигатель с поперечным потоком, так как U-образная конфигурация магнитопровода обеспечивает боковую само стабилизацию транспортной платформы. Управление по двум координатам, как тягой, так и подвесом может осуществляться, используя всего один канал управления токами в обмотках двигателя. Эти свойства линейного реактивного индукторного двигателя с поперечным потоком позволяют создать предельно простую тягово-левитационную систему.

Функциональная схема электротехнического комплекса приведена на Рис. 3. Энергоснабжение силовых компонентов электротехнического

комплекса при их расположении на транспортной платформе 15 осуществляется от автономной энергетической установки, которая может располагаться на одной из грузовых платформ подвижного состава, через силовые разъемы 10, 11.



- 1, 2 – силовые преобразователи; 3, 4 – статоры линейных двигателей;
 5 – входной преобразователь; 6 – тормозной резистор; 7 – конденсатор;
 8 – зарядно-разрядный преобразователь; 9 – накопитель энергии;
 10, 11 – силовые разъемы; 12, 13 – путевые элементы; 14 – путевая структура;
 15 – транспортная платформа

Рис. 3. Функциональная схема электротехнического комплекса

Силовое напряжение подается на входной преобразователь 5, силовые преобразователи 1, 2 и зарядно-разрядный преобразователь 8 накопителя энергии 9. Входной преобразователь 5 регулирует ток тормозного резистора 6 в режиме торможения. Силовые преобразователи 1, 2 питают регулируемым током обмотки статоров линейных двигателей 3, 4. Статоры линейных двигателей 3, 4 создают тяговое и подъемное усилие при взаимодействии с путевыми элементами 12, 13, интегрированными в путевую структуру 14. При боковом смещении статоров 3, 4 относительно путевых элементов 12, 13 возникает сила боковой стабилизации платформы. Зарядно-разрядный преобразователь 8 согласует напряжение питания с напряжением накопителя энергии 9.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО РЕАКТИВНОГО ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЯГИ И МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

В последнее десятилетие накоплен определенный опыт проектирования реактивных индукторных двигателей [14]. В литературе присутствуют различные рекомендации по выбору геометрии и параметров машин данного класса традиционного исполнения. Эти рекомендации не затрагивают линейных реактивных индукторных двигателей, совмещающих функции тяги и магнитного подвеса. Поэтому требуют разработки следующие вопросы:

- выбор параметров зубцового слоя двигателя, обеспечивающего заданное подъемное и тяговое усилие;
- исследование влияния конфигурации магнитной системы «статор – путевой элемент» на расход электротехнической стали в путепроводе;
- влияния дискретности путевой структуры на подъемное усилие.

На Рис. 4 показан общий вид реактивного индукторного двигателя транспортной платформы.

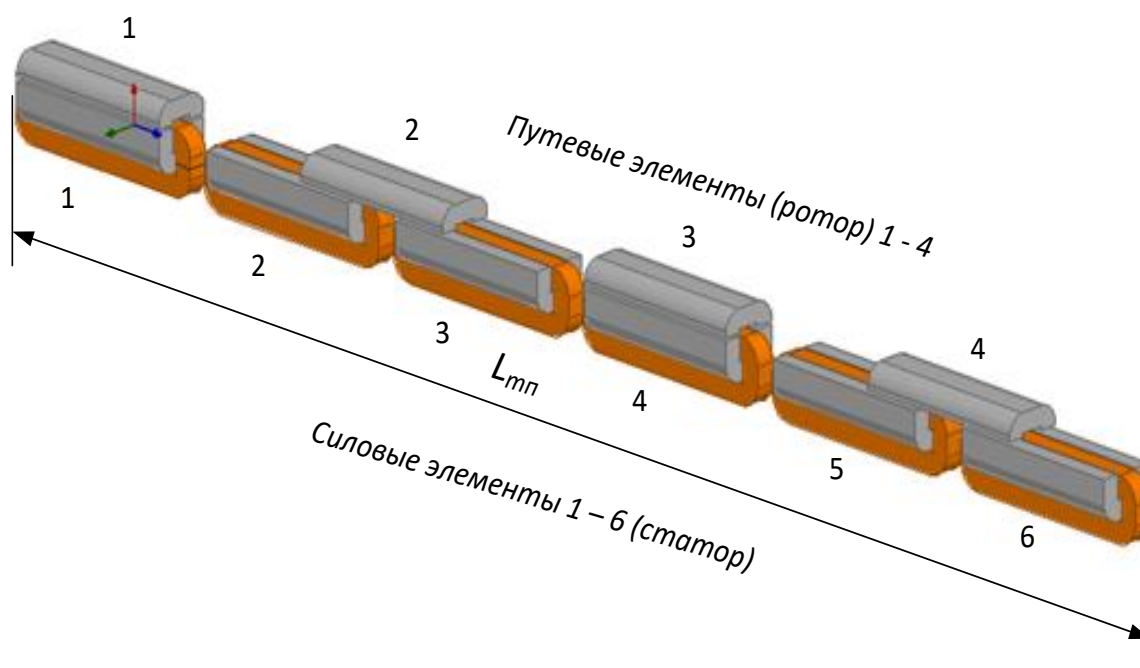
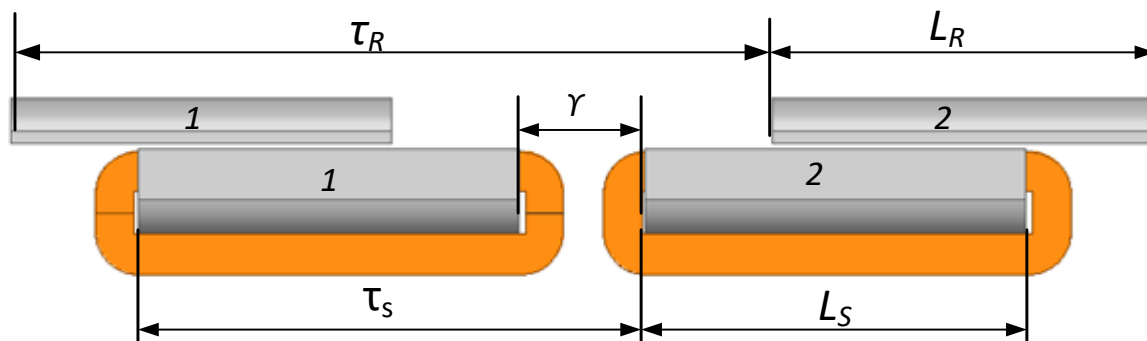


Рис. 4. Общий вид двигателя

Предполагается, путевые элементы (ротор) 1–4 расположены на путевой структуре, а силовые элементы статора 1–6 установлены по бортам транспортной платформы и распределены по всей ее длине L_{mn} .

По аналогии с вращающимися электрическими машинами можно говорить о главных размерах двигателя. На Рис. 5 приведены обозначения размеров.



τ_R – зубцовое деление ротора, τ_S – зубцовое деление статора,
 γ – межзубцовый интервал статора, L_S длина элемента статора,
 L_R длина элемента ротора.

Рис. 5. Главные размеры двигателя

Параметры зубцового слоя двигателя определяются соотношением зубцов ротор/статор. Для двигателя с числом фаз 3 возможны следующие соотношения зубцов ротора (путевых элементов) и статора (силовых элементов) Z_2/Z_1 :

$$Z_2/Z_1 \rightarrow 2/3, 4/6, 6/9, 8/12, 10/15, 12/18, \dots \quad (1)$$

Силовые элементы статора, число которых определяется значением Z_1 , в совокупности образуют статор линейного двигателя. Длина статора линейного двигателя L_{cm} , установленного на одном борту транспортной платформы, должна быть примерно равна длине рамы платформы $L_{cm} \leq L_{mn}$ для равномерного распределения нагрузки на путь.

Задавшись значением Z_1 , можно определить длину силового элемента статора. Выберем в качестве ближайшего железнодорожного аналога скоростную вагон-платформу для перевозки контейнеров модели 13-6990 [15] – технические характеристики приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики вагон-платформы модели 13-6990

Технические параметры, размерность	Значение
Скорость конструкционная (эксплуатационная), км/ч	160 (140)
Максимальная расчетная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы от платформы, не более, кН (т)	166,7 (17,0)
Масса тары платформы, не более, т	28,0
Грузоподъемность, не менее, т	40,0
Масса брутто, не более, т	68,0

Технические параметры, размерность	Значение
Количество перевозимых контейнеров в пределах грузоподъемности платформы, шт.: 45 / 40 / 20 футов 20+20 футов	1 2
Длина рамы платформы по концевым балкам, мм	13480
Длина по осям сцепления автосцепок при утопленной автосцепке, не более, мм	14700

Ориентируясь на железнодорожный аналог, примем длину рамы магнитолевитационной платформы $L_{mn}=14,4$ метра и $Z_2/Z_1=12/18$, получим:

$$L_s = \frac{3 \cdot L_{mn}}{4 \cdot Z_1} = \frac{3 \cdot 14,4}{4 \cdot 18} = 0,6 \text{ м}, \quad (2)$$

Длина путевого элемента L_R определяется по формуле:

$$L_R = \frac{L_{mn}}{2 \cdot Z_2} = \frac{14,4}{2 \cdot 12} = 0,6 \text{ м}, \quad (3)$$

При массе брутто транспортной платформы $m_T = 68$ т (Табл. 1) расчетная статическая нагрузка на путевого элемент от платформы составит:

$$F_z = \frac{m_T \cdot g}{2 \cdot Z_2} = \frac{68000 \cdot 9,81}{2 \cdot 12} = 27795 \text{ Н} \quad (4)$$

В таблице 2 приведены результаты расчетов основных размеров магнитопровода статора и ротора. Расчеты выполнены при индукции $B_\delta = 1$ Тл в воздушном зазоре $\delta = 10$ мм.

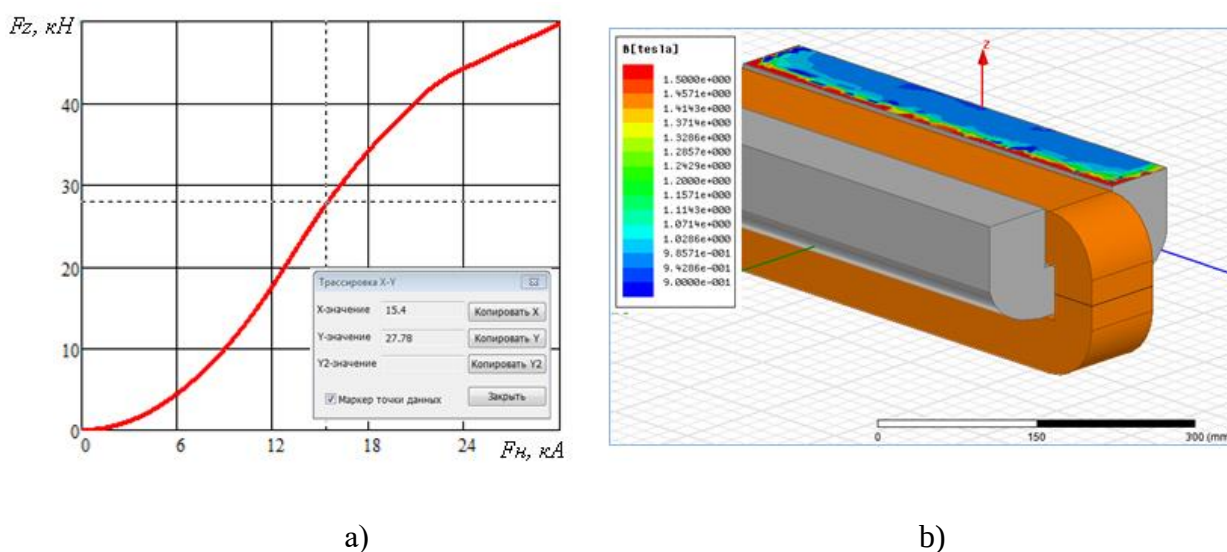
Таблица 2. Размеры магнитопровода

Наименование параметра	Значение	Эскиз сечения
Длина магнитопровода, мм	600	
Ширина магнитопровода, мм	195	
Высота магнитопровода, мм	140	
Ширина зубца статора, мм	60	
Высота зубца статора, мм	80	
Высота зубца ротора, мм	10	
Ширина окна, мм	75	
Сечение обмотки, мм	75x75	
Воздушный зазор, мм	10	
Магнитодвижущая сила, кА	15,9	

По полученным данным выполнено построение 3D-модели системы «статор – путевой элемент». В модели принята электротехническая сталь марки 10848. В результате проведенных магнитостатических расчетов получена силовая характеристика системы «статор – путевой элемент» при соосном положении (см. рис. 6a) и распределение индукции в сечении воздушного зазора (см. рис. 6b).

Из приведенных данных следует, что расчетная статическая нагрузка на путевой элемент от платформы $F_z \approx 27,8$ кН, достигается при намагничивающей силе обмотки элемента статора $F_n \approx 15,4$ кА. Среднее значение индукции в сечении зазора составляет $B_\delta = 0,985$ Тл. Это практически совпадает с результатами инженерного расчета.

Исследование влияния конфигурации магнитной системы «статор – путевой элемент» на расход электротехнической стали в путепроводе показали, что выбор конфигурации зубцовой зоны двигателя по существу определяет его главные размеры. Это ограничивает возможные вариации геометрическими размерами. В рамках этих ограничений возможен только выбор формы и размеров поперечного сечения магнитопровода (U-образного и Ш-образного сечения), а также расположение обмоток на магнитопроводе.



а) силовая характеристика; б) распределение индукции в сечении

Рис. 6. Результаты магнитостатических расчетов

На Рис. 7 показаны возможные варианты магнитных систем статора и ротора линейного двигателя.

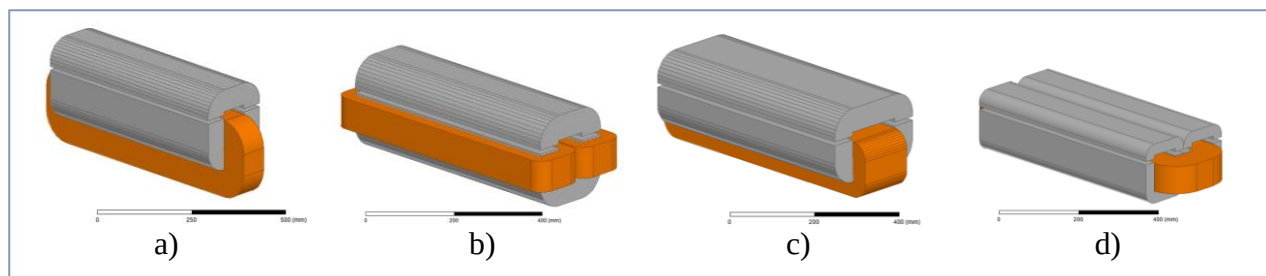


Рис. 7. Варианты магнитных систем

В представленных вариантах магнитопроводы разрезные ленточные одинаковой длины и площади полюсов. Варианты *a* и *b* различаются расположением обмоток на магнитопроводе: в варианте *a* обмотка располагается на ярме, а в варианте *b* две обмотки располагаются на зубцах. В варианте *c* ширина магнитопровода увеличена, а высота зубцов пропорционально уменьшена. В варианте *d* магнитопровод Ш-образного сечения составной, он образован двумя U-образными элементами с уменьшенной шириной зубцов. Основные геометрические размеры элементов статора и ротора приведены в Табл. 3.

Для сопоставления вариантов выполнены расчеты параметров системы «статор – путевой элемент» при соосном положении зубцов статора и ротора. Электротехническая сталь в расчетах принята марки 10848. Для всех вариантов задавалась величина намагничивающей силы, равная $F_n = 16,8$ кА. Результаты расчетов приведены в Табл. 4.

Таблица 3. Размеры элементов статора и ротора

Наименование параметров	Варианты			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>D</i>
Длина магнитопровода, мм	600	600	600	600
Ширина магнитопровода, мм	195	195	260	270
Ширина зубца, мм	60	60	60	30
Высота зубца статора, мм	80	80	45	80
Высота зубца ротора, мм	10	10	10	10
Сечение обмотки, мм	75x75	37x75	140x40	75x75
Площадь полюсов, м ²	0,072	0,072	0,072	0,072
Воздушный зазор, мм	10	10	10	10

Таблица 4. Параметры системы «статор – путевого элемент»

Наименование параметров	Варианты			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Масса стали путевого элемента, кг	52	52	71	39
Масса стали элемента статора, кг	90	90	90	78
Масса меди обмотки статора, кг	55	40	51	55
Полная масса статора, кг	145	130	141	133
Подъёмная сила, кН	31,4	31,1	31,8	33,2
Расход стали на 1км пути, т/км	86,7	86,7	118	65

Анализ результатов показывает, что варианты *a* и *b* практически равнозначны. Вариации, связанные с увеличением ширины магнитопровода (вариант *c*), приводят к увеличению подъемного усилия (по сравнению с вариантами *a* и *b*) и расхода электротехнической стали. Вариант *d* с Ш-образным магнитопроводом и обмоткой как в варианте *a*, обладает наибольшей подъемной силой и обеспечивает минимальный расход стали в путепроводе. Этот вариант является предпочтительным при выборе конфигурации магнитной системы линейного двигателя.

Исследование влияния дискретности путевого структуры на подъемное усилие и показало, что при смещении зубцов статора относительно зубцов ротора (от соосного положения зубцов до межзубцового промежутка) подъемная сила F_z , создаваемая силовым элементом статора, уменьшается.

Например, на Рис. 8 приведена зависимость подъемной силы $F_z = f(X)$ от величины линейного перемещения X для варианта *a* (см. Рис. 7).

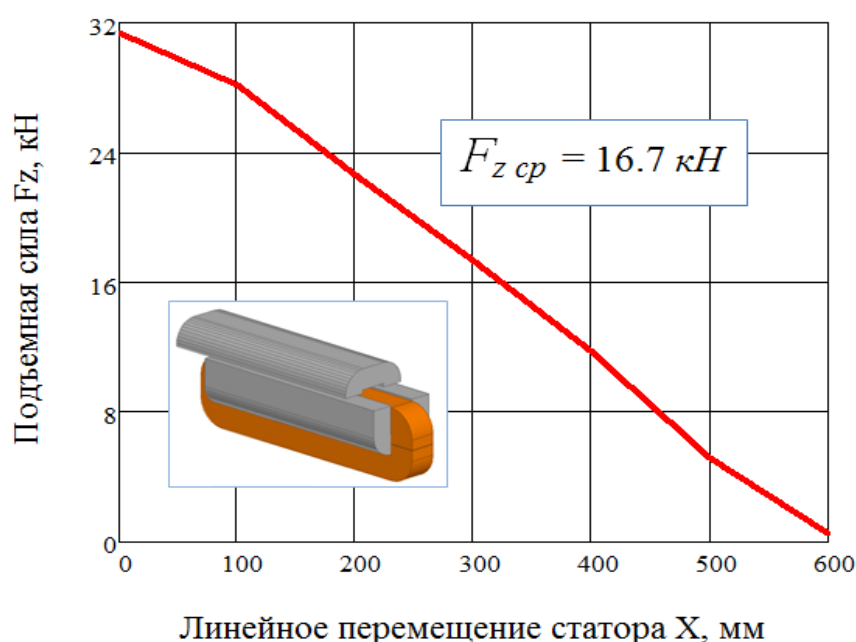


Рис. 8. График зависимости подъемной силы от линейного перемещения

Наблюдается практически двукратное снижение среднего значения подъемной силы $F_{Z\text{cp}}=16,7\text{ кН}$ по отношению максимальному значению при соосном положении зубцов $F_{Z\text{max}}=31,4\text{ кН}$.

Возникает задача выбора параметров двигателя с некоторым запасом для компенсации негативного влияния дискретности путевой структуры.

Силовое взаимодействие статора линейного двигателя с путевой структурой осуществляется через путевые элементы (ротор двигателя). При этом каждый путевой элемент взаимодействует с одним или двумя элементами статора (в зависимости от текущего положения зубцов статора и ротора). На Рис. 9 приведена схема силового взаимодействия путевого элемента 3 с двумя элементами статора 1 и 2.

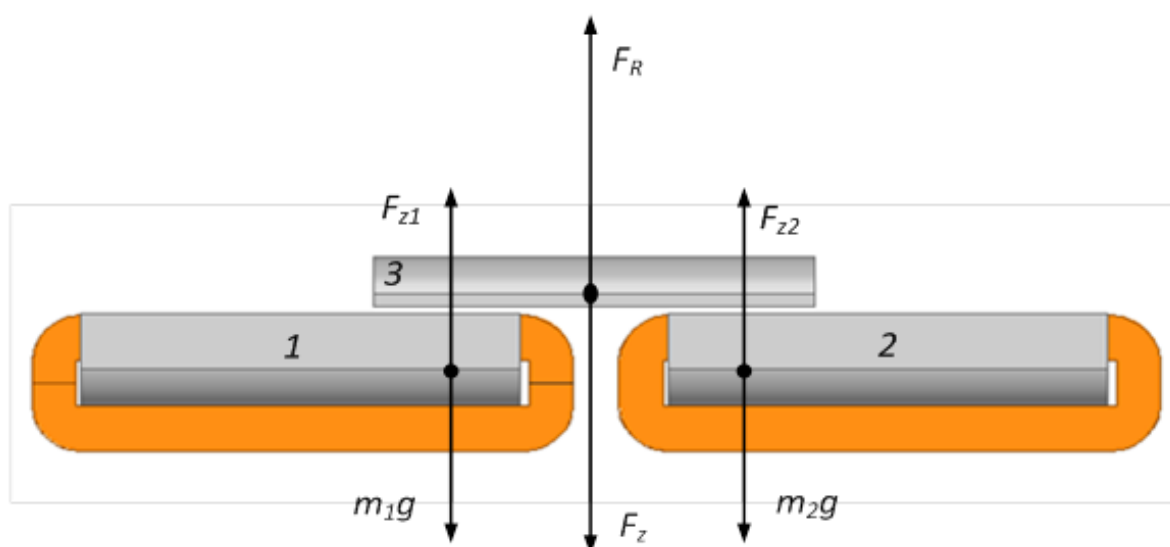


Рис. 9. Схема силового взаимодействия

Сила, действующая на путевой элемент F_Z , образуется силами F_{z1} и F_{z2} двух элементов статора. Эти силы уравниваются силами тяжести m_1g и m_2g . Результирующая сила F_Z уравнивается реакцией опоры F_R .

При линейном перемещении полюс путевого элемента 3 может перекрываться одним или двумя элементами статора.

На Рис. 10 приведены результаты расчетов подъемных сил $F_{z1}(\theta)$, $F_{z2}(\theta)$, создаваемых элементами статора 1 и 2 и результирующей силы $F_Z(\theta)$, действующей на путевой элемент 3, при смещении θ , выраженном в электрических градусах.

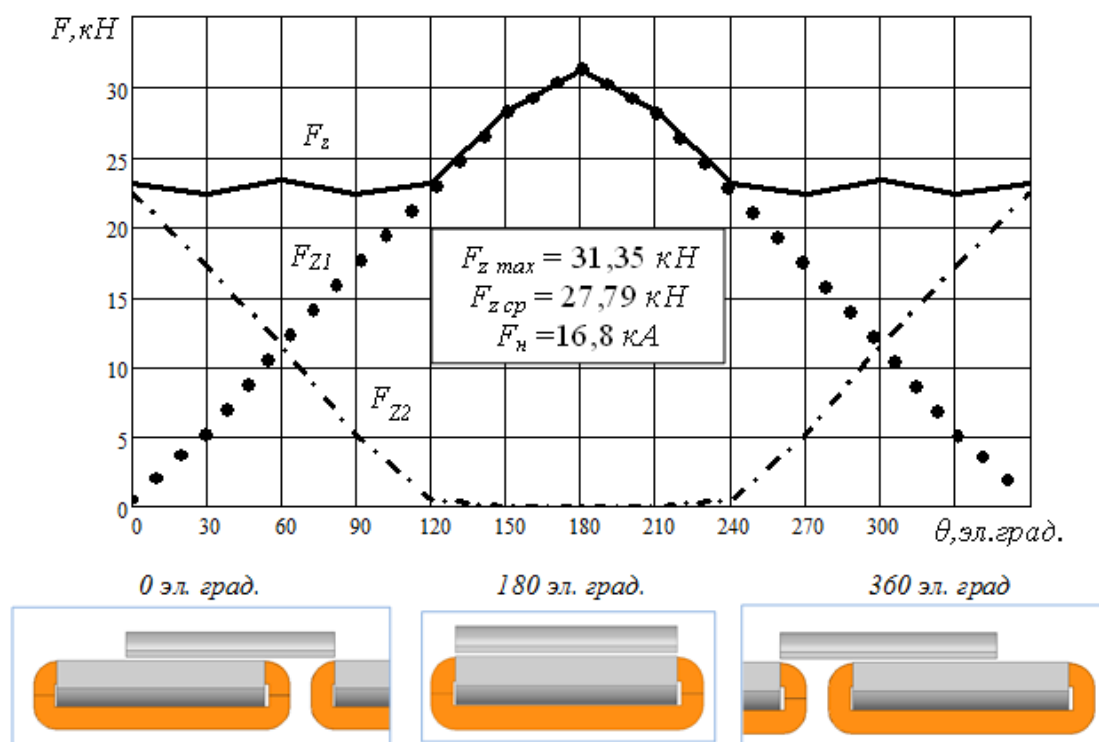


Рис. 10. Графики подъемных сил $F_{z1}(\theta)$, $F_{z2}(\theta)$, $F_z(\theta)$

Из рисунка следует, что на интервалах смещения зубцов $0 < \theta < 120$ и $240 < \theta < 360$ электрических градусов $F_z = F_{z1} + F_{z2}$, а на интервале $120 < \theta < 240$ электрических градусов $F_z = F_{z1}$. Максимальное подъемное усилие $F_{zmax} = 31,35$ кН достигается при $\theta = 180$ электрических градусов (при соосном положении элемента статора и путевого элемента) и намагничивающей силе $F_n = 16,8$ кА. Среднее значение подъемного усилия составляет $F_{zcp} = 27,79$ кН, что соответствует расчетной статической нагрузке на путевого элемент от платформы (формула 4).

Следует обратить внимание, что подъемного усилия $F_z = 27,79$ кН достигается при соосном положении статора и путевого элемента при намагничивающей силе обмотки $F_n = 15,4$ кА (см. рис. 6а), а $F_{zcp} = 27,79$ кН при 16,8 кА. Это говорит о том, что для компенсации негативного влияния дискретности путевого структуры необходимо увеличению токовую нагрузку обмотки примерно на 8 %.

В динамических режимах работы анализ процессов инженерными методами практически не возможен из-за сложности протекания электромеханических процессов.

Простота конструкции двигателя в совокупности со сложностью процессов порождают скептицизм в отношении возможности использования реактивного индукторного двигателя. Это обстоятельство выдвигает на первый план задачу оценки физической реализуемости объекта, а также исследование объекта на управляемость.

На данном этапе исследований эти задачи целесообразно выполнить на модели объекта, адаптированной к численному решению с возможностью задания параметров управления. Математическая модель, ориентированная на исследование электромагнитных и электромеханических процессов в заданных режимах работы, включает:

– дифференциальные уравнения электромагнитных контуров статора двигателя;

– выражения, определяющие мгновенное значение электромагнитных сил, создаваемых в электромагнитных контурах двигателя.

Будем считать, что:

– электромагнитные контуры статоров двигателя рассматриваются как изолированные друг от друга в магнитном отношении;

– величина воздушного зазора между статором и ротором имеет постоянное значение;

– перемещение статора относительно ротора по координате y (боковое смещение) отсутствует.

Тогда, с учетом перечисленных условий, уравнение электромагнитного контура двигателя примет вид:

$$u_k(t) = i_k(t) \cdot R + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, t)}{\partial i_k} \cdot \frac{di_k(t)}{dt} + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, t)}{\partial x} \cdot \frac{dx(t)}{dt}, \quad (5)$$

где

u – напряжение, приложенное к обмотке статора;

i – ток в обмотке статора;

Ψ – потокосцепление электромагнитного контура;

R – сопротивление обмотки статора активное;

t – время, текущее значение;

x – координата перемещения статора относительно ротора в направлении движения;

k – номер электромагнитного контура.

Дифференциальные уравнения электромагнитных контуров статора двигателя дополняются выражениями, определяющими значения электромагнитных сил.

Выражение, определяющее электромагнитную силу по координате x , имеет вид:

$$F_x = \sum_{k=1}^m \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^i \Psi_k(i_k, x, z) di \right) \bigg|_{\substack{i=\text{const} \\ z=\text{const}}} \quad (6)$$

Выражение, определяющее электромагнитную силу по координате z , имеет вид:

$$F_z = \sum_{k=1}^m \frac{\partial}{\partial z} \left(\int_0^i \Psi_k(i_k, x, z) di \right) \bigg|_{\substack{i=\text{const} \\ x=\text{const}}} \quad (7)$$

где m – количество электромагнитных контуров статора;

z – координата вертикального перемещения статора относительно ротора.

Из уравнения (5) следует, что управляющим параметром двигателя является напряжение $u_k(t)$, подаваемое на обмотки статоров. При этом двигатель, совмещающий функции тяги и подвеса, имеет две степени свободы. Таким образом, число управляющих воздействий меньше числа степеней свободы. В этом случае про объект говорят, что у него «дефицит» числа управлений. Этот признак отличает его от известных объектов управления МЛТС.

Процесс управления двигателем заключается в периодическом подключении (отключении) обмотки статора к источнику питания для формирования однополярного импульса тока в обмотке статора, синхронизированного с изменением взаимного положения зубцов статора и путевого элемента. Параметры тока должны обеспечивать заданное подъемное усилие и силу тяги.

На Рис. 11 приведены осциллограммы процессов, поясняющие способ формирования тока.

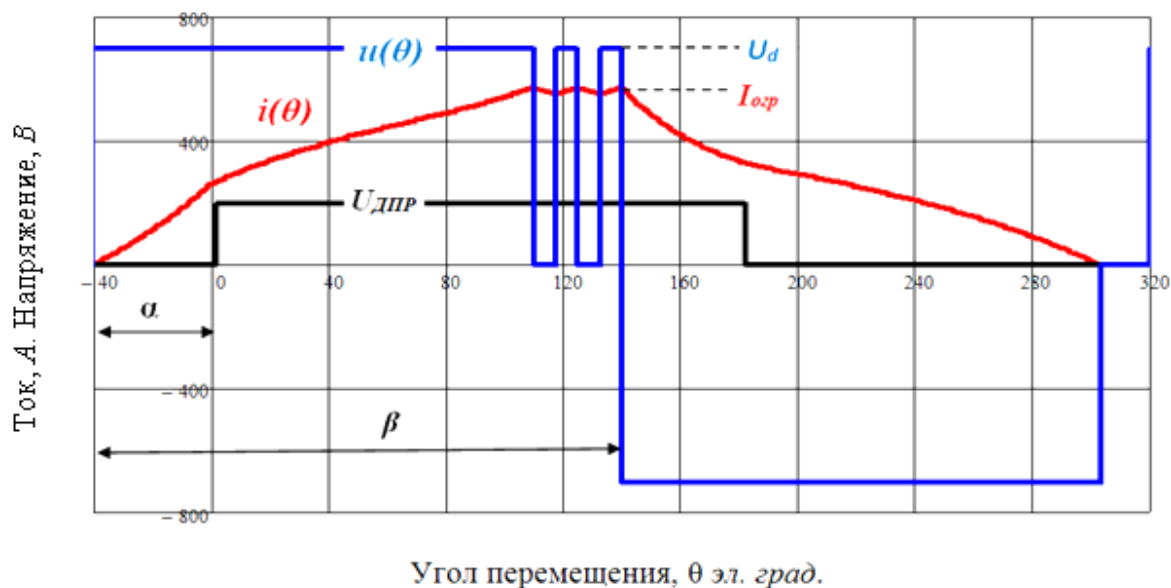


Рис. 11. Осциллограммы процессов в обмотке статора

Показаны осциллограммы тока $i(\theta)$, напряжения $u(\theta)$, сигнал датчика положения ротора $U_{ДПР}$. Введены следующие обозначения: U_d – напряжение источника питания; α – угол опережения включения, β – угол проводимости, $I_{огр}$ – порог ограничения тока, θ – перемещения статора относительно путевого элемента, выраженное в электрических градусах.

Процесс формирования тока заключается в следующем. Для организации управления фиксируется положение статора относительно путевого элемента с помощью датчика положения, вырабатывающего сигнал $U_{ДПР}$. На обмотку статора подается напряжение источника питания U_d с углом опережения включения α относительно сигнала датчика положения $U_{ДПР}$. При достижении током $i(\theta)$ порога ограничения $I_{огр}$ напряжение $u(\theta)$, приложенное к обмотке модулируется, поддерживая амплитуду тока $i(\theta)$ на заданном уровне. При достижении током $i(\theta)$ заданного угла проводимости β напряжение $u(\theta)$ принимает отрицательное значение до тех пор, пока ток $i(\theta)$ не спадет до нуля.

Приведенный пример показывает, что параметры тока определяются значениями величин α , β , U_d , $I_{огр}$, которые могут рассматриваться как компоненты напряжения, прикладываемого к обмотке.

Основываясь на разложении управляющей величины на компоненты, мгновенное значение напряжения, прикладываемое к обмотке в уравнении (5) может быть описано выражением:

$$u(t) = U_d \cdot K(t), \quad (8)$$

где $K(t)$ – коммутационная функция, определяется выражением:

$$K(t) = \begin{cases} 1, \text{если} \begin{cases} \text{sign}(\sin(\varpi t + \arcsin(\beta) + \alpha) - \beta) \geq 0 \\ i(t) \leq I_{огр} \end{cases} \\ 0, \text{если} \begin{cases} \text{sign}(\sin(\varpi t + \arcsin(\beta) + \alpha) - \beta) \geq 0 \\ i(t) \geq I_{огр} \\ i(t) = 0 \end{cases} \\ -1, \text{если} \begin{cases} \text{sign}(\sin(\varpi t + \arcsin(\beta) + \alpha) - \beta) \leq 0 \\ i(t) \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

Тогда уравнение электромагнитного контура (5), адаптированное к численному решению с возможностью задания параметров управления, примет следующий вид:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_1}{\partial i_1}} \cdot \left(U_d \cdot K_1(t) - i_1 \cdot R_1 - \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (10)$$

С целью упрощения модели рассматриваются процессы в сегменте линейного двигателя “три фазы статора – два путевых элемента”.

Решение уравнений (6, 7, 10) удобно выполнить в программном комплексе MATLAB/Simulink. Для упрощения Simulink модели предварительно на 3D-модели магнитной системы статора определяются зависимости потокоцепления обмотки статора $\Psi_1(i, x)$, подъемной силы $F_z(i, x)$, силы тяги $F_x(i, x)$, а также рассчитываются производные потокоцепления. Результаты расчетов вводятся в Simulink-модель в табличном виде.

На Рис. 12 показана подсистема Simulink-модели, позволяющая моделировать процессы в электромагнитном контуре статора линейного двигателя. Simulink-модель позволяет решать уравнение (10) относительно тока статора $i(t)$, а также рассчитывать значения подъемной силы $F_z(i, x)$, силы тяги $F_x(i, x)$. В структуру модели введены блоки таблиц “Look-Up Table”, в которые записаны предварительно рассчитанные табличные данные функций двух переменных: $F_z(i, x)$, $F_x(i, x)$, частные производные функции $\Psi_1(i, x)$. На входы блоков таблиц подается текущая координата x и значения тока i .

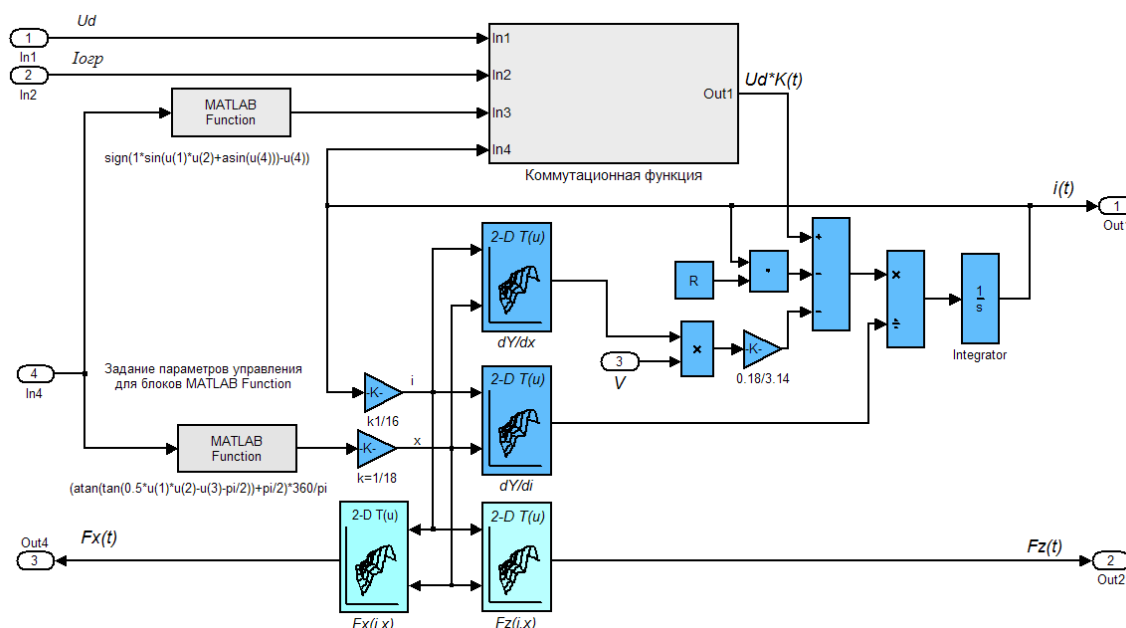


Рис. 12. Подсистема Simulink-модели электромагнитного контура статора

В блоки таблиц записаны данные, рассчитанные на интервале полюсного деления двигателя. Для представления выходных данных таблиц в виде периодической последовательности в структуру модели введены развертывающие функции, записанные на языке программирования системы MATLAB, используя блоки задания функций “MATLAB Fcn”. В описание развертывающих функций введены

компоненты управляющей величины α , β , значения которых задаются на входе $In4$. Блок «Коммутационная функция» моделирует функцию $K(t)$, описываемую выражением (9). Элементы статора линейного двигателя имеют идентичные параметры. Это позволяет реализовать полную модель линейного двигателя в виде совокупности Simulink-моделей с учетом расположения элементов статора в структуре зубцового слоя двигателя. Для этого в описание функций блоков “MATLAB Fcn” каждой Simulink-модели необходимо дополнительно ввести члены, описывающие фазовый сдвиг между моделируемыми процессами.

Для демонстрации физической реализуемости объекта определены параметры питания и управления в номинальном режиме работы трехфазного модуля (при скорости $V = 200$ км/ч, массе брутто $m = 68$ т, зазоре $\delta = 10$ мм). Для этого, используя Simulink-модель, проведен поиск параметров управления, обеспечивающих заданное подъемное усилие при ограничениях на величину питающего напряжения и амплитуду тока. Результаты расчетов приведены в Табл. 5.

Таблица 5. Параметры номинального режима

Наименование параметра	Значение
Скорость линейного перемещения, V , м/с	55,56
Подъемное усилие модуля, среднее значение, F_z , кН	56
Сила тяги модуля, среднее значение, F_x , Н	378
Ток среднеквадратическое значение, I_{ϕ} , А	168
Напряжение источника питания, U_d , В	800
Порог ограничения амплитуды тока, $I_{огр}$, А	250
Угол опережения включения, α , электрический градус	15
Угол проводимости, β , электрический градус	205

На Рис. 13 приведены осциллограммы, демонстрирующие образование суммарного подъемного усилия F_z , определяемого выражением:

$$F_z = F_{za} + F_{zb} + F_{zc}, \quad (11)$$

Из Рис. 13 следует, что под действием однополярных импульсов токов i_a , i_b , i_c , следующих с фазовым сдвигом в 120 электрических градусов, образуются однополярные импульсы сил F_{za} , F_{zb} , F_{zc} ,

действующие по координате z . Результирующая подъемная сила F_z имеет незначительную пульсирующую составляющую.

На Рис. 14 приведены осциллограммы, демонстрирующие образование суммарной силы тяги модуля F_x , определяемой выражением:

$$F_x = F_{xa} + F_{xb} + F_{xc}, \quad (12)$$

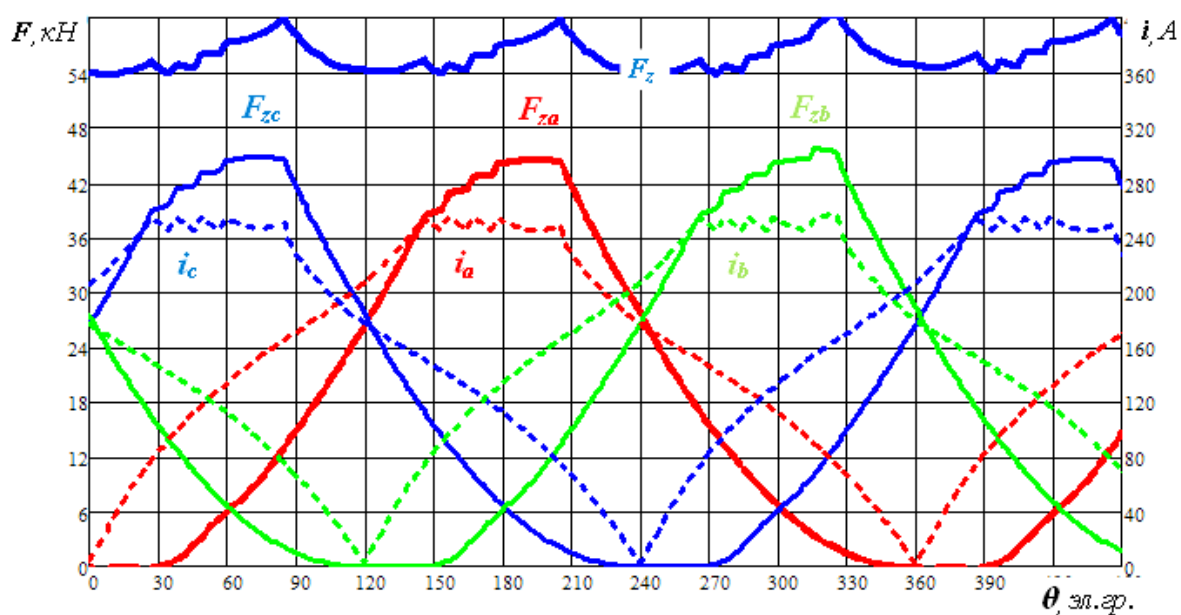


Рис. 13. Осциллограммы токов и подъемных сил в фазах модуля

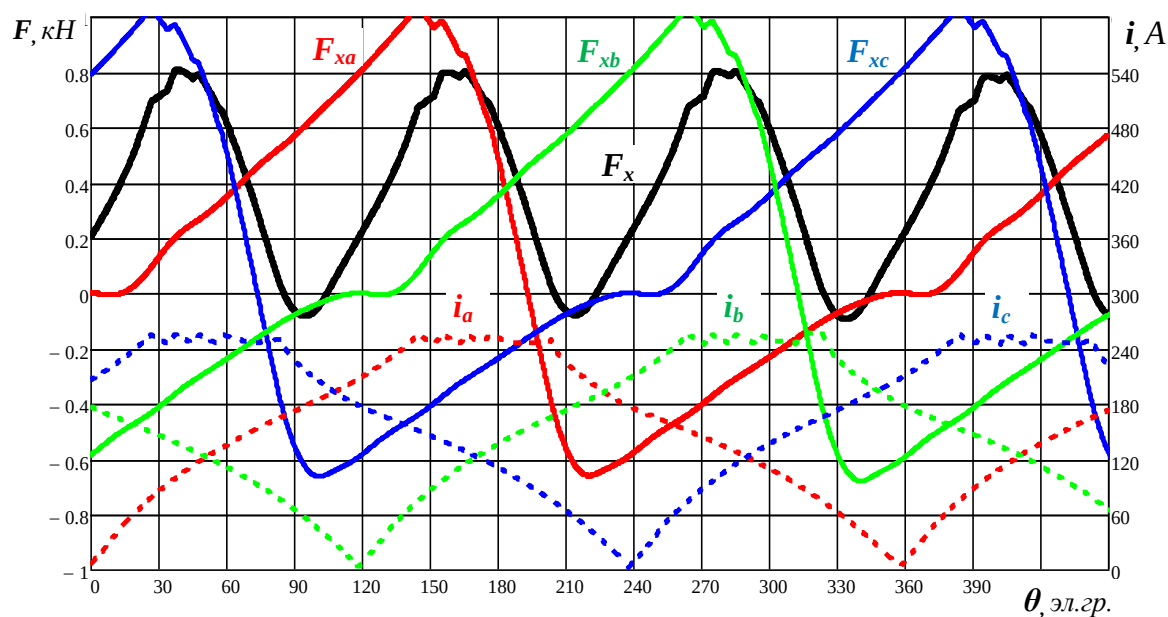


Рис. 14. Осциллограммы токов и тяговых усилий в фазах модуля

Из Рис. 14 следует, что под действием однополярных импульсов токов i_a , i_b , i_c , следующих с фазовым сдвигом в 120 электрических градусов, образуются двух полярные импульсы сил F_{xa} , F_{xb} , F_{xc} , действующие по координате x . Причем положительная полуволна превышает по амплитуде отрицательную полуволну, вследствие чего среднее за период значение импульса силы, создаваемого фазой, имеет положительное значение. Возникновение отрицательной полуволны импульса силы связано с увеличением длительности фазного тока для создания требуемого значения подъемной силы F_z . Фазный ток при этом затягивается и заходит в зону создания тормозной силы.

Сила тяги F_x , создаваемая модулем, имеет форму, близкую к синусоидальной со смещением в положительную область.

Анализ результатов расчетов и моделирования процессов позволяет предположить, что объект управления (тягово-левитационный модуль с числом фаз $m_\phi = 3$) при выбранных параметрах питания и управления физически реализуем. Модуль обеспечивает заданное подъемное усилие F_z , соответствующее статической нагрузке на два путевых элемента при скорости линейного перемещения $V = 200$ км/ч:

$$F_z = 2 \cdot F_{z2} = 2 \cdot 27795 = 55,59 \approx 56 \text{ кН}, \quad (13)$$

Одновременно модуль реализует силу тяги $F_x = 378$ Н. Это значит, что привод транспортной платформы, оснащенный двумя двигателями с соотношением зубцов $Z_2/Z_1 = 12/18$ будет развивать мощность равную:

$$P_{np} = 2 \cdot \frac{Z_1}{m_\phi} \cdot F_x \cdot V = 2 \cdot \frac{18}{3} \cdot 378 \cdot 55,55 = 252020 \text{ Вт} \approx 252 \text{ кВт}, \quad (14)$$

Среднеквадратическое значение тока в обмотках статора $I_\phi = 168$ А соответствует значению магнитодвижущей силы обмотки $Iw = 16,8$ кА (при $w = 100$ витков).

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Основным требованием, предъявляемым к автономной энергетической установке, устанавливаемой на магнитолевитационной транспортной платформе, являются минимальные массогабаритные показатели. Анализ возможных вариантов исполнения автономной энергетической установки показал, что внимание специалистов привлекают установки на водородных элементах и газотурбинные двигатели. С развитием авиационных газотурбинных двигателей, появилась возможность их применения на транспорте. Известно применение силовой установки с газотурбинным двигателем ГТД-1250А мощностью 1250 л.с. на тягаче МАЗ-7907. ПАО «КАДВИ» производит

силовые модули для маневровых многотопливных газотурбовозов. Модули разработаны на основе ГТД-1250 для нужд ОАО «РЖД» [16]. На Рис. 15 показан общий вид силового моноблока с газотурбинным двигателем типа ГТД-1250, предназначенного для использования в различных наземных и водных транспортных средствах в качестве маршевого двигателя.

Преимуществами применения моноблока с ГТД-1250 являются: экологичность, высокая удельная габаритная мощность, прекрасные пусковые качества, в том числе при низких температурах, отсутствие водяной системы охлаждения, практическое отсутствие расхода масла, многотопливность, самоочищающаяся воздухоочистка, простота обслуживания, возможность обеспечения кондиционирования, отопления, снабжения электроэнергией сопряжённых систем объектов, надёжная эксплуатация при температуре окружающей среды от минус 50 до +50 °С, при высоте над уровнем моря до 3000 метров и при запылённости на входе двигателя до 75 мг/м³. Моноблок имеет массу 1400 кг и габаритные размеры 1600x1930x930 мм.

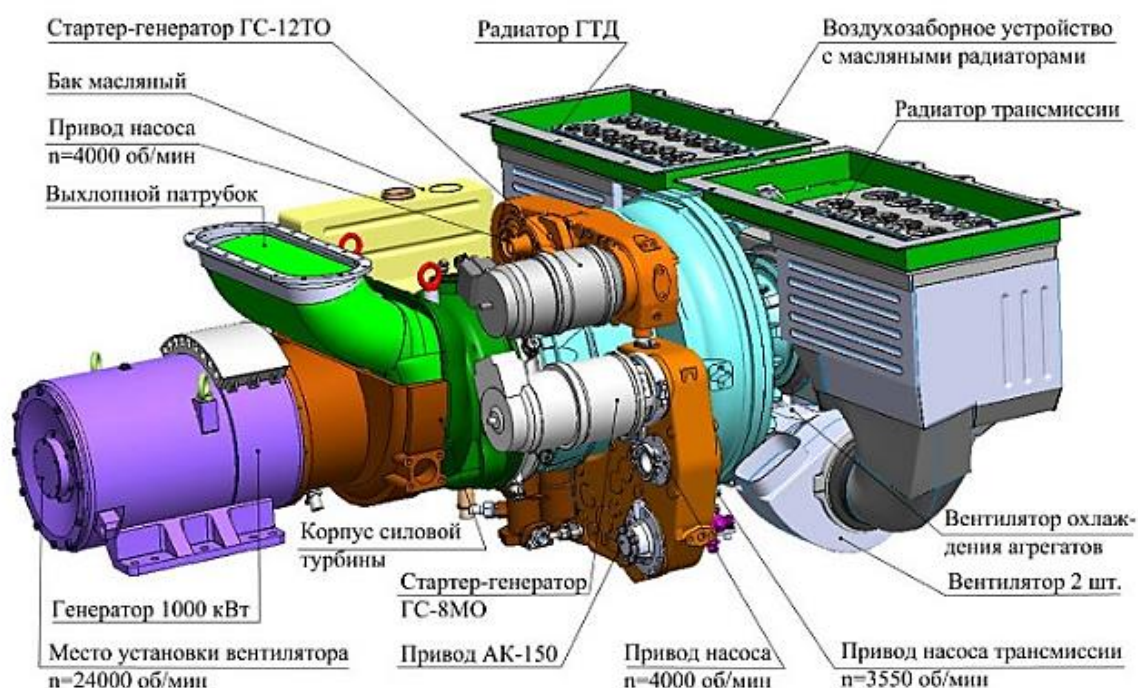


Рис. 15 Моноблок ГТД-1250 с высокочастотным генератором

Источник: <http://kadvi.ru/modul-dlya-gazoturbovozov/>

Для газотурбинной энергетической установки транспортного назначения требования к качеству генерируемой энергии не столь критичны как требования к обеспечению приемлемой динамики системы «генератор – привод газотурбинного двигателя». Улучшению динамики способствует снижение массы ротора синхронного генератора за счет применения постоянных магнитов. В то же время при нагрузке генератора

на выпрямитель, генерируемый ток не синусоидален, что в итоге приводит к пульсациям момента на валу генератора, а значит и к появлению повышенного уровня вибраций. Это в свою очередь негативно влияет на ресурс газотурбинного двигателя.

Такая ситуация требует введение в структуру электротехнического комплекса устройства, компенсирующего пульсаций электромагнитного момента.

Установлено, что сглаживание пульсаций электромагнитного момента может быть достигнуто за счет активной коррекции коэффициента мощности в обмотке статора генератора [17]. В этом случае тяговый генератор должен иметь две фазы, сдвинутые на 90 градусов [18]. Основные параметры генератора приведены в таблице 6.

Таблица 6. Технические характеристики генератора

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, кВт	920
Напряжение тяговой обмотки, амплитудное значение, В	650
Номинальная частота выходного напряжения, Гц	400
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	24000
Количество фаз	2
Воздушный зазор, мм	2
Удельная масса ротора, не более, кг/кВт	0,133
Удельная мощность генератора, не более, кВт/кг	0,98
Пульсации момента на валу, не более, %	0,5

Как известно, сущность активной коррекции коэффициента мощности в электрической цепи состоит в том, что для обеспечения баланса энергии в цепь периодически подключают реактивный элемент. В результате чего несинусоидальная форма тока преобразуется к синусоидальному виду. Причем синусоидальное напряжение должно совпадать по фазе с током. При отсутствии фазового сдвига между током и напряжением мгновенная электрическая мощность генератора будет определяться выражением:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin^2(w \cdot t) + U_2 \cdot I_2 \cdot \cos^2(w \cdot t), \quad (15)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$ – мгновенные значения мощностей, создаваемых фазами генератора;

U_1 , U_2 – амплитудные значения напряжения фаз генератора;

I_1 , I_2 – амплитудные значения фазных токов генератора;

w – круговая частота;

t – текущее значение времени.

Если $U_1=U_2$, $I_1=I_2$, то выражение для электромагнитного момента на валу генератора будет иметь вид:

$$M_{\Sigma} = \frac{9.55 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \eta}{n} (\sin^2(\omega \cdot t) + \cos^2(\omega \cdot t)), \quad (16)$$

где n – частота вращения генератора;

η – коэффициент полезного действия генератора.

Анализ выражения показывает, что электромагнитный момент генератора будет иметь постоянное значение, так как:

$$\sin^2(\omega \cdot t) + \cos^2(\omega \cdot t) = 1, \quad (17)$$

На Рис. 16 приведена схема силовых цепей генераторной установки для моноблока ГТД-1250.

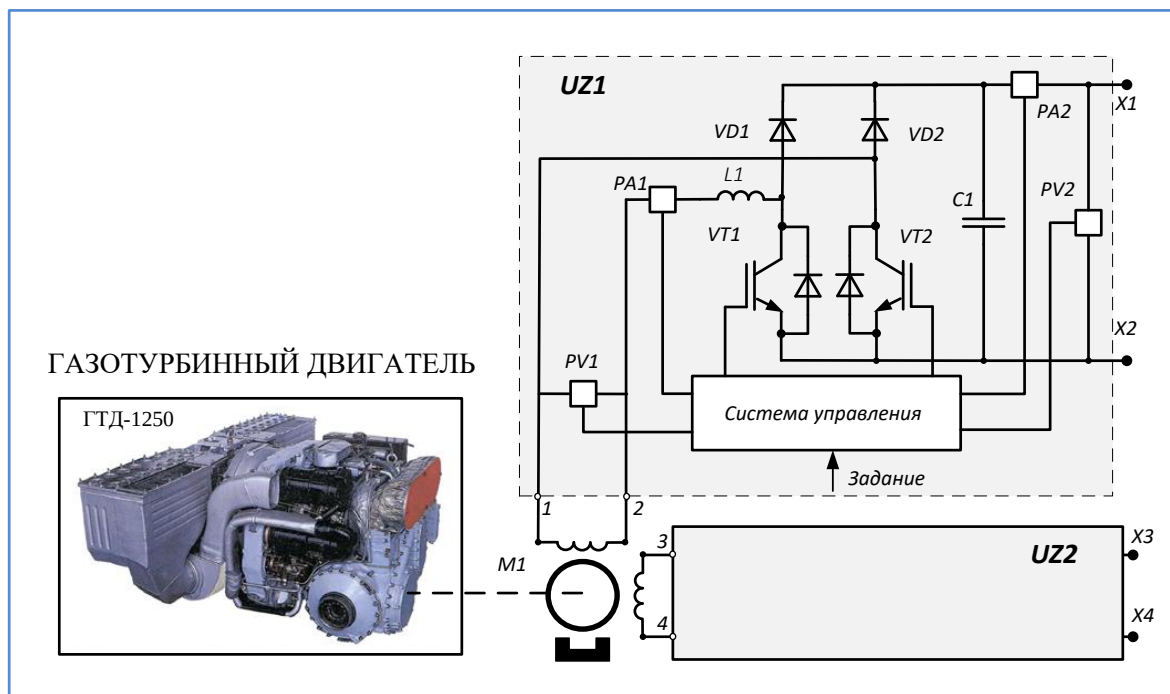


Рис. 16. Схема силовых цепей генераторной установки

Вал двухфазного генератора $M1$ с возбуждением от постоянных магнитов механически сочленен с валом турбины газотурбинного двигателя ГТД-1250. Фазные обмотки подключены к повышающим преобразователям $UZ1$ и $UZ2$. На выходных зажимах преобразователей $X1-X2$, $X3-X4$ формируется постоянное напряжение, которое далее подается в бортовую сеть через устройства защиты и коммутации.

Система энергоснабжения должна обеспечить выполнение следующих специфических функций:

- «тихий ход» с отключенной газотурбинной установкой в сцепном составе;

- «автономный ход» транспортной платформы в грузовом терминале;
- утилизация тормозной энергии.

Очевидно, что для реализации двух первых функций в автономных режимах работы и аварийных ситуациях необходимо включение в состав электротехнического комплекса мощного источника бесперебойного питания. В качестве такого источника электрической энергии на электроподвижном составе нашли применение литий-ионные аккумуляторные батареи. Например, модули батареи СНЭ 88ТТИв для транспорта. Батарея из 4 модулей имеет напряжение 614 В, номинальную энергоемкость 88 кВт*ч, массу 880 кг [19].

Для утилизации тормозной энергии могут быть применены емкостные накопители энергии (супер конденсаторы). Емкостные накопители характеризуются высокими значениями удельной энергии, используются в качестве буферных накопителей энергии, предназначенных для реализации больших мощностей заряда-разряда.

На основе супер конденсаторов строится система накопления энергии, которая в определенное время является дополнительным источником энергии.

Оценим возможность использования емкостных накопителей энергии в электротехническом комплексе транспортной платформы, ориентируясь на отечественные разработки [20]. Наиболее подходящим по технико-экономическим характеристикам накопителем для транспорта являются отечественные электрохимические конденсаторы производства АО «ЭЛТОН» [21]. Технические характеристики накопителя энергии типа 60*10ЭК303 приведены в таблице 7.

Таблица 7. Технические характеристики накопителя энергии 60*10ЭК303

Наименование параметра	Значение
Диапазон рабочих напряжений, В	450 – 900
Запасаемая энергия, МДж	22,7
Максимальная мощность, МВт	1,7
Отдаваемая энергия, МДж	22,7
Время заряда, с	64
Масса, т	2,0
Объем, м ³	1,4

С учетом ограничений на массогабаритные показатели электротехнического оборудования, устанавливаемого на транспортной платформе, можно рассматривать возможность применение двух накопителей энергии типа 60*10ЭК303 с суммарной запасаемой энергией

$E_{\text{торм}} = 45,4 \text{ МДж}$. Время заряда $t_{\text{заряда}}$ накопителей энергии при мощности рекуперации энергии $P_{PT} = 250 \text{ кВт}$ составит:

$$t_{\text{заряда}} = \frac{E_{\text{торм}}}{3,6 \cdot P_{PT}} = \frac{45,4}{3,6 \cdot 250} = 0,0504 [\text{час}], \quad (18)$$

Изменение скорости движения за время, затрачиваемое на заряд накопителей энергии, определяется из уравнения движения на горизонтальном участке пути:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{m} \cdot \left(\frac{P_{PT}}{V} + k_{cd} \cdot V^2 \right), \quad (19)$$

где V – скорость движения;

m – масса транспортной платформы;

P_{PT} – мощность рекуперации энергии;

t – текущее значение времени;

k_{cd} – коэффициент, учитывающий сопротивление движению, приведенный к одной транспортной платформе ($k_{cd} = 1,46 \text{ кг/с}$).

На рисунке 17 показана зависимость скорости движения от времени, рассчитанная для $m = 68 \text{ т}$, при $P_{PT} = 250 \text{ кВт}$.

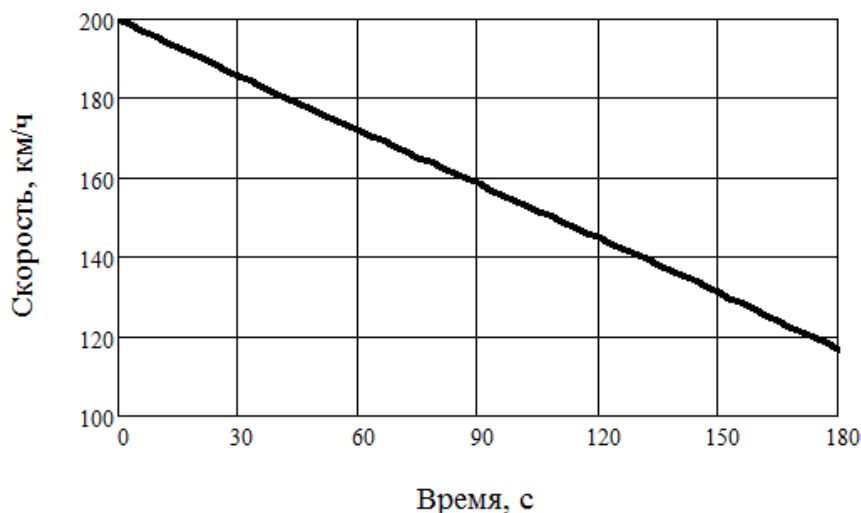


Рис. 17. График зависимости скорости движения от времени

Из рисунка следует, что скорость движения снижается с 200 км/ч до 117 км/ч за время заряда накопителей энергии при рекуперативном торможении. В Табл. 8 приведены результаты расчета параметров торможения.

Таблица 8. Результаты расчета параметров рекуперативного торможения

Наименование параметра	Значение
Скорость начала торможения, м/с	55,56
Скорость окончания торможения, м/с	32,46
Кинетическая энергия платформы, МДж	104,69
Энергия, запасаемая в накопителе, МДж	45,4
Энергия сопротивления движению, МДж	23,73
Время торможения, с	181
Энергетическая эффективность торможения, %	43,37

Анализ результатов приведенного примера показывает, что при использовании отечественных электрохимических конденсаторов удастся утилизировать почти половину кинетической энергии. Оставшаяся часть энергии должна быть рассеяна при реостатном торможении.

Предлагается следующая структура системы энергоснабжения транспортной платформы, приведенная на Рис. 18.

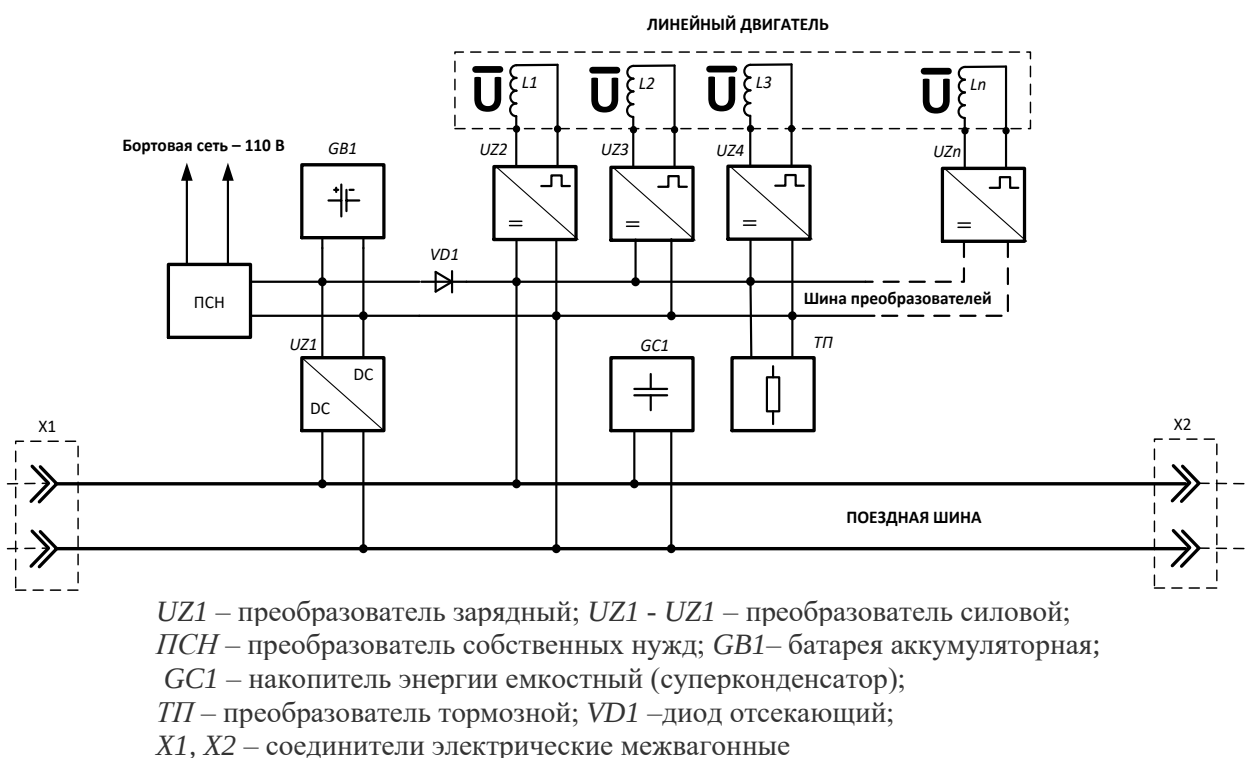


Рис. 18. Структура системы энергоснабжения транспортной платформы

Структура системы энергоснабжения позволяет функционировать транспортной платформе как в составе поезда по системе многих единиц, так и автономно. В первом случае электропитание подается на поездную шину от газотурбинной энергетической установки. Во втором случае электропитание подается от аккумуляторной батареи GB1, расположенной

на платформе. В любом случае обмотки статора $L1 - Ln$ линейного двигателя получают питание от преобразователей энергии $UZ2 - UZn$ в двигательном режиме работы или генерируют электродвижущую силу, которая преобразуется преобразователями $UZ2 - UZn$ в постоянное напряжение на шине преобразователей в генераторном режиме работы линейного двигателя. Энергия, генерируемая линейным двигателем, поступает на емкостный накопитель энергии $GC1$ и накапливается в нем. Избыток генерируемой энергии рассеивается в тормозном преобразователе ТП. К поездной шине подключен зарядный преобразователь для заряда аккумуляторной батареи $GB1$ и питания преобразователя собственных нужд ПСН.

В автономном режиме работы, когда напряжение на емкостном накопителе $GC1$ становится ниже напряжения аккумуляторной батареи $GB1$, на шину преобразователей подается напряжение от аккумуляторной батареи $GB1$ через отсекающий диод $VD1$. Преобразователь $UZ1$ отключается. При этом ПСН также получает питание от аккумуляторной батареи $GB1$.

В режиме рекуперативного торможения энергия, генерируемая линейным двигателем, запасается в емкостном накопителе энергии $GC1$. Это сопровождается повышением напряжения на поездной шине и при достижении значения большего, чем напряжение на аккумуляторной батарее $GB1$, запирается диод $VD1$ и производится запуск зарядного преобразователя $UZ1$.

Таким образом, структура системы энергоснабжения транспортной платформы характеризуется совместным использованием автономной энергетической установки, источника бесперебойного питания силовых цепей на основе аккумуляторной батареи и емкостного накопителя энергии [22]. Это позволяет уменьшить глубину разряда и цикличность перезаряда аккумуляторной батареи, что положительно отразится на сроке ее службы.

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ

Задачей управления электротехническим комплексом является реализация обычных для электроподвижного состава режимов разгона, движения с постоянной скоростью, выбега и торможения в левитирующем состоянии, а также специфических режимов, к которым можно отнести:

- режим «всплывания/посадки», когда подвижная единица плавно переходит в левитирующее состояние и обратно, а линейные двигатели работают при нулевой тяге;
- режим «тихого хода», когда транспортная платформа автономно перемещаются вдоль путевой структуры в левитирующем состоянии с маневровой скоростью.

В каждом режиме работы структура энергоснабжения должна изменяться в зависимости от сложившейся энергетической ситуации.

Электропитание на поездную шину может быть подано:

- от генератора газотурбинной энергетической установки;
- одновременно от генератора газотурбинной энергетической установки и емкостного накопителя энергии;
- от емкостного накопителя энергии;
- от аккумуляторного накопителя энергии.

Таким образом, рассматриваемый электротехнический комплекс является многорежимным динамическим объектом. Приоритетной задачей управления является стабилизация пространственного положения платформы относительно путевой структуры во всех режимах работы.

Стабилизация платформы достигается за счет координации управления между автономными взаимосвязанными контурами регулирования сил левитации и тяги, расположенных по бортам платформы. Между контурами регулирования возникают связи, обусловленные механическим взаимодействием через конструктивные элементы транспортной платформы.

На рисунке 19 схематически показана транспортная платформа, по бортам которой установлены статоры линейных двигателей $M_a - M_f$. Между точками a, b, c, d, e, f приложения сил, создаваемых статорами линейного двигателя, возникают продольные поперечные и диагональные связи.

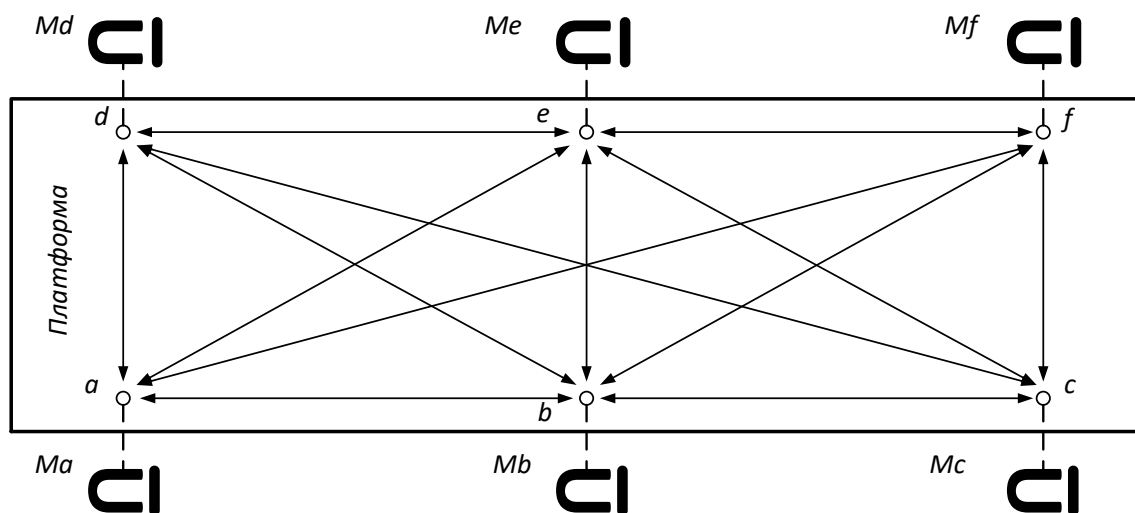


Рис. 19. Механические связи между точками приложения сил

В случае если эти связи достаточно сильны, то задание одинаковых значений воздушных зазоров в каждом контуре регулирования может привести к возникновению условий «состязательности», когда регулятор

одной из точек подвеса, пытаясь отработать задание, воздействует через связи на другие точки подвеса, которые создают ответную реакцию. Это может привести к автоколебаниям и вибрациям. Поэтому внутренние связи объекта должны компенсироваться внешними связями между отдельными контурами регулирования [23]. Такой подход позволяет организовать внешний контур адаптивного управления.

Наряду со стабилизацией пространственного положения платформы необходимо отслеживать изменения профиля путевой структуры, так как его особенности могут возбуждать собственные и вынужденные колебания платформы. Среди наиболее опасных для устойчивости движения являются сложные формы колебаний «виляния», «галопирования» и «боковой качки». Предсказание профиля пути позволяет реализовать алгоритм упреждающего управления электротехническим комплексом, а также вычислять необходимую для реализации режимов мощность энергетической установки.

Система управления энергоснабжением определяет структуру питания силовых цепей в зависимости от сложившейся энергетической ситуации и оценки требуемой мощности. Кроме того, производится оптимизация энергетических потоков с целью минимизации расхода топлива.

На Рис. 20 показана структурная схема системы управления электротехническим комплексом.

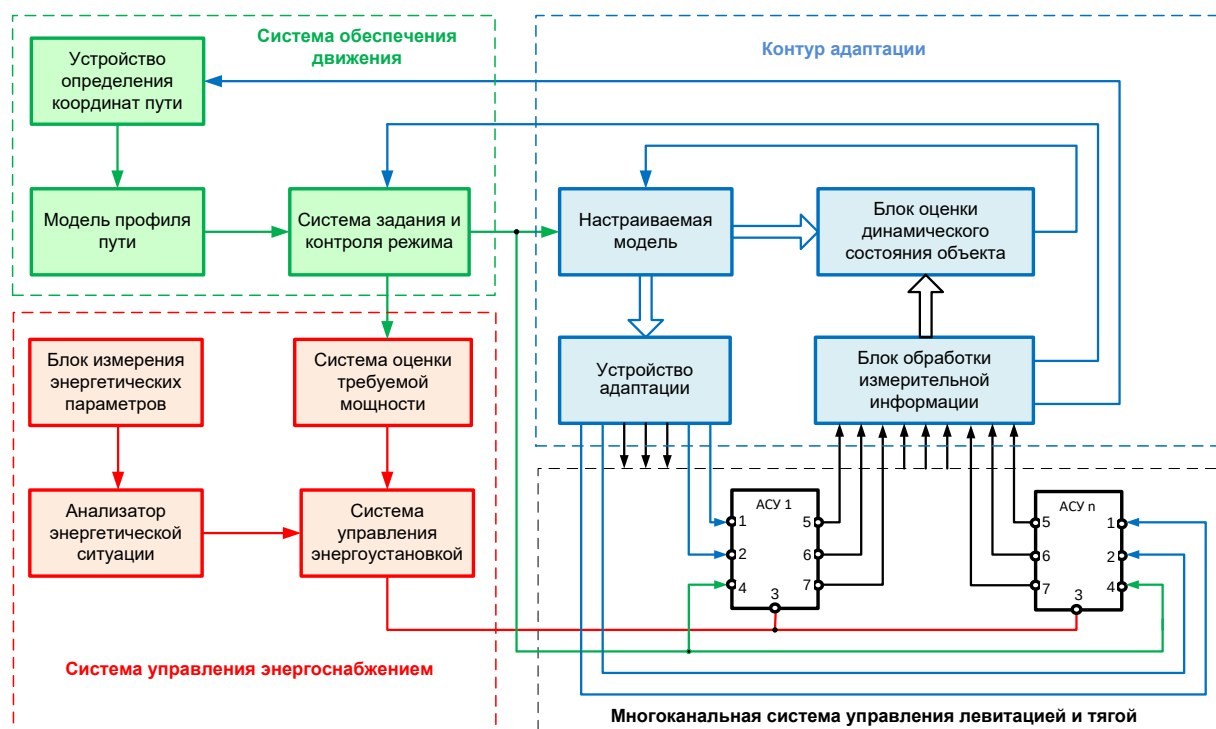


Рис. 20. Структурная схема системы управления электротехническим комплексом

По функциональному признаку система разделена на четыре части:

- система обеспечения движения;
- система управления энергоснабжением;
- многоканальная система управления левитацией и тягой;
- контур адаптации.

Система обеспечения движения состоит из устройства определения координат пути, модели профиля пути и системы задания и контроля режима. Координаты движущегося объекта вычисляются в блоке обработки измерительной информации по дискретным отсчетам количества путевых элементов на пройденном участке пути. Модель профиля пути содержит информацию о трассе включающую:

- координаты начала и конца блок-участков;
- длину кривых;
- значения уклонов;
- места остановок;
- средние, максимальные и минимальные мощности, реализуемые на участках.

Эта информация используется для предсказания профиля пути.

Система задания и контроля режима реализует алгоритм упреждающего задания режимов работы компонентов электротехнического комплекса.

В состав системы управления энергоснабжением входят:

- блок измерения энергетических параметров;
- анализатор энергетической ситуации;
- система оценки требуемой мощности;
- система управления энергоустановкой.

Система управления энергоустановкой изменяет структуру энергоснабжения в зависимости от сложившейся энергетической ситуации и оценки требуемой мощности, а также оптимизирует энергетические потоки с целью минимизации расхода топлива.

Многоканальная система управления левитацией и тягой состоит из автономных систем управления (АСУ).

На рисунке 21 приведена структурная схема АСУ. На схеме показаны следующие компоненты:

- СПЗ* – система регулирования воздушного зазора;
- СПУ* – система регулирования углов управления;
- UZ* – силовой преобразователь;
- ТА* – датчик тока.

На схеме также показан статор линейного двигателя *СЛД*, который механически сочленен с датчиками воздушного зазора *ВР* и положения *ВЛ*.

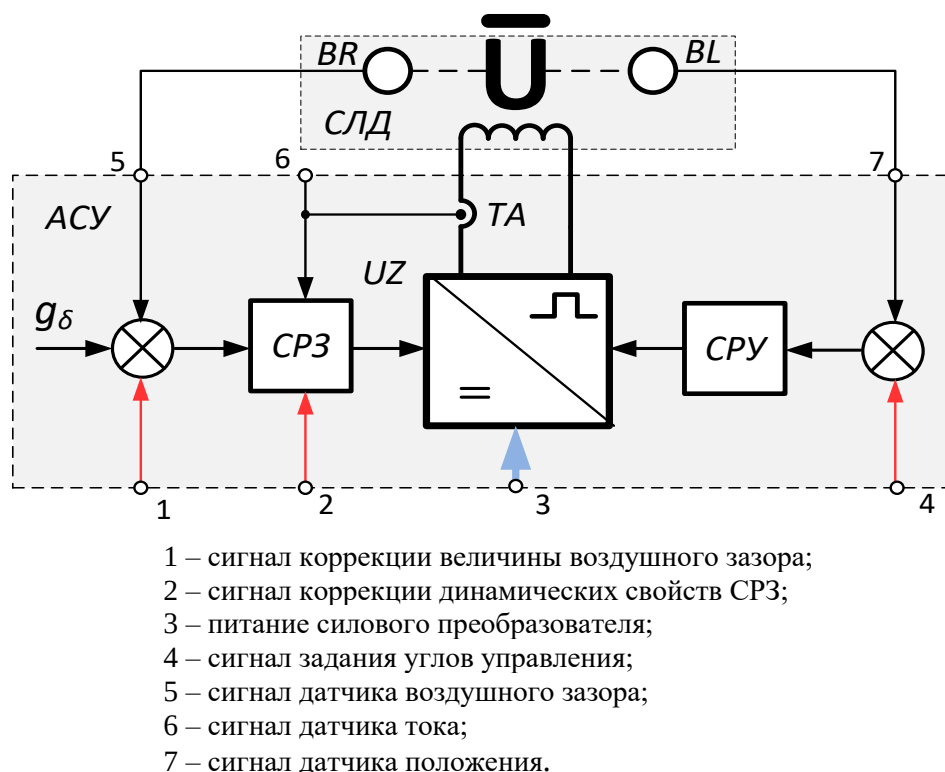


Рис. 21. Структурная схема АСУ

АСУ обеспечивает управление подъемной силой и силой тяги, создаваемой одним элементом статора линейного двигателя. Формирование тока в обмотке статора происходит таким образом, чтобы поддерживать величину воздушного зазора в допустимых пределах, а также обеспечить заданную силу тяги.

Контур адаптации состоит следующих компонентов:

- настраиваемой модели;
- блока оценки динамического состояния объекта;
- устройства адаптации;
- блока обработки измерительной информации.

В блок обработки измерительной информации поступает вся доступная измерению информация о состоянии многоканальной системы управления левитацией и тягой. После предварительной обработки первичной информации данные передаются в блок оценки динамического состояния объекта, который идентифицирует динамическое состояние объекта и подстраивает параметры настраиваемой модели под параметры объекта управления. По результатам подстройки устройство адаптации формирует алгоритм коррекции задания для АСУ.

Представленная структура управления электротехническим комплексом обеспечивает реализацию режимов работы транспортной платформы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие работ в области создания грузовых МЛТС связано с разработкой и исследованием электротехнического комплекса подвижного состава для полигона эксплуатации с протяженными перегонами на слабо освоенных территориях.

В работе предложена концепция построения электротехнического комплекса подвижного состава с путевой структурой, оснащенной только пассивными компонентами электротехнического комплекса. Такое техническое решение позволит снизить затраты на создание инфраструктуры транспортной системы.

В основе принятых технических решений лежит развитие идеи интеграции различных функций в одном объекте, способном одновременно обеспечить левитацию, тягу и боковую стабилизацию используя однотипные компоненты электротехнического комплекса.

Установлено, что свойства линейного реактивного индукторного двигателя с поперечным замыканием потока, позволяют обеспечить левитацию, тягу и боковую стабилизацию. Двигатель имеет пассивный ротор, а питание его обмоток осуществляется от однотипных силовых преобразователей. Это позволяет снизить массу электротехнического оборудования и расположить его на борту транспортного средства.

Результаты расчетных исследований, выполненные на компьютерной модели комбинированной тягово-левитационной системы с линейным реактивным индукторным двигателем, подтверждают физическую реализуемость системы. В качестве ближайшего железнодорожного аналога рассматривалась скоростная вагон-платформа модели 13-6990 для перевозки контейнеров.

В отличие от объектов-аналогов в состав электротехнического комплекса включена газотурбинная энергетическая установка, генерирующая электрическую энергию для питания силовых цепей. Топология системы энергоснабжения позволяет функционировать транспортной платформе как в составе поезда по системе многих единиц, так и автономно.

Предложенная структура электротехнического комплекса соответствует условиям предполагаемого полигона эксплуатации, расположенного на труднодоступных и слабо освоенных территориях. Путевая структура пассивна, а подвижной состав оснащен автономной энергетической установкой. Это обеспечивает создание МЛТС с низко затратной инфраструктурой.

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. Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Предпосылки создания высокоскоростной контейнерной транспортной системы // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 4. – № 10. – С. 4–41. [Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. Prerequisites for the creation of a high-speed container transport system. *Transportation Systems and Technology*. 2017;4(10):4-41. (In Russ., in Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst2017345-41
2. Антонов Ю.Ф., Никитин В.В., Хожайнов А.И. Технология HSST в проектах LINIMO и ROTEM / Труды I Международной научно-практической конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» 29-31 октября 2013 года; СПб. Под общ. ред. Антонова Ю.Ф., СПб: ООО PUDRA, 2013 – С. 18–25. [Antonov JuF, Nikitin VV, Hozhainov AI. Tehnologija HSST v proektah LINIMO i ROTEM In: Antonov JuF, aditor. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Maglev Transportation Systems and Technologies”. 2013 October 29-31; St. Petersburg: LLC PUDRA, 2013. p. 18-25 (In Russ.)].
3. Siemens RH. Propulsion System and Power Supply for TRANSRAPID Commercial Lines. [Internet]. [cited 2021 June 20]. Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/Propulsion-System-and-Power-Supply-for-TRANSRAPID-Siemens/abd1b963bb9b821915107b0efcae3dccd7974523#citing-papers>.
4. Hellinger R, Mazur T, Nothhaft J. STATIONARY COMPONENTS OF THE LONG-STATOR PROPULSION SYSTEM FOR HIGH-SPEED MAGLEV SYSTEMS. [Internet]. [cited 2021 June 20]. Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/STATIONARY-COMPONENTS-OF-THE-LONG-STATOR-PROPULSION-Hellinger-Mazur/ce40db8a9076af57e575f0ae33b751d6f08f09dd>
5. General Atomics. Maglev Technologies. [Internet]. Website Company General Atomics (GA); [cited 2021 June 20]. Available at: <http://www.ga.com/urban-maglev>
6. James K, Rodriguez L, Hinds S. and Thicksten E. Maglev Freight Conveyor Systems. [Internet]. [cited 2021 June 20]. Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/Maglev-Freight-Conveyor-Systems-No.-121-James-Rodriguez/be38c36d90a80a8312968b4e42b1535b663a4033>
7. Зайцев А.А. Технология «Магтрансити» в проекте «Санкт-Петербургский Маглев» // Известия ПГУПС. – 2013. – № 4. – С. 5–17. [Zaitsev AA. Technology “Magtranscity” in the project “St. Petersburg Maglev”. *Izvestia PGUPS*. 2013;(4):5-17. (In Russ.)]. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-magtransiti-v-proekte-sankt-peterburgskiy-maglev> Ссылка активна на: 20.06.2021.

8. Зайцев А.А. Грузовая транспортная платформа на магнитолевитационной основе: опыт создания // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 5–15. [Zaytsev AA. Gruzovaja transportnaja platforma na magnitolevitacionnoj osnove: opyt sozdanija . *Transportation Systems and Technology*. 2015;2(2):5-15. (In Russ.)]. Доступно по: <https://transsyst.ru/transsyst/article/view/7592> Ссылка активна на: 20.06.2021.
9. Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: ответ на вызовы времени // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – №1. – С. 5–13. [Zaytsev AA. Magnetothevitational transport: response to time challenges. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(1):5-13. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/transsyst2017315-13>
10. Реднов Ф.А. Трехфункциональный односторонний линейный индукторный двигатель: дис....канд. техн. наук. – Новочеркасск, 1993. – 205 с. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30158921> Ссылка активна на: 20.06.2021. [Rednov FA. Trekhfunktsional'nyy odnostoronniy lineynyj induktornyj dvigatel' [dissertation]. Novocherkassk; 1993. 205 p. (In Russ.)]. [cited 2021 June 20]. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30158921>
11. Талья И.И., Серебряков В.И., Сулова К.Н. и др. Система линейного электропривода и магнитной подвески на базе линейного индукторного электродвигателя для вагона городского и пригородного сообщения // Электровозостроение. – 1990. – Т. 31. – С. 175–187. [Tal'ja II, Serebrjakov VI, Suslova KN, et al. Sistema linejnogo elektroprivoda i magnitnoj podveski na baze linejnogo induktornogo elektrodvigatelja dlja vagona gorodskogo i prigorodnogo soobshhenija. *Elektrovozostroenie*. 1990;(31):175-187. (In Russ.)].
12. ÜSTKOYUNCU, Nurettin & RAMU, Krishnan. (2015). A performance comparison of conventional and transverse flux linear switched reluctance motors. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*. 2015;23: 974-986. <https://doi.org/10.3906/elk-1305-214>
13. Prasad N, Jain S, Gupta S. Electrical Components of Maglev Systems: Emerging Trends. *Urban Rail Transit*. 2019;5:67-79. <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0104-1>
14. Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А. Развитие теории и создание новых конструкций индукторных машин // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 6–10. [Kolomejcev LF, Pahomin SA. Razvitie teorii i sozdanie novyh konstrukcij induktornyh mashin . *Izvestija vuzov. Jelektromehanika*. 2005;2:6-10. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9144874>. Ссылка активна на: 20.06.2021.
15. Скоростная вагон-платформа для перевозки контейнеров модели 13-6990 [Skorostnaja vagon-platforma dlja perevozki kontejnerov modeli 13-6990. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.vnikti-kolomna.ru/development/tech/skorostnaya-vagon-platforma-dlya-perevozki-konteynerov-modeli-13-6990.html>. Ссылка активна на 20.06.2021.
16. ПАО «Калужский двигатель» [PAO "Kaluzhskij dvigatel"] [Internet]. In Russ.)]. Доступно по: <http://kadvi.ru/modul-dlya-gazoturbovozov/>. Ссылка активна на: 20.06.2021.
17. Литовченко В.В. 4q-S – четырехквadrантный преобразователь электровозов переменного тока // Известия вузов. Электромеханика. – 2000. – № 3. – С.64–73. [Litovchenko VV. 4q-S – chetyrehkvadrantnyj preobrazovatel' jelektrovozov peremennogo toka. *Izvestija vuzov. Jelektromehanika*. 2000;(3):64-73. (In Russ.)].

18. Магин В.В., Панасюк М.Б. Особенности конструкции высокоскоростных синхронных генераторов с постоянными магнитами, предназначенных для работы в составе системы электродвижения. Вопросы электромеханики. – Т. 149. – 2015. – С. 18–22. [Magin VV, Panasjuk MB. Osobennosti konstrukcii vysokoskorostnyh sinhronnyh generatorov s postojannymi magnitami, prednaznachennyh dlja raboty v sostave sistemy jelektrovdizhenija. *Voprosy jelektromehaniki*. 2015;(149):18-23. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28420546>. Ссылка активна на: 20.06.2021.
19. Каталог. Батареи для транспорта. ООО «Лиотех-Инновации». [Katalog. Batarei dlja transporta. LLC «Lioteh-Innovacii». [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.liotech.ru/products/batarei-i-nakopiteli/#>. Ссылка активна на 20.06.2021.
20. Евстафьев А.М. Оценка энергоемкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава // Бюллетень результатов научных исследований. – 2018. – № 2. – С. 7–17. [Evstaf'ev AM. Ocenka jenergoemkosti bortovogo nakopitelja jenergii dlja tjavovogo podvizhnogo sostava. *Bjulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij*. 2018;(2):7-17. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35214018> Ссылка активна на 20.06.2021.
21. Варакин И.Н., Менухов В.В., Самитин В.В. Применение электрохимических конденсаторов ЗАО «ЭЛТОН» в составе гибридных энергосиловых установок на карьерном автотранспорте // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – № 11. – С. 10–14. [Varakin IN, Menuhov VV, Samitin VV. Primenenie jelektrohimicheskikh kondensatorov ZAO "ELTON" v sostave gibridnyh jenergosilovyh ustanovok na kar'ernom avtotransporte. *Gornoe oborudovanie i elektromehanika*. 2007;(11):10-14. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9604529> Ссылка активна на 20.06.2021.
22. Евстафьев А. М. Выбор топологии схем тягового привода электрического подвижного состава // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2010. – Вып. 3 (24). – С. 89–98. [Evstaf'ev AM. Vybora topologii shem tjavovogo privoda jelektricheskogo podvizhnogo sostava. *Izvestija Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*. 2010;3(24):89-98. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15548707> Ссылка активна на 20.06.2021.
23. Бабак С.Ф., Васильев В.И., Ильясов Б.Г. и др. Основы теории многосвязных систем автоматического управления летательными аппаратами: Учеб. пособие / Под ред. Красилыцкого М.Н. – М.: Изд-во МАИ, 1995. – 288 с. [Babak SF, Vasil'ev VI, Il'jasov BG, et al. Fundamentals of the theory of multiply connected systems for automatic control of aircraft: schoolbook. Krasilycikova MN, editors. Moscow: MAI; 1995. 228 p. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Киреев Александр Владимирович, к.т.н., доцент;

eLibrary SPIN-код: 9674-4388; ORCID iD: 0000-0003-1157-2402;

Email: akireev@privod-n.ru

Кожемяка Николай Михайлович, к.т.н.;

eLibrary SPIN-код: 7921-4510; ORCID iD: 0000-0002-3976-7546;

Email: nkozhemyaka@privod-n.ru

Кононов Геннадий Николаевич;

eLibrary SPIN-код: 9565-6740; ORCID iD: 0000-0002-5511-9311;

Email: gkononov@privod-n.ru

Information about the authors:

Alexander V. Kireev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN-код: 9674-4388; ORCID iD: 0000-0003-1157-2402;
Email: akireev@privod-n.ru

Nikolay M. Kozhemyaka, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN-код: 7921-4510; ORCID iD: 0000-0002-3976-7546;
Email: nkozhemyaka@privod-n.ru

Gennady N. Kononov;
eLibrary SPIN-код: 9565-6740; ORCID iD: 0000-0002-5511-9311;
Email: gkononov@privod-n.ru

Цитировать:

Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Электротехнический комплекс магнитолевитационного подвижного состава // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 67–105. doi: 10.17816/transsyst20217367-105

To cite this article:

Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. Electrotechnical complex of maglev rolling stock. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):67-105. doi: 10.17816/transsyst20217367-105

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.31

DOI 10.17816/transsyst202173106-119

© И. М. Казымов, Б. С. Компанец, О. Н. Дробязко

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

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Обоснование: На сегодняшний день актуальной проблемой в электроэнергетике является создание устройств для сбора и передачи информации в электрических сетях различных уровней напряжения.

Цель: Исследование, изложенное в рамках данной статьи, направлено на создание универсального устройства, предназначенного для использования в электрических сетях низкого и среднего уровня напряжений с целью сбора и передачи информации о параметрах электрической энергии в месте установки устройства.

Методы: Исследование выполнено с использованием методов компьютерного моделирования разрабатываемых электронных устройств.

Результаты: Приводится функциональная схема разработанного устройства, указываются варианты его подключения к сети для различных условий и требований, даются рекомендации по использованию.

Заключение: Полученные результаты могут быть использованы электросетевыми компаниями и промышленными предприятиями для проведения анализа состояния и эффективности работы электрических сетей.

Ключевые слова: параметры электроэнергии, коэффициент мощности, прибор учёта, АИИС КУЭ, цифровой двойник, цифровизация электроэнергетики, датчик напряжения.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© I. M. Kazymov, B. S. Kompaneets, O. N. Drobyazko

Altai State Technical University named I. I. Polzunov
(Barnaul, Russia)

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR CONTROL OF ELECTRIC ENERGY PARAMETERS IN THE DISTRIBUTION NETWORK

Background: As of today, the actual problem in the power sector is to create a device for the collection and transmission of information in networks of different voltage levels.

Aim: The research presented in the framework of this article is aimed at creating a universal device intended for use in electrical networks of low and medium voltage in order to

collect and transmit information about the parameters of electrical energy at the place of installation of the device.

Methods: The study was performed with the use of computer modeling techniques developed electronic devices.

Results: A functional diagram of the developed device is given, options for its connection to the network for various conditions and requirements are indicated, and recommendations for use are given.

Conclusion: The obtained results can be used by power grid companies and industrial enterprises to analyze the condition and efficiency of power grids.

Keywords: electricity parameters, power factor, metering device, ASCMA, digital twin, digitalization of the electric power industry, voltage sensor.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивное развитие получают цифровые технологии в электроэнергетике, в том числе и в распределительных электрических сетях низкого и среднего уровня напряжений. Одним из значимых направлений в этой сфере на сегодняшний день является создание так называемых «цифровых двойников» электроэнергетических систем. В связи с этим возникает необходимость в создании устройств, способных длительное время собирать, анализировать и передавать данные о параметрах электрической энергии в точке установки устройства [1–4].

Ввиду того, что на данный момент подобные устройства являются дорогостоящими, область их применения крайне ограничена: в основном такими устройствами оснащаются крупные объекты генерации (электростанции) и распределения (узловые подстанции) электрической энергии. Таким образом, «цифровизации» подвергнута лишь малая часть энергосистемы, включающая в себя в основном межсистемные связи и другие крупные узлы высокого напряжения (220 кВ и выше). В это же время для достижения максимально возможной эффективности распределительных сетей низкого и среднего напряжений требуется создание для них подобных «цифровых двойников», однако в нынешних условиях это чрезвычайно трудно в реализации и неэффективно экономически по причине высокой стоимости подобных комплексов [5–9].

Для создания цифрового двойника сети могут быть использованы различные устройства, способные определять параметры электрической энергии в точке подключения. Однако на данный момент единственными цифровыми устройствами в сельских сетях низкого и среднего напряжений, способными удалённо передавать информацию о параметрах электрической энергии в сети, остаются приборы учёта электрической энергии, используемые для коммерческого учёта электроэнергии с использованием АИИС КУЭ. Известны предложения о составе и характере устройств контроля сетей [10], однако список параметров, которые

должны передавать подобные устройства для обеспечения создания полноценного «цифрового двойника» электрической сети, является достаточно обширным и содержит:

- ток в контролируемой линии;
- напряжение в месте присоединения;
- потребляемая мощность;
- коэффициент мощности нагрузки контролируемой линии;
- потреблённая электрическая энергия за произвольный период времени.

Очевидно, что информация об электрических величинах должна быть доступна как в виде мгновенных значений, так и в виде статистических данных.

Основную сложность в построении подобных приборов составляет выбор технического решения по определению коэффициента мощности нагрузки. Данная проблема обусловлена в основном цифровым (и, следовательно, дискретным) характером данных о мгновенных величинах тока и напряжения, и, в том числе, влиянием несинусоидальности питающего напряжения.

Так как точное определение коэффициента мощности как для каждой нагрузки в частности, так и для электрической сети в целом является одним из важнейших этапов создания цифрового двойника, а также возможностью разработки эффективных мер по приведению коэффициента мощности в целом по сети к нормативным значениям. Для сельских электрических сетей это особенно актуально ввиду низкого дневного значения коэффициента мощности для большинства сельскохозяйственных нагрузок (0,70–0,75) [11].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Создание возможности проведения удалённого анализа состояния и эффективности работы электрических сетей является одним из перспективных направлений развития электросетевого комплекса.

В связи с этим целью исследования является создание материально-технической базы для проведения автоматизированного удалённого анализа распределительных электрических сетей низкого и среднего уровня напряжений.

Задачи, выполнение которых необходимо для достижения заявленной цели, могут быть сформулированы следующим образом:

- разработка устройства для контроля параметров электрической энергии в сети в месте его установки.

Устройство для контроля параметров электрической энергии в сети в месте его установки должно отвечать следующим требованиям:

- простота конструкции;
- надёжность: как составляющих элементов, так и прибора в целом;
- возможность объединения ряда приборов в единую сеть, в том числе совместимость с современными приборами учёта для АИИС КУЭ;
- возможность работать с применяемыми в настоящее время каналами связи;
- погрешность измерений и вычислений не должна превышать таковые у современных приборов учёта для АИИС КУЭ;
- перспективность (ориентированность на развитие отрасли в части цифровой трансформации, а именно возможность в перспективе работать в качестве устройства сбора и передачи информации при построении цифровых сетей) [12, 13].

ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО УСТРОЙСТВА

Устройство для контроля параметров электрической энергии в сети в месте его установки предназначено для осуществления сбора и передачи информации о параметрах электрической энергии в распределительной сети в точке его установки.

Основными направлениями использования устройства (в составе информационно-измерительной системы) являются:

- определение факта и места неучтённого потребления электрической энергии в распределительной сети;
- определение величины и места возникновения повышенных технических потерь электрической энергии в распределительной сети;
- сбор статистических данных о состоянии электрической сети для решения задач по прогнозированию, диагностике и определению остаточного ресурса оборудования и линий электропередачи;
- получение ценной информации касательно эффективности работы электрической сети, которая может быть использована для реконструкции (переустройства) сетей с целью повышения эффективности их работы: снижения величины технических потерь и повышения надёжности электрической сети в целом, что также позволит на основании данных анализа эффективности работы существующих электрических сетей проектировать и строить электрические сети, имеющие максимально возможный уровень надёжности и эффективности, который может быть достигнут инженерными решениями без вмешательства в состав оборудования сети.

Устройство для контроля параметров электрической энергии в распределительной сети должно иметь возможность измерения следующих параметров электрической энергии в точке его установки:

- сила тока, протекающая через датчики тока прибора;

- напряжение в месте установки прибора (как фазное, так и линейное);
- фазовый сдвиг между током и напряжением;
- активная мощность, потребляемая через присоединение, контролируемое данным устройством;
- температура окружающей среды;
- влажность воздуха окружающей среды.

На основе измеренных значений электрических величин устройство должно определять расчётным путём следующие параметры:

- активная, реактивная и полная мощности, потребляемые присоединением, на котором установлен прибор (мгновенные значения);
- коэффициент мощности нагрузки, подключённой к контролируемому присоединению (мгновенные значения);
- потребленная электрическая энергия (накопительные значения за произвольные прошедшие периоды с задаваемым интервальным разделением);

Измерение неэлектрических величин (температура и влажность воздуха окружающей среды) позволяет собирать статистические данные по отказам оборудования или возникновению технологических нарушений с привязкой к погодным условиям, а также устанавливать зависимости между величиной потерь (как технических, так и коммерческих) и погодными условиями, что, в свою очередь, позволит диагностировать различные неполадки в электрической сети и предупреждать их развитие в полноценные технологические нарушения.

Ввиду того, что рассматриваемые распределительные электрические сети в общем случае являются разветвлёнными сетями со сложной структурой, подключение к сети прибора традиционным способом по примеру электрического прибора учёта (в разрыв сети) чрезвычайно трудоёмко и не представляется возможным к оперативному выполнению ввиду необходимости выполнить отключение сетей на длительный срок с целью подключения требуемого числа приборов, что не может быть достигнуто по причине наличия ограничений на время перерыва в электроснабжении. Также подключение в разрыв сети накладывает ограничение на мобильность приборов и фактически ограничивает область их применения до рамок одной электрической сети, что не позволит произвести анализ всех имеющихся электрических сетей при помощи одного комплекта приборов по причине высокой трудоёмкости по их снятию и установке. Этот фактор может значительно повысить стоимость проекта по анализу эффективности работы электрической сети, особенно в том случае, когда требуется лишь снять текущее состояние электрической сети и отсутствует необходимость производить непрерывный сбор статистических данных о состоянии электрической сети.

По этим и другим причинам, исходя из имеющихся ограничений на

способ подключения разрабатываемого устройства, было принято решение о создании устройства, способного быть подключённым к сети без разрыва питающих проводов. При этом неизбежным условием является наличие возможности подключения непосредственно к токоведущим частям контролируемого присоединения (для обеспечения возможности контроля величины напряжения).

Так как основным назначением устройства является работа в составе информационно-измерительной системы, одним из главных направлений при проектировании является организация связи между устройством и центральным обрабатывающим компьютером, что позволит обеспечить непрерывную передачу информации о параметрах электрической энергии в точке установки устройства. Устанавливаемый канал связи должен быть помехоустойчивым и обеспечивать строго иерархическую связь типа «Центральный обрабатывающий компьютер – устройство для контроля параметров электрической энергии». Этот канал связи должен обеспечивать передачу информации как к устройству, так и от него, однако всякий обмен информацией должен производиться только по инициативе центрального обрабатывающего компьютера, при этом удалённая настройка устройства должна быть запрещена на этапе проектирования программного обеспечения устройства для обеспечения актуальности и единообразия передаваемой разными приборами информации.

Обязательное требование к надёжности устройства может быть обеспечено двумя путями:

- создание незащищённого от внешних воздействий и значительно удешевлённого устройства, которое, однако, необходимо монтировать в защитном корпусе (распределительных шкафах, ящиках);
- создание устройства, которое было бы защищено от внешних воздействий, как природного, так и техногенного характера, что являлось бы удорожающим фактором, однако избавило бы от необходимости использования внешних защитных устройств.

Передаваемые данные о параметрах электрической энергии в точке подключения устройства должны отвечать требованиям к точности, что может быть достигнуто применением электронных компонентов, имеющих повышенный уровень точности параметров (в том числе и для активных компонентов), а также требует ввода калибровочных элементов в состав прибора, обязательной стопроцентной проверки качества и калибровке на этапе производства. Эти меры позволят создавать приборы с достаточной степенью повторяемости характеристик по точности, что, в свою очередь, позволит получать данные о параметрах электрической энергии в сети с заданной точностью и производить анализ получаемой информации.

Таким образом можно заключить, что совокупность устройств для контроля параметров электрической энергии в точке их установки может

быть объединена в систему контроля параметров электрической энергии в сети при наличии их связи с центральным обрабатывающим компьютером.

Анализ эффективности работы электрической сети может быть проведён только при организации работающей системы контроля параметров электрической энергии в сети на основе центрального обрабатывающего компьютера и определённого числа устройств контроля параметров электрической энергии. В этом случае показания устройств, установленных в различных точках электрической сети, должны быть переданы на центральный обрабатывающий компьютер при помощи установленных каналов связи с соблюдением условия одновременности снятия показаний.

Условие одновременности снятия показаний приборов должно обеспечиваться программной частью устройства и быть синхронизированным по времени. Синхронизация обеспечивается внутренними часами устройства, которые, в свою очередь, синхронизируются с часами центрального обрабатывающего компьютера в определённые периоды. Таким образом, центральный обрабатывающий компьютер лишь устанавливает частоту снятия исходя из актуальных задач и принимает одновременно снятые показания со всех контролируемых точек электрической сети.

Таким образом в реальных устройствах обеспечивается достоверность получаемой картины распределения параметров электрической энергии в распределительной сети и создаётся основа для сбора статистических данных, из анализа которых впоследствии могут быть сделаны определённые выводы.

Также возможно использование устройства в качестве прибора для контроля показателей качества электрической энергии для приближённой оценки целесообразности работ в направлении улучшения показателей качества электрической энергии в конкретной сети или на её участке.

Несмотря на необходимые различия в конструкции устройств для контроля параметров электрической энергии в сети в месте его установки, предназначенных для сетей различного класса напряжения, имеет смысл разработать единую конструкцию, на основе которой будет строиться каждый тип устройств. Очевидно, что эта конструкция должна быть модульной и обеспечивать возможность перестройки прибора на работу с другой сетью с минимальным числом заменяемых блоков, а в перспективе – совершенно без внесения изменений в конструкцию, что позволило бы производить данные устройства крупными партиями, снизив номенклатуру вариантов исполнения приборов.

Конструктивно устройство для контроля параметров электрической энергии в сети в месте его установки должно состоять из следующих структурных единиц:

- узел контроля протекающего тока;
- узел контроля напряжения в точке подключения;
- узел определения сдвига фаз между током и напряжением;
- узел определения дополнительных параметров (температура, влажность, запылённость воздуха и тому подобные);
- узел связи с центральным обрабатывающим компьютером;
- узел резервного питания;
- узел источника тактового сигнала, совмещённый с узлом контроля времени;
- центральное вычислительное устройство на основе микроконтроллера.

Функциональная схема устройства показана на Рис. 1.

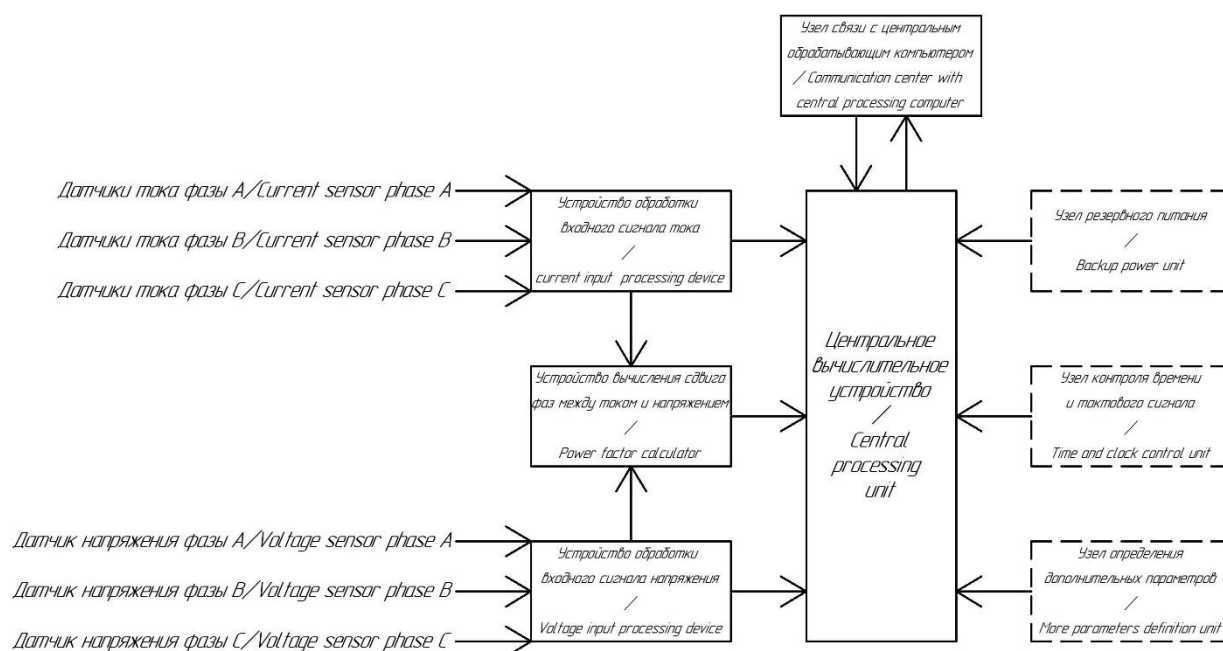


Рис. 1. Функциональная схема устройства для контроля параметров электрической энергии в сети в месте его установки

Узел определения сдвига фаз между током и напряжением представляет собой электронное устройство, которое принимает на вход сигналы тока и напряжения одноимённой фазы и вычисляет угол сдвига фаз между ними (результат получается в градусах), а затем передаёт в цифровом виде на центральное вычислительное устройство.

Помимо всего прочего, модульность устройства позволяет добавлять неограниченно число датчиков тока к устройству обработки входного сигнала тока, что может обеспечить в том числе контроль всего распределительного устройства при помощи одного устройства за счёт контроля датчиками тока как вводного, так и всех отходящих присоединений. Варианты подключения датчиков тока устройства

показаны на Рис. 2 [1], демонстрирующем схему подключения прибора к сети для контроля протекающего тока на вводе и на двух отходящих присоединениях (вариант 1). Так же на этом рисунке показан традиционный способ подключения прибора для контроля отходящего присоединения на конечного потребителя, установленного на границе балансовой принадлежности (вариант 2) и способ подключения прибора в точке ветвления, являющийся наиболее экономичным (вариант 3). Совершенно очевидно, что точки ветвления могут быть обвязаны сколько угодно большим числом датчиков тока, что дополнительно увеличит точность получаемых результатов и ляжет в основу создания «цифрового двойника» электрической сети.

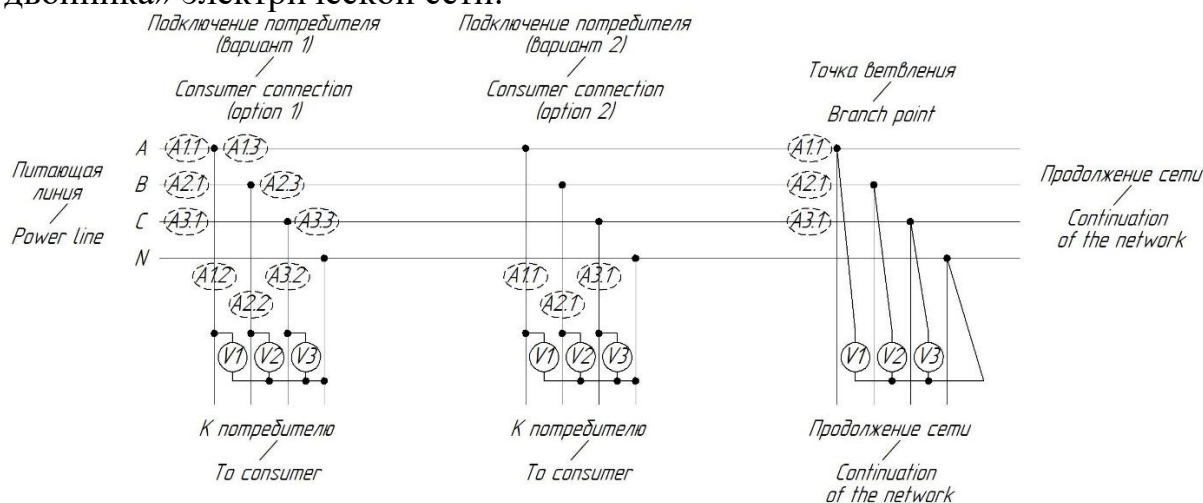


Рис. 2. Варианты подключения устройства для контроля параметров электрической энергии в сети в месте его установки

На Рис. 2 тонкой линией показаны проводники основной цепи рассматриваемой электрической сети, а основной линией показано подключение датчиков напряжения к сети. Штриховой линией, образующей эллипс, показаны датчики тока (например, A1.1), подразумевается, что точка, в которой выполняется измерение тока, находится в центре эллипса. Основной линией, образующей окружность, показаны датчики напряжения (например, V1), которые измеряют напряжение между каждой из фаз и нулевым проводником в точке подключения датчика (показана узлом).

Отсутствие необходимости в разрыве проводников основной цепи обеспечивается применением датчиков тока, имеющих разъёмный сердечник и устанавливаемых на провод в изоляции. Отсюда следует, что подключение данного устройства возможно в любом месте на воздушной линии и в месте разветвления кабельной линии, иными словами: в тех местах, где отдельные жилы кабеля разведены на достаточное расстояние между друг другом (например, в точках ветвления линий, выполненных самонесущим изолированным проводом).

Очевидно, что отличающимися узлами в зависимости от рассматриваемого типа сетей будут являться датчики тока ввиду различных принципов их работы в распределительных сетях различных классов напряжений, а также ввиду различных требований к изоляции устройств в сетях низкого и среднего напряжения. Датчики напряжения предполагают общую конструкцию для сетей низкого и среднего уровня напряжений за счёт того, что в сетях низкого напряжения будет выполнено непосредственное подключение датчиков напряжения к токоведущим частям, а в сетях среднего уровня напряжений датчик напряжения будет подключаться к имеющемуся оборудованию для измерения напряжения (например, трансформатор напряжения измерительный).

Вычисление всех косвенно измеряемых величин производится центральным вычислительным устройством в автоматическом режиме с сохранением архивных значений за определённый период.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Устройство для контроля параметров электрической энергии в сети в месте его установки, позволяющее создать систему, состоящую из ряда измерительных устройств и центрального обрабатывающего компьютера, способную производить мониторинг параметров электрической энергии в распределительной сети любого типа в реальном времени с возможностью сбора статистической информации может быть применено в следующих областях:

- сельские и городские распределительные электрические сети низкого напряжения переменного тока (в том числе и внутренние сети предприятий);
- сельские и городские распределительные электрические сети среднего напряжения переменного тока (в том числе и внутренние сети предприятий);
- внутриплощадочные сети постоянного тока промышленных предприятий.

В каждой из указанных областей применение разработанного устройства при условии создания информационно-измерительной системы позволит производить анализ параметров электрической энергии в сети: определять величину потерь электрической энергии (как коммерческих, так и технических); определять наиболее проблемные участки по потерям электрической энергии с указанием мест возникновения технических потерь электрической энергии и мест неучтённого потребления электрической энергии; собирать и сохранять статистику для отслеживания динамики изменения величины потерь; при внешних воздействиях на систему (ввод новой информации о технологических

нарушениях, о выходе из строя оборудования) осуществлять, используя данные об актуальном уровне технических потерь в сети, удалённую диагностику электрической сети на предмет наличия развивающихся дефектов, способных привести к возникновению технологического нарушения, что, в свою очередь, позволит своевременно реагировать на возникающие отклонения в параметрах электрической энергии и приведёт к повышению надёжности электрической сети, что особенно актуально для сельских и городских распределительных электрических сетей низкого и среднего уровня напряжений переменного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Цифровизация электроэнергетики на сегодняшний день является наиболее приоритетной задачей развития электросетевого комплекса в целом. Основной задачей цифровизации является перевод электроэнергетических систем (и в особенности электрических сетей) в цифровой вид (цифровое представление), где каждый элемент будет представлен определенным набором информации. Создание подобного рода баз данных предполагает наличие множества устройств для сбора и передачи информации о параметрах электрической энергии в точках их установки [14, 15, 16].

Помимо всего прочего, представляется перспективным использование данных, собираемых устройствами, для накопления статистической информации о работе сети в различных режимах и при различных условиях, как внутренних, как и внешних. В таком случае станет возможным отследить и установить зависимости в том числе и уровня потерь электрической энергии (как технических, так и коммерческих) от таких факторов, как температура и влажность окружающей среды, а также оценивать развитие величин тока утечки и потерь мощности в сети с течением времени эксплуатации отдельно взятой сети.

На основании вышеизложенного можно заключить, что в перспективе использование устройств сбора и передачи информации о параметрах электрической энергии в рамках системы цифрового представления сети позволит производить не только анализ текущего состояния, но и, на основании собранных статистических данных, осуществлять прогнозирование развивающихся несоответствий в сети, что, в свою очередь, позволит предупреждать возникновение и развитие различных технологических нарушений в сети. Наличие возможности получения прогнозов дальнейших изменений в электрической сети на основании известной информации о предыдущих периодах эксплуатации может лечь в основу создания умных электрических сетей, в которых опыт

эксплуатации аналогичных сетей по всему миру позволит получать рекомендации о наилучших решениях на всех этапах жизненного цикла электрических сетей: от проектирования до капитального ремонта и/или реконструкции.

Разработанное в рамках данного исследования устройство отвечает всем требованиям, указанным при постановке задачи и может быть использовано в практической деятельности электросетевых компаний и промышленных предприятий. Основная сфера применения – анализ состояния сетей и оценка эффективности их работы. Также необходимо отметить, что данное устройство может быть в перспективе использовано в рамках всех вышеупомянутых направлений.

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. Дзядикевич Ю.В., Гевко Б.Г., Никеруй С.В. Пути экономии электроэнергии общего пользования в сфере ЖКХ // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 6. – С. 21–24. [Dzyadikovich YuV, Gevko BG, Nikeruy YuS. Puti ekonomii elektroenergii obshchego pol'zovaniya v sfere ZHKKH. *Energoberezhniye. Energetika. Energoaudit.* 2011;6:21-24. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22006460>. Ссылка активна на: 17.05.2021.
2. Хацевский К.В., Денчик Ю.М., Клеутин В.И., и др. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения // Омский научный вестник. – 2012. – № 2. – С. 212–215. [Khatsevskiy KV, Denchik YuM, Kleutin VI, et al. Problemy kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya. *Omskiy nauchnyy vestnik.* 2012;2:212-215. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17879229>. Ссылка активна на: 17.05.2021.
3. Иванов А.Г., Соколова В.Н. Финансовые потери потребителей в связи с низким качеством электроэнергии // Science Time. – 2014. – № 11.– С. 113–115. [Ivanov AG, Sokolova VN. Finansovyye poteri potrebiteley v svyazi s nizkim kachestvom elektroenergii. *Science Time.* 2014;11:113-115. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22672845>. Ссылка активна на: 17.05.2021.
4. Rossoni A, Braunstein SH, Trevizan RD, et al. Contribution to distribution systems technical and nontechnical losses estimation using WLS state estimator. Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2018:1-5. doi: 10.1109/pesgm.2017.8273804
5. Chatterjee S, Archana V, Suresh K, et al. Detection of non-technical losses using advanced metering infrastructure and deep recurrent neural networks. Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe. 2017. doi: 10.1109/IEEEIC.2017.7977665
6. Ahmad T. Non-technical loss analysis and prevention using smart meters. *Renewable*

- and Sustainable Energy Reviews*. 2017;72:573-589. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.100
7. Trevizan RD, Rossoni A, Bretas AS, et al. Non-technical losses identification using Optimum-Path Forest and state estimation. *Proceedings of the IEEE Eindhoven PowerTech*, PowerTech. 2015. DOI: 10.1109/ptc.2015.7232685
 8. Тиньгаев А.В., Шевченко А.А. Оптимизация протяжённости линий электропередач при подключении сельскохозяйственных потребителей с использованием WEB-технологий // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 4. – С. 186–191. [Tin'gayev AV, Shevchenko AA. Optimizatsiya protyazhonosti liniy elektroperedach pri podklyuchenii sel'skokhozyaystvennykh potrebiteley s ispol'zovaniyem WEB-tekhnologiy. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018;4:186-191. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34900729>. Ссылка активна на: 17.05.2021.
 9. Henriques HO, Correa MRLS. Use of smart grids to monitor technical losses to improve non-technical losses estimation. *Proceedings of the 7th Brazilian Electrical Systems Symposium*. 2018:1-6. doi: 10.1109/sbse.2018.8395924
 10. Kazymov I, Kompaneets B. Definition of fact and place of losses in low voltage electric networks. *Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications And Manufacturing, ICIEAM 2019 – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc*. 2019. doi: 10.1109/icieam.2019.8743075
 11. РД 34.20.178-82. Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38-110 кВ сельскохозяйственного назначения, 1982. – 108 с. [RD 34.20.178-82. Metodicheskkiye ukazaniya po raschetu elektricheskikh nagruzok v setyakh 0,38-110 kV sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya. 1982. 108 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.normacs.ru/Doclist/doc/15CO.html>. Ссылка активна на: 17.05.2021.
 12. Цыгулев Н.И., Хлебников В.К., Шелест В.А., и др. Цифровизация электрических сетей АПК на платформе интернета энергии / Материалы национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники». – 2019. – С. 327–328. [Tsygulev NI, Khlebnikov VK, Shelest VA, et al. Tsifrovizatsiya elektricheskikh setey APK na platforme interneta energii. *Proceedings of the national scientific and practical conference "Actual Problems of Science and Technology"*. 2019:327-328. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 17.05.2021. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39451039>.
 13. Белый В.Б. Модель процессов потребления электроэнергии коммунально-бытовым сектором в сельских электрических сетях / Материалы XVII международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век». – 2019. – С. 42–45. [Belyy VB. Model' protsessov potrebleniya elektroenergii kommunal'no-bytovym sektorom v sel'skikh elektricheskikh setyakh. *Proceedings of the national scientific and practical conference "Energo- i resursosberezheniye – XXI vek"*. 2019:42-45. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42256826>. Ссылка активна на: 17.05.2021.
 14. Распоряжение Правительства Российской Федерации №511-п от 3 апреля 2013 г. в редакции №1399-п от 18 июля 2015 г. «Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации». [Order of the Government of the Russian Federation №511-p of 3 April 2013 as amended №1399-p of 18 July 2015 "Ob utverzhdenii Strategii razvitiya elektrossetevogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii" (In Russ.)]. Доступно по: <http://government.ru/docs/1220>. Ссылка активна на: 17.05.2021.
 15. Указ Президента Российской Федерации №204 от 7 мая 2018 г. «О национальных

целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». [Decree of the President of the Russian Federation №204 of 7 May 2018. “O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda” (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027>. Ссылка активна на: 17.05.2021.

16. Концепция ПАО «Россети» «Цифровая трансформация 2030», 2018. – 31 с. [The concept of PJSC Rosseti “Tsifrovaya transformatsiya 2030”. 2018. 31 p. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf. Ссылка активна на: 17.05.2021.

Сведения об авторах:

Казымов Иван Максимович, аспирант;

eLibrary SPIN: 8464-5810; ORCID: 0000-0001-6873-0315; Scopus ID: 57209794071;

E-mail: bahek1995@mail.ru

Компанец Борис Сергеевич, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 7371-4290; ORCID: 0000-0001-5980-1230; Scopus ID: 57209796863;

E-mail: kompbs@mail.ru

Дробязко Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 4902-6649; ORCID: 0000-0001-6826-561X; Scopus ID: 57207346047;

E-mail: drolnik@list.ru

Information about the authors:

Ivan M. Kazymov, postgraduate;

eLibrary SPIN: 8464-5810; ORCID: 0000-0001-6873-0315; Scopus ID: 57209794071;

E-mail: bahek1995@mail.ru

Boris S. Kompaneets, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 7371-4290; ORCID: 0000-0001-5980-1230; Scopus ID: 57209796863;

E-mail: kompbs@mail.ru

Oleg N. Drobyazko, Doctor of Technology

eLibrary SPIN: 4902-6649; ORCID: 0000-0001-6826-561X; Scopus ID: 57207346047

E-mail: drolnik@list.ru

Цитировать:

Казымов И.М., Компанец Б.С., Дробязко О.Н. Разработка устройства для контроля параметров электрической энергии в распределительной сети // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 106–119. doi: 10.17816/transsyst202173106-119

To cite this article:

Kazymov IM, Kompaneets BS, Drobyazko ON. Development of a device for control of electric energy parameters in the distribution network. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):106-119. doi: 10.17816/transsyst202173106-119

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 656.34

DOI 10.17816/transsyst202073120-130

© Е. Ю. Сундуков¹, Б. М. Шифрин², В. Е. Сундукова¹

¹Сыктывкарский лесной институт – филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова (Сыктывкар, Россия)

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова (Санкт-Петербург, Россия)

ПОСТРОЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Обоснование: Предлагается задавать бегущее магнитное поле в специальном управляющем канале (балке, трубе), сопряженном с несколькими управляемыми каналами – малогабаритными маглев-системами, в которых осуществляется левитация транспортных модулей.

Цель: осуществить сопряжение управляющего канала с несколькими управляемыми каналами (до четырех). При этом управляющий канал будет располагаться в центре, а управляемые каналы сверху, справа, внизу, слева.

Методы: 3Д-моделирование, макетирование, пространственной композиции, патентный поиск.

Результаты: Бегущее магнитное поле в управляющем канале создается движущейся последовательностью взаимодействующих друг с другом источников магнитного поля – муверов, которые взаимодействуют с источниками магнитного поля транспортных модулей – попутчиками, левитирующими в управляемых каналах посредством источников постоянного магнитного поля.

Заключение: малогабаритные маглев-системы могут образовывать многоканальную транспортную систему.

Ключевые слова: магнитолевитационные транспортные системы, источники магнитного поля, управляющий канал, управляемый канал, мувер, ф-тревелер, транспортный модуль.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© Е. Yu. Sundukov¹, B. M. Shifrin², V. E. Sundukova¹

¹ Syktyvkar Forest Institute - a branch of St. Petersburg State Forestry University named S.M. Kirov (Syktyvkar, Russia)

² St. Petersburg State Forestry University named S.M. Kirov (St. Petersburg, Russia)

CONSTRUCTION OF MULTICHANNEL MAGNETOLEVITATION SYSTEMS

Background: It is proposed to set a traveling magnetic field in a special control channel (beam, pipe), coupled with several controlled channels - small-sized maglev systems in which levitation of transport modules is carried out.

Aim: to interface the control channel with several controlled channels (up to four) – small-sized maglev systems. In this case, the control channel will be located in the center, and the controlled channels at the top, right, bottom, left.

Methods: 3D-modeling, layout, spatial composition, patent search.

Results: The traveling magnetic field in the control channel is created by a moving sequence of interacting magnetic field sources – the movers, which interact too with magnetic field sources of transport modules – the fellow travelers, levitating in the controlled channels through sources of a constant magnetic field. The structure is installed on arched supports that uniformly distribute the load over the support surface. A model of a two-channel system with a lower location of a controlled channel has been developed.

Conclusion: The small-sized maglev systems can form a multi-channel transport system.

Key words: maglev transport systems, magnetic field sources, control channel, controlled channel, mover, traveler, transport module.

ВВЕДЕНИЕ

По виду оборудования путепроводов большинство реализованных транспортных систем на основе магнитной левитации (маглев) можно определить как одноканальные – все оборудование в одном коробе (трубе) или вокруг одной балки [1, 2]. Статорная обмотка путепровода подразделяется на ускоряющую обмотку и обмотку, обеспечивающую поднятие или подвешивание транспортных модулей. Транспортные модули перемещаются при создании бегущего магнитного поля в ускоряющей обмотке.

Предлагается задавать бегущее магнитное поле в специальном управляющем канале (балке, трубе), сопряженном с несколькими управляемыми каналами – малогабаритными транспортными системами.

ВМЕСТО ПОЕЗДА – МАЛОГАБАРИТНАЯ СИСТЕМА

В настоящее время проявляется тенденция рассматривать маглев-системы как разновидность железнодорожного транспорта, а именно магистральных высокоскоростных поездов [3]. Подвижной состав состоит из вагонов, имеющих довольно значительные габариты и стоимость. Соответственно, велика стоимость и путевой инфраструктуры.

Наибольший прогресс в развитии магистральных маглев-систем достигнут в Китайской Народной Республике [4].

В транспортных системах Hyperloop капсулы-челноки будут перемещаться внутри системы трубопроводов в среде низкого давления со скоростью порядка 1200 км/ч с использованием магнитной левитации [5]. Двухместная капсула ХР-2 прошла испытания на специальном полигоне 500 м [6]. Тем не менее, существуют опасения, что эксплуатировать подобную систему небезопасно и слишком дорого [7].

В монографии [8] рассмотрены факторы, осложняющие развитие и содержание высокоскоростных магистралей на примере Транссибирской железнодорожной магистрали.

Действие некоторых из них можно уменьшить при использовании малогабаритных транспортных систем [9]. Также малогабаритные транспортные системы будут быстрее окупаться там, где нет больших грузовых и пассажиропотоков.

Вместе с тем каждая из предлагаемых систем имеет какое-либо рациональное зерно, побуждающее разработчиков к созданию нового вида транспорта.

События, связанные с распространением коронавирусной инфекции, привели к падению объемов производства во многих странах, соответственно, это сказалось и на развитии новых видов транспорта во всем мире. Отмечается рост скептицизма по проектам высокоскоростного транспорта в связи со значительными капитальными вложениями в строительство и долгими сроками окупаемости, ставятся под сомнение их реализуемость и экономическая эффективность. Некоторые исследователи считают [10], что именно проекты высокоскоростных магистралей могут способствовать восстановлению экономики, если цели их реализации будут поставлены в рамках национальных проектов, а также при успешной интеграции новых видов транспорта с другими видами транспорта в национальных транспортных системах.

Возможное взаимодействие магистральной и малогабаритных маглев-систем показано на Рис. 1. Магистральные пути подходят к узловому пересадочному пункту, от которого обеспечиваются сообщения-привязки к нескольким удаленным объектам.

Сообщения-привязки могут быть реализованы посредством малогабаритной транспортной системы с эстакадой арочного типа, показанной на Рис. 2. Источники магнитного поля эстакады и транспортного модуля размещены в двух сопряженных каналах (балках). В одном из каналов (верхний на Рис. 2) размещены источники магнитного поля муверы, имеющие кольцевую форму. Данный канал будет управляющим. Он представляет собой трубу, внутри которой созданы идеальные условия для движения муверов каким-либо из способов (среда низкого давления, движение в потоке жидкости [11] или др.).



В результате задания ускорения одному или нескольким муверам вся эта последовательность приходит в движение.

Транспортный модуль (ТМ) в системе на Рис. 1 состоит из кабины и нескольких источников магнитного поля также кольцевой формы, соединенных с кабиной, например, при помощи тяг. Магнитные источники ТМ размещены во втором канале (нижний на Рис. 1), который является управляемым. В случае применения соединительных тяг управляемый канал имеет вырез для их перемещения, а для левитации ТМ он оборудован источниками постоянного магнитного поля прямоугольной формы (магнитными рельсами).

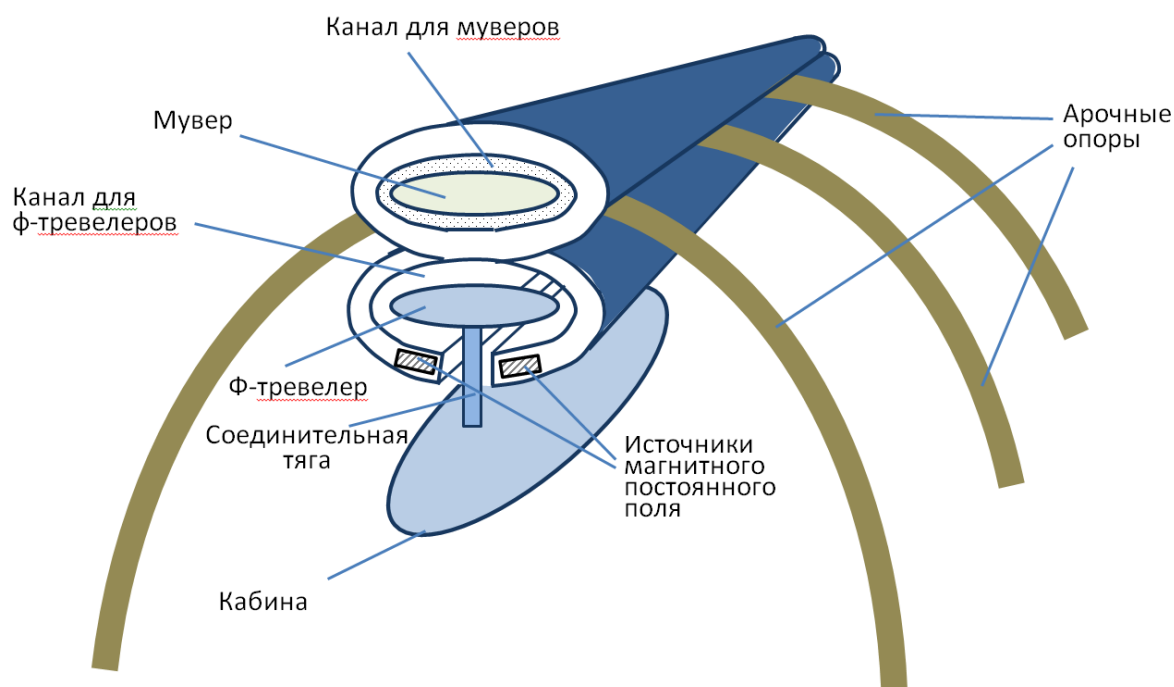


Рис. 2. Общий вид малогабаритной транспортной системы с эстакадой арочного типа

Некоторые из муверов взаимодействуют с источниками транспортного модуля. При приведении последовательности муверов в движение начинают двигаться и магнитные источники ТМ. Поэтому назовем их попутчиками (ф-тревелерами). Вместе с ф-тревелерами перемещается и сам ТМ.

Вся двухканальная конструкция устанавливается на арочных опорах, образуя эстакаду.

Как видно на Рис. 2, в отличие от системы по проекту Hyperloop, кабина выносится из канала (трубы), где создается среда низкого давления или другие мероприятия, обеспечивающие идеальные условия для движения муверов.

ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ С МЕХАНИЧЕСКИМ СОЕДИНЕНИЕМ КАБИНЫ И МУВЕРОВ

Преимущества предлагаемой транспортной системы.

Внутри короба муверам могут быть созданы идеальные условия для движения, что позволяет не использовать электрический ток большой величины.

Эстакадное исполнение позволяет обеспечить безопасное удаление кабины от активных магнитных источников, а также преодолевать труднодоступные участки местности.

Малогабаритная транспортная система быстрее окупится в случаях небольших пассажирских и грузовых потоков.

Особенности транспортной системы, ограничивающие её применение.

Макетные испытания выявили особенности данной транспортной системы, ограничивающие ее применение. А именно:

- 1) короб выполнен с вырезом, что ослабляет прочность конструкции;
- 2) использование более двух соединительных тяг для одной кабины затрудняет движение ТМ в местах закруглений;
- 3) соединительные тяги не обеспечивают бесконтактное перемещение ТМ, поскольку в некоторые моменты они будут касаться краев выреза короба;
- 4) для задания ускоряющего усилия муверам требуется установка элементов линейного электромагнитного двигателя на всем протяжении эстакады.

Возможное преодоление ограничивающих особенностей.

Следующим шагом в развитии таких транспортных систем может стать бесконтактное соединение муверов и кабины, которое обеспечивается при помощи эффекта «магнитной потенциальной ямы» [12].

ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА «МАГНИТНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЫ»

Эффект «Магнитной потенциальной ямы» при взаимодействии идеальнопроводящих кольцевых структур был открыт В.В. Козорезом [13]. Причем это взаимодействие проявляется как при расположении колец в параллельных плоскостях (Рис. 3а), так и при расположении этих колец в одной плоскости (Рис. 3б).

Размеры колец и расстояний между ними определяются из соотношений (1) и (2):

$$\Psi_1 \Psi_2 \neq 1; \quad (1)$$

$$a_1 R^{-1}, a_2 R^{-1} \leq \frac{1}{2} \quad (2)$$

где Ψ_1 и Ψ_2 – магнитные потоки;

a_1 – радиус меньшего кольца;

a_2 – радиус большего кольца;

R – расстояние между кольцами

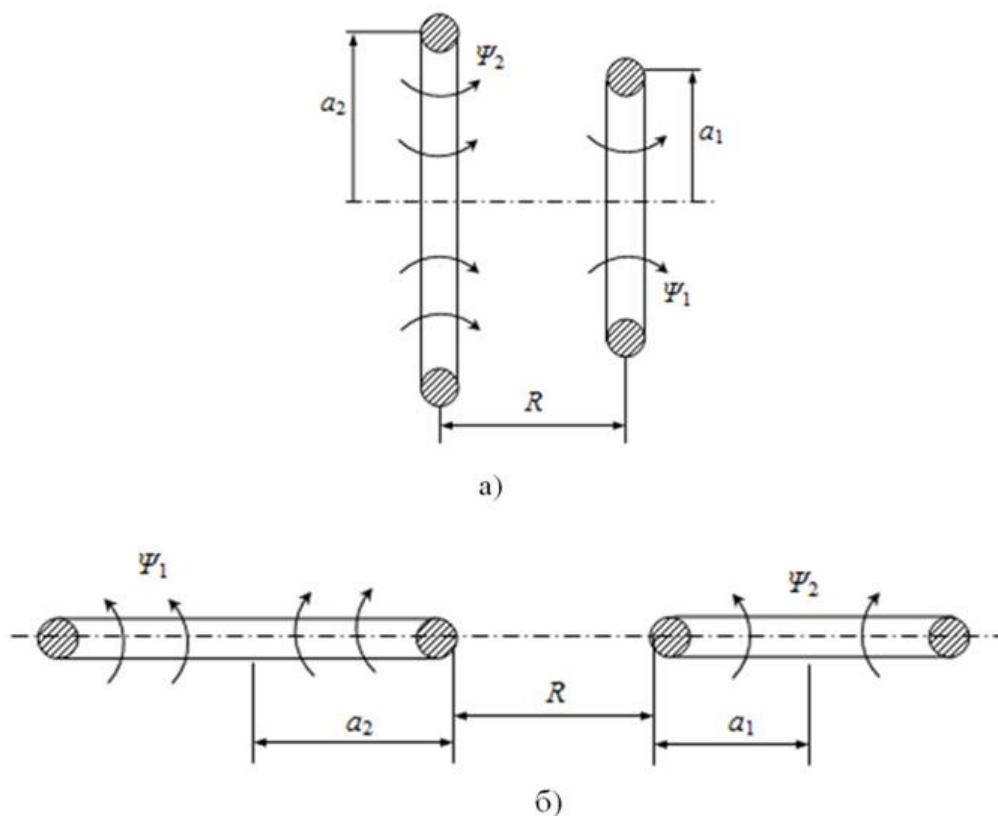


Рис. 3. Магнитная система двух идеально проводящих токовых колец и область устойчивых траекторий: а) в параллельных плоскостях; б) в одной плоскости

ТИП ДВИЖИТЕЛЯ: УЧИМСЯ У ЗВЕЗД И ПЛАНЕТ

Чтобы определиться с типом движителя, обратимся к движению во Вселенной [14]. Космические тела, обладая магнитными полями, движутся по эллиптическим орбитам [15] относительно более массивных тел как планеты относительно звезд, так и вращаясь относительно своих осей.

Этот принцип можно заложить в основу функционирования магнитолевитационных систем. Планетарная модель многоканальной маглев-системы показана на Рис. 4.

В центре системы расположен управляющий канал, внутри которого движутся муверы (звезды). Управляющий канал сопряжен с управляемыми каналами, число которых может достигать четырех в соответствии с числом сторон света: верхний (восток), правый (юг), нижний (запад), левый (восток). Совместно с муверами перемещаются попутчики (планеты), расположенные в управляемых каналах.

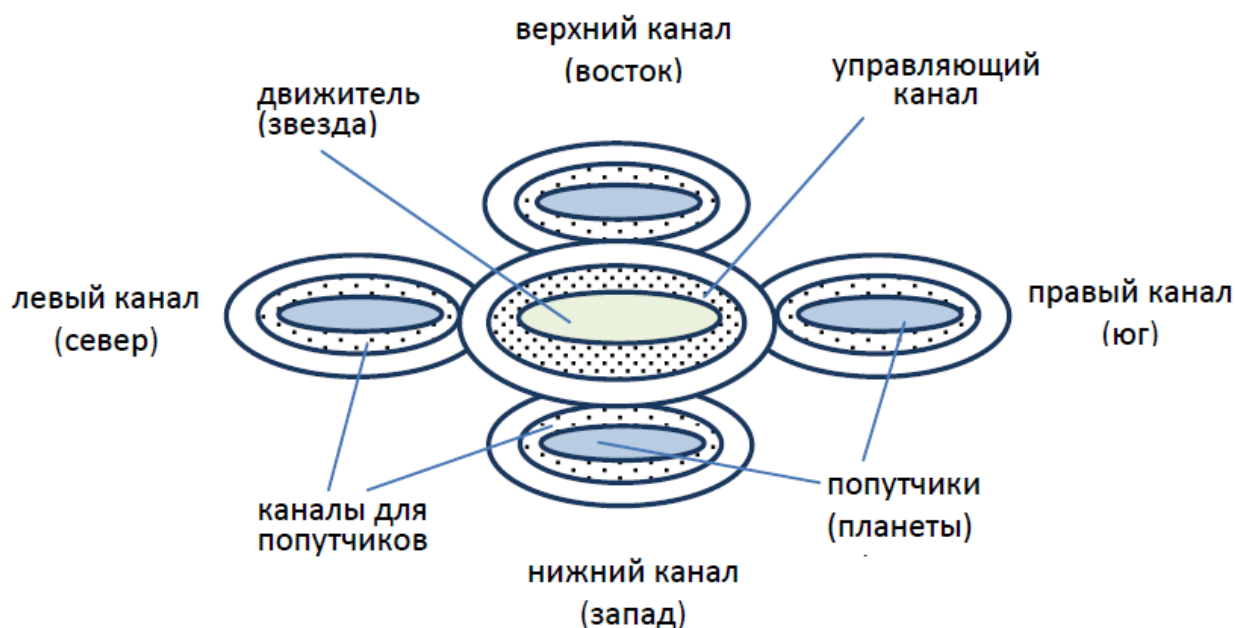


Рис. 4. Планетарная модель многоканальной маглев-системы

Транспортная система (Рис. 2) является частным случаем системы, изображенной на Рис. 4, а именно, двухканальной системой с нижним расположением управляемого канала. Внутренние стенки каналов в поперечном сечении повторяют форму муверов и попутчиков, имея некоторый зазор. Что должно способствовать свободному перемещению магнитных источников при предотвращении их переворачивания.

В простейшем случае управляющий канал имеет эллиптическую форму. Каждый из муверов взаимодействует с двумя соседними, при этом все муверы образуют замкнутую или сколь угодно длинную последовательность (Рис. 5). Последовательность муверов двигается под воздействием одного или нескольких источников вращательного движения. Управляющий канал сопряжен с одним или несколькими рабочими каналами. В рабочих каналах тревелеры, взаимодействуя с муверами управляющего канала, перемещаются линейно. Также перемещается и транспортный модуль, состав которого входят тревелеры перемещается линейно.

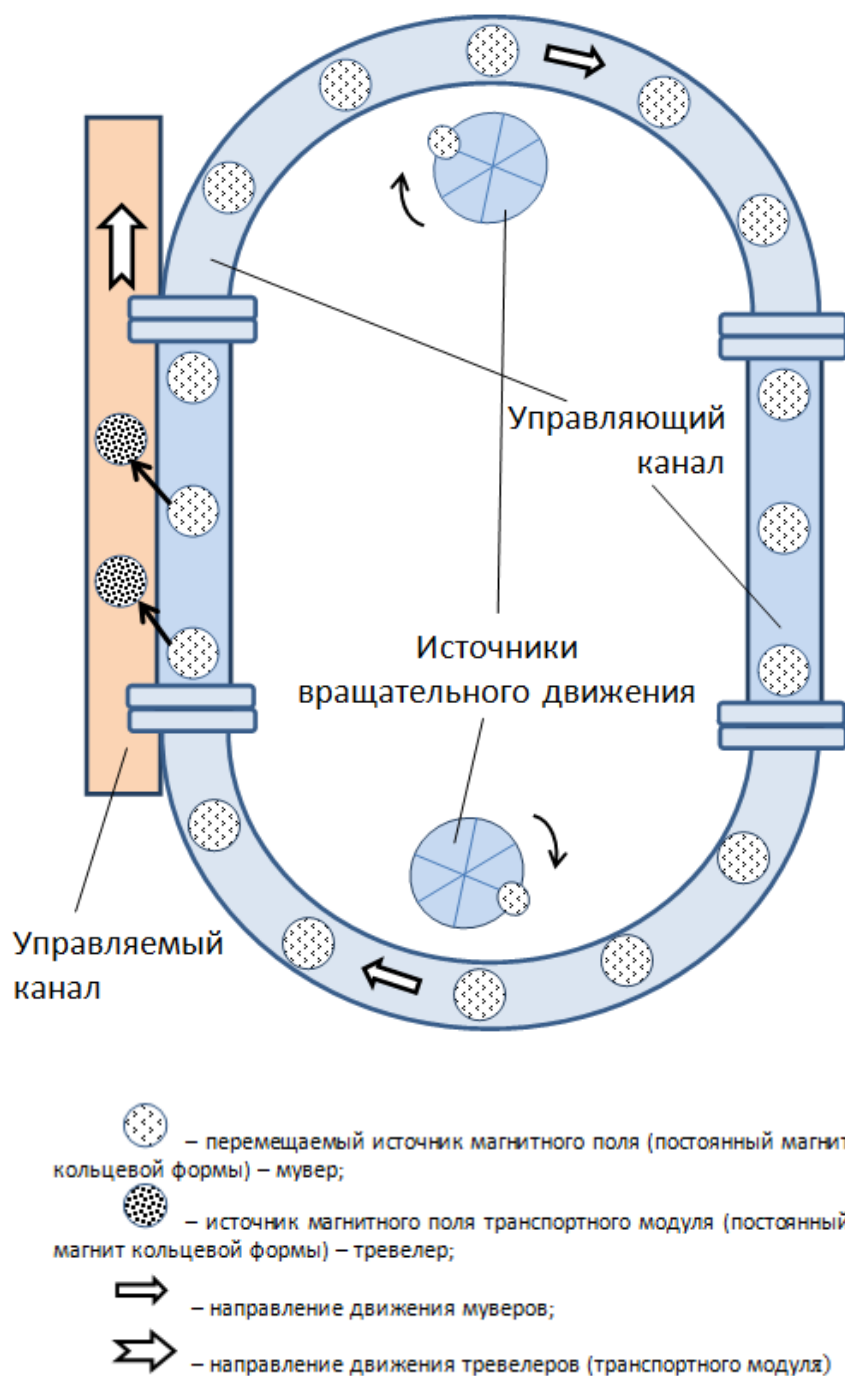


Рис. 5. Расположение управляющего канала в горизонтальной плоскости (вид сверху) и сопряжение его управляемым каналом, находящимся слева

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многоканальная транспортная система может быть образована при сопряжении нескольких малогабаритных маглев-систем с управляющим каналом, внутри которого осуществляется движение последовательности муверов.

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. Blow L, Fritz E, Kircher R, et al. Energy consumption of track-based high-speed trains: maglev systems in comparison with wheel-rail systems. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3 suppl. 1):134-155. doi: 10.17816/transsyst201843s1134-155
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. Ульянов Н. Магнит тянет в полет / Эксперт № 18-19. [Ylvanov N. Magnit tjanet v polet. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://expert.ekiosk.pro/890541>. Ссылка активна на 27.04.2021.
4. Lin G, Sheng X. Application and Further Development of Maglev Transportation in China. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3)36-43. doi: 10.17816/transsyst20184336-43
5. Куприяновский В.П., Климов А.А., Аленьков В.В. и др. Hyperloop – современное состояние и будущие задачи // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – № 7. – С. 129–144. [Kupriyanovskij VP, Klimov AA, Alen'kov VV et al. Hyperloop – current state and future challenges. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020;8(7):129-144. (In Russ.)].
6. Kleinman Z. Virgin Hyperloop pod transport tests first passenger journey. [cited 2020 November 9]. Available from: <https://www.bbc.com/news/technology-54838982>.
7. Голованов Г. Hyperloop сравним по опасности с открытым космосом. [Golovanov G. Hyperloop sravnim po opasnosti s otkryтым kosmosom. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://hightech.plus/2018/10/24/hyperloop-sravnim-po-opasnosti-s-otkritim-kosmosom>. Ссылка активна на 17.05.2021.
8. Цветков В.А., Зиядуллаев Н.С., Зоидов К.Х. и др. Транзитная экономика: теория, методология, практика: Монография / Под. науч. ред. В.А. Цветкова. – М.: Экономическое образование, 2019. – 494 с. [Cvetkov VA, Ziyadullaev NS, Zoidov KH, et al. *Tranzitnaya ekonomika: teoriya, metodologiya, praktika: Monografiya*. Cvetkov VA, editor. Moscow: Ekonomicheskoe obrazovanie; 2019. 494 p. (In Russ.)].
9. Sundukov EY, Selivanov LF, Sundukova VE. The maglev-systems on the basis of trestle of arch type. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):72-79. doi: 10.17816/transsyst20184372-79
10. Волкова Е.М. Факторы, определяющие успех реализации проектов строительства высокоскоростных магистралей // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т.6. – № 2. – С.5–19. [Volkova EM. Factors determining the success of HSR building projects. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(2):5-19. (In Russ.)]. doi:10.17816/transsyst2020625-19
11. Витков Г.А. Новый класс сил сопротивления в сплошных средах. – Тверь: ТГТУ, 1997. – 352 с. [Vitkov GA. *Novyj klass sil soprotivleniya v sploshnykh sredakh*. Tver': TGTU, 1997. (In Russ.)].
12. Михалевич В.С., Козорез В.В., Рашкован В.М. и др.; «Магнитная потенциальная

- яма» – эффект стабилизации сверхпроводящих динамических систем.– Киев: Наук. думка, 1991. – 335 с. [Mihalevich VS, Kozorez VV, Rashkovan VM, et al. “*Magnitnaya potencial'naya yama*” – *effekt stabilizacii sverhprovodyashchih dinamicheskikh sistem*. Kiev: Nauk. Dumka; 1991. 335 p. (In Russ.)].
13. Козорез В.В. Динамические системы магнитно-взаимодействующих свободных тел. – Киев: Наук. думка, 1981. – 140 с. [Kozorez VV. *Dinamicheskie sistemy magnitno-vzaimodejstvuyushhikh svobodnykh tel*. Kiev: Nauk. dumka; 1981. 140 p. (In Russ.)].
14. Giordano Bruno. On the Infinite Universe and Worlds (1584). [cited 2021 May 17]. Available from: https://www.faculty.umb.edu/gary_zabel/Courses/Parallel%20Universes/Texts/On%20the%20Infinite%20Universe%20and%20Worlds.htm.
15. Смородинский Я.А. Планеты движутся по эллипсам // Квант. – 1979. – № 12. – С. 13–19. [Smorodinskij YaA. Planety dvizhutsya po ellipsam. *Kvant*. 1979;12:13-19. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Сундуков Евгений Юрьевич, кандидат экономических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 8735-7995; ORCID: 0000-0003-0141-8292;

E-mail: jek-sun@mail.ru

Шифрин Борис Маркович, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 5125-4307; ORCID: 0000-0001-5377-741X;

E-mail: shifrinb@mail.ru

Сундукова Вероника Евгеньевна, студент;

eLibrary SPIN: 4136-6297; ORCID: 0000-0002-9367-5693;

E-mail: v.sundukova@yandex.ru

Information about the authors:

Evgeny Sundukov, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 8735-7995; ORCID: 0000-0003-0141-8292;

E-mail: jek-sun@mail.ru

Boris Shifrin, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 5125-4307; ORCID: 0000-0001-5377-741X;

E-mail: shifrinb@mail.ru

Veronika Sundukova, student;

eLibrary SPIN: 4136-6297; ORCID: 0000-0002-9367-5693;

E-mail: v.sundukova@yandex.ru

Цитировать:

Сундуков Е.Ю., Шифрин Б.М., Сундукова В.Е. Многоканальные магнитолевитационные транспортные системы // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 120–130. doi: 10.17816/transsyst202173120-130

To cite this article:

Sundukov EYu, Shifrin BM, Sundukova VE. The multichannel maglev transport systems. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):120-130. doi: 10.17816/transsyst202173120-130

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

UDC 621.311.2

DOI 10.17816/transsyst202173131-149

© A. N. J. Almakki¹, A. A. Mazalov^{1,2}¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev
(Kazan, Russia)² South Federal University
(Rostov-On-Don, Russia)**IMPROVED DFIG DFTC BY USING A FRACTIONAL-ORDER SUPER TWISTING ALGORITHMS IN WIND POWER APPLICATION**

Background: The direct flux and torque control are a robust, simple, and alternative approach control formulation that does not require decomposition into symmetrical components; the direct flux and torque control schemes have been proved to be preponderant for doubly-fed induction generators due to the simple implementation.

Aim: This work presents the minimization of electromagnetic torque and rotor flux undulations of doubly-fed induction generators using fractional-order super twisting algorithms and modified space vector modulation techniques.

Methods: The main role of direct flux and torque control is to regulate and control the electromagnetic torque and rotor flux of doubly-fed induction generators for wind turbine systems. The direct flux and torque control is a traditional control algorithm and robust technique. Fractional-order super twisting algorithms are a new and proposed nonlinear controller; characterized by a robust controller and a simpler algorithm, which gives a good harmonic distortion of current compared to other methods.

Novelty: The A fractional-order super twisting algorithm is proposed. Proposed nonlinear controller construction is based on the traditional super twisting algorithm and fractional calculus to obtain a robust controller and reduces the electromagnetic torque and rotor flux undulations of doubly-fed induction generators. We use in our study a 1.5 MW doubly-fed induction generator integrated into a single-rotor wind turbine system to minimizes the electromagnetic torque, stator current, rotor flux undulations. As shown in the results figures using fractional-order super twisting algorithms ameliorate effectiveness especially minimizes the electromagnetic torque and rotor flux, and minimizes harmonic distortion of stator current (0.16 %) compared to the traditional control scheme.

Results: As shown in the results figures using fractional-order super twisting algorithms ameliorate effectiveness especially minimizes the electromagnetic torque and rotor flux, and minimizes harmonic distortion of stator current (0.16 %) compared to the traditional control scheme.

Conclusion: The direct flux and torque control are a robust, simple, and alternative approach control formulation that does not require decomposition into symmetrical components; the direct flux and torque control schemes have been proved to be preponderant for doubly-fed induction generators due to the simple implementation.

Keywords: Fractional order super twisting algorithms, direct flux and torque control, proportional-integral, doubly-fed induction generator, modified space vector modulation.

1. INTRODUCTION

Due to the increasing demand for electrical energy, and the inability to meet this demand by using traditional sources. It led scientists and researchers to search for other sources in order to generate electric power at the lowest cost, as well as to reduce carbon dioxide emissions. Among the resources and solutions discovered, we find wind energy. The latter is inexpensive, renewable, and does not pollute the atmosphere. Among the leading countries in this field are China, the United States of American, Germany, France, Denmark, and India. China is the country in the world that ranks first in the world in the production of electric energy from wind energy, accounting for 27.4 % of global production [1]. On the other hand, the generators most used in the field of electric power generation in the wind station are the asynchronous generator with a squirrel cage, the synchronous generator, asynchronous generator with a coiled rotor.

The doubly-fed induction generator (DFIG) is the most widely used and famous in the field of electric power generation, due to its characteristics compared to some generators. Among its characteristics, we find: ease to control, durability, and reduce the cost of producing electrical energy. There are several ways to control this generator, among them we find: backstepping control [2], synergetic control [3], direct flux and torque control [4], sliding mode control [5], direct power control [6] and field-oriented control [7].

Direct flux and torque control (DFTC) appeared in the mid-1980s as a method of controlling electrical machines aimed at controlling torque directly without using pulse width modulation [8]. The main objective of this method is to directly control the torque without using an internal loop, as well as to reduce the financial cost. This strategy is a simple algorithm, gives a good performance, fast dynamic response, and easy to apply compared to field-oriented control. In the traditional DFTC method, flux and electromagnetic torque can be directly controlled by using two hysteresis comparators and a switching table. In [9], the author applies the DFTC method to an asynchronous motor in order to improve performance and reduce ripples at both torque and flux levels. The synchronous motor was controlled using the DFTC method, where two hysteresis comparators were used to regulate the torque and flux of the synchronous motor [10]. The results showed the effectiveness of the proposed method. In [11], the author controlled the DFIG using the DFTC technique. The major drawback of DFTC, is the oscillations of the flux, the torque, and the harmonics of the currents generated by the DFIG, because of the variable switching frequencies. In [12], the DFTC method was proposed to control the flux and torque of the synchronous generator.

In recent years, several new methods have appeared in the field of artificial intelligence, for example neural networks, genetic algorithms, and fuzzy logic. These methods are simple and easy to implement and do not require a specialist. These methods provide very satisfactory results compared to the

traditional methods. Several scientific works have improved the performance and effectiveness of DFTC control of the DFIG using artificial intelligence. In [13], the authors proposed the use of a DFTC method with fuzzy logic controllers applied to the DFIG-based wind turbines. In [14], the DFTC method based on neural networks has been proposed. The results showed the effectiveness of the proposed method. In [15], a modified DFTC method was proposed based on a genetic algorithm with a constant switching frequency, where a PI controller was calculated using a genetic algorithm. Fuzzy logic and neural networks are combined to improve the DFTC performance of DFIG-based wind turbines [16].

Similar to artificial intelligence, there are other methods to improve the performance and effectiveness of the DFTC technique under the name of nonlinear methods, and the results have shown their effectiveness in improving the performance and quality of results, especially in the case of changing machine parameters. Among the most popular nonlinear methods are sliding mode control, super twisting algorithm, synergetic control, fractional-order control, second-order sliding mode, second-order continuous sliding mode and backstepping control. In [17], an electromagnetic torque and rotor flux second-order continuous sliding mode and space vector modulation (SVM) strategy were combined to replace the switching table and hysteresis comparators. Simulation results showed the robustness and effectiveness of the proposed method compared to the classical method. In [18], the author has improved the performance of DFTC control using super twisting algorithms (STAs). In this proposed method, STA controllers are used in place of hysteresis comparators and SVM technique in place of traditional switching table. Despite the results obtained from this method, the problem of ripples remains. Among the other proposed solutions is the integration of artificial intelligence with nonlinear methods in order to obtain more robust and effective methods than the classical nonlinear methods, and this is shown by the results of the work carried out in [19-21].

In this article, we propose a new nonlinear method in order to improve the performance and efficiency of DFTC control of the DFIG-based wind turbines. This proposed nonlinear method is based on STA and fractional calculations. Fractional order STA controllers (FOSTA) are the extension of the classical STA method with fractional calculus for better effectiveness of the drive. The proposed FOSTA controller is simple structure, easy to adjust, more robust algorithm, easy to apply, and improves dynamic response. On the other hand, it provides very satisfactory results compared to the classical methods.

In this work, we proposed a DFTC control, based on the SVM technique with different types of controllers (PI and FOSTA controllers), simple and hybrid in order to improve the quality of electrical energy supplied by the wind power system based on a DFIG.

The objective of this work is to improve the performance of the DFTC control, applied to the DFIG integrated into the wind turbine system by the use of the control by FOSTA controllers.

A comparison between the numerical results obtained for the classical DFTC method with PI controllers and proposed DFTC validates the performances of the designed DFTC technique. Lower rotor flux and electromagnetic torque undulations and higher dynamic response are achieved by the designed DFTC technique. MATLAB software is used for numerical simulation.

2. DFIG MODEL

The DFIG is more famous in the field of electric power generation due to its characteristics. The mathematical form of this generator is based on the Park transformation. The latter is the most widely used in giving the sporty shape to electric machines. The following equations show the mathematical form of the DFIG [22]:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - \omega_r \Psi_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \omega_r \Psi_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} \\ V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} \end{cases} \quad (1)$$

The rotor and stator pulsations and rotor speed are interconnected by the following equation: $\omega_s = \omega_r + \omega$.

Where ω_r and ω_s are respectively the rotor and stator electrical pulsations, while ω is the mechanical one.

The rotor and stator flux can be written as follows:

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = M I_{ds} + L_r I_{dr} \\ \Psi_{qr} = M I_{qs} + L_r I_{qr} \\ \Psi_{ds} = M I_{dr} + L_s I_{ds} \\ \Psi_{qs} = M I_{qr} + L_s I_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

$(V_{dr}, V_{qr}, V_{ds}, V_{qs})$, $(\Psi_{dr}, \Psi_{qr}, \Psi_{ds}, \Psi_{qs})$, $(I_{dr}, I_{qr}, I_{ds}, I_{qs})$, are respectively the stator and rotor voltages, fluxes and currents, R_r and R_s are respectively the resistances of the stator and rotor windings, L_r , L_s , and M are respectively the inductance own rotor, stator, and the mutual inductance between two coils.

The mechanical equation of the DFIG is:

$$T_e = T_r + J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + F_r \cdot \Omega \quad (3)$$

The electromagnetic torque established by the DFIG can be written in terms of flux and currents by (4):

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{M}{L_s} n_p (-\psi_{ds} I_{qr} + \psi_{qs} I_{dr}) \quad (4)$$

Where J is the inertia, Ω is the mechanical rotor speed, T_r is the load torque, and F_r is the viscous friction coefficient.

The reactive and active powers of the stator side are defined as:

$$\begin{cases} Q_s = 1.5(-V_{ds} I_{qs} + V_{qs} I_{ds}) \\ P_s = 1.5(V_{qs} I_{qs} + V_{ds} I_{ds}) \end{cases} \quad (5)$$

In order to develop a decoupled control of the reactive and active powers, we use a Park reference frame linked to the stator flux. By supposing that the d-axis oriented along the stator flux position and basing on equation (6) with neglecting R_s we can write [23]:

$$\psi_{qs} = 0 \quad \text{and} \quad \psi_s = \psi_{ds} \quad (6)$$

$$\begin{cases} V_{qs} = \psi_s \omega_s \\ V_{ds} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} I_{qs} = -I_{qr} \frac{M}{L_s} \\ I_{ds} = \frac{\psi_s}{L_s} - I_{dr} \frac{M}{L_s} \end{cases} \quad (8)$$

Equation (8) can be written as:

$$\begin{cases} Q_s = -\frac{3}{2} \left(-\frac{\omega_s \psi_s^2}{L_s} + \frac{\omega_s \psi_s M}{L_s} I_{dr} \right) \\ P_s = (-1.5) I_{qr} \frac{\omega_s \psi_s M}{L_s} \end{cases} \quad (9)$$

Thus, the torque equation can be written as follows:

$$T_e = -1.5 \frac{M}{L_s} n_p I_{qr} \psi_{ds} \quad (10)$$

3. FRACTIONAL ORDER SUPER TWISTING ALGORITHMS

Super twisting algorithms it is a type of nonlinear control. This type of controller is characterized by simplicity, durability and can be used in linear or non-linear systems. This type reduces the chattering phenomenon compared to the traditional sliding mode controller [24]. The STA controller has two parts. the first u_1 is defined by its derivative with respect to time, while the second u_2 is

continuous and depends on the slip variable. The STA controller is one of the most widely used second-order sliding mode algorithms. This algorithm only applies to systems of relative degree 1. Its interest lies in the reduction of chattering, due to the continuity of the control signal. This control breaks down into an algebraic term and an integral term. we can therefore consider this algorithm as a nonlinear generalizer of a PI regulator.

Equation (11) represents STA controller [24].

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad (11)$$

With:

$$u_1(t) = \lambda_1 \sqrt{|S|} \cdot \text{sign}(S) \quad (12)$$

$$u_2(t) = \lambda_2 \int \text{sign}(S) \cdot dt \quad (13)$$

The fractional calculus technique (FCT) is a generalization of the integration and ordinary differentiation to arbitrary non-integer order. Fractional calculus is an old mathematical method, but it provides very satisfactory results when used, and this is what we have noticed from the work done in this field. The idea of FCT has been a subject of interest not only among physicists but also among engineers and mathematicians. The FCTs are widely used in viscoelasticity, rheology, electromagnetism, electrochemistry, etc. [25]. In [26], fractional- order PI controllers were proposed to control the DFIG-based wind power. The results showed the effectiveness of the proposed method. A novel robust fractional-order sliding mode (FOSM) controller for maximum power point tracking control of DFIG-based wind energy conversion system [27]. In [28], a new method is proposed to control the active and reactive powers of DFIG using fractional-order sliding mode control (FOSMC) strategy. In [29], field-oriented control was proposed based on the fractional-order PI controllers to control the active and reactive power of DFIG.

In this section, a new controller has proposed: the Fractional Order Super Twisting Algorithm (FOSTA). We used the fractional calculus method to improve the performance and efficiency of the STA controller. The proposed FOSTA controller is a simple algorithm, more robust, and easy to adjust. Equation (14) represents the principle of the proposed FOSTA method.

$$w(t) = (\lambda_1 \sqrt{|S|} \cdot \text{sign}(S) + \lambda_2 \int \text{sign}(S) \cdot dt)^\alpha \quad (14)$$

where α is an adjustable parameter by which the performance and durability of the entire system can be greatly improved. If it is 1, then a proposed FOSTA method becomes a classical STA controller.

This proposed FOSTA method will be used in this paper in order to improve the performance of the DFEC method and reduce both electromagnetic torque and rotor flux ripples of DFIG-based wind turbines.

4. DFTC METHOD WITH PI CONTROLLERS

The classical DFTC technique is a famous technique in the AC machine control field. The main advantages of the classical DFTC technique are its simple algorithm, robust method, and its simple implementation. However, this method has some disadvantages, for example high torque and flux ripples. This strategy gives more harmonic distortion (THD) of current [30]. In [31], the author proposed the use of a DFIG with PI controllers (DFTC-PI) applied to DFIG-based wind power. In this DFTC-SVM or DFTC-PI control strategy, electromagnetic torque and rotor flux are regulated by two traditional PI regulators, while the SVM technique replaces the switching table. The DFTC-PI objective is to regulate the rotor flux and the electromagnetic torque of the DFIG-based wind turbine. The electromagnetic torque is regulated by means of the quadrature axis rotor voltage V_{qr} , while the rotor flux is regulated by means of the direct axis rotor voltage V_{dr} . The DFTC-PI technique, which is proposed to regulate electromagnetic torque and rotor flux of the DFIG-based wind turbine, is shown in Fig. 1. Through Fig. 1, we note that this method is very simple and the electromagnetic torque and rotor flux estimation block keep the same shape as that established for the classic DFTC technique.

This control by DPC-SVM, has the advantages of vector control and conventional DFTC technique to overcome the problem of fluctuations in torque and flux generated by DFIG. PI regulators and SVM techniques are used to achieve a fixed switching frequency and less electromagnetic torque and rotor flux pulses.

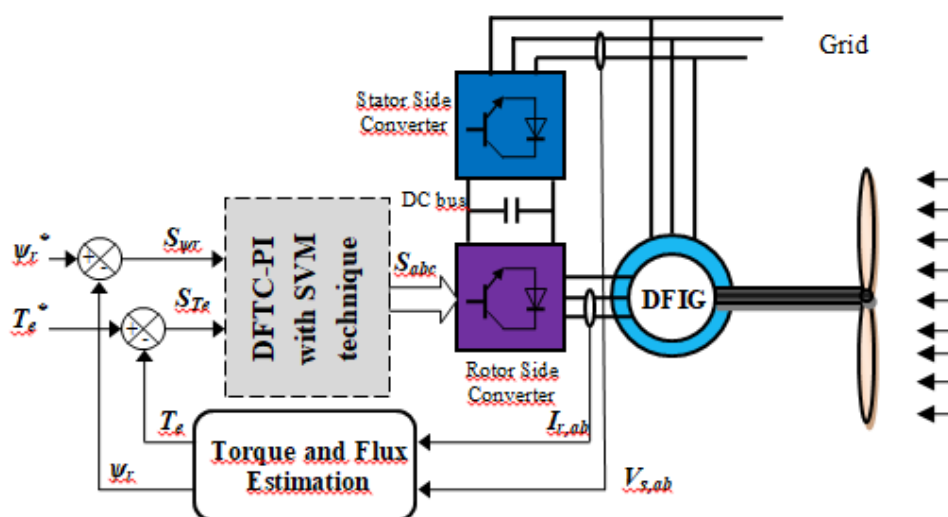


Fig. 1. Block diagram of the DFIG with DFTC-PI.

The phase and amplitude of the rotor flux are estimated by the relation equations (15) to (16):

$$\begin{cases} \Psi_{r\beta} = \int_0^t (-R_r i_{r\beta} + V_{r\beta}) dt \\ \Psi_{r\alpha} = \int_0^t (-R_r i_{r\alpha} + V_{r\alpha}) dt \end{cases} \quad (15)$$

The magnitude and phase of rotor flux are described as follows:

$$\Psi_r = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2} \quad (16)$$

$$\theta_r = \arctg\left(\frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{r\alpha}}\right) \quad (17)$$

With:

$$\left|\overline{\Psi_s}\right| = \frac{\left|\overline{V_s}\right|}{w_s} \quad (18)$$

Consequently, the estimation of the rotor flux is based on the parameter of the rotor resistance.

The electromagnetic torque can be estimated from the measurement of the rotor current and the estimation of the stator flux.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{M}{L_s} n_p (-\Psi_{ds} I_{qr} + \Psi_{qs} I_{dr}) \quad (19)$$

On another side, the stator flux can be estimated from the measurement of the stator current and the stator voltage. Equation (20) shows the method of calculating the stator flux.

$$\begin{cases} \Psi_{s\beta} = \int_0^t (-R_s i_{s\beta} + V_{s\beta}) dt \\ \Psi_{s\alpha} = \int_0^t (-R_s i_{s\alpha} + V_{s\alpha}) dt \end{cases} \quad (20)$$

Equations (21) and (22) represent, magnitude and phase of stator flux respectively.

$$\Psi_s = \sqrt{\Psi_{s\alpha}^2 + \Psi_{s\beta}^2} \quad (21)$$

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\Psi_{s\beta}}{\Psi_{s\alpha}}\right) \quad (22)$$

Due to the results obtained from this method compared to the classical DFTC method, but the problem of ripple remains at the level of electromagnetic

torque and rotor flux. In the next section, we will try to propose a new DFTC method in order to reduce the electromagnetic torque and rotor flux ripples, as well as reduce the THD value of the stator current of DFIG.

5. DFTC METHOD WITH FOSTA CONTROLLERS

In order to improve the performance of the classic DFTC and DFTC-SVM techniques, the standard hysteresis comparators will be replaced by two FOSTA regulators and the switching table by the modified vector modulation technique (MSVM). The rotor flux and electromagnetic torque estimation block keep the same shape as that established for the conventional DFTC method. In this DFTC-FOSTA control strategy, the electromagnetic torque and the rotor flux are regulated by two FOSTA regulators. This proposed strategy is a more robust method, simple algorithm, easy to apply, and uncomplicated method compared to field-oriented control. The DFTC-FOSTA method, which is proposed to regulate electromagnetic torque and rotor flux of the DFIG-based wind turbine, is shown in Fig. 2. The DFTC-FOSTA objective is to regulate the rotor flux and the electromagnetic torque of the DFIG-based wind turbine. The electromagnetic torque is regulated by means of the quadrature axis rotor voltage V_{qr} , while the rotor flux is regulated by means of the direct axis rotor voltage V_{dr} . On the other hand, the DFTC control with proposed controllers minimized the electromagnetic ripple, current ripple, rotor ripple and THD value of current/voltage compared to classical DFTC and field-oriented control techniques.

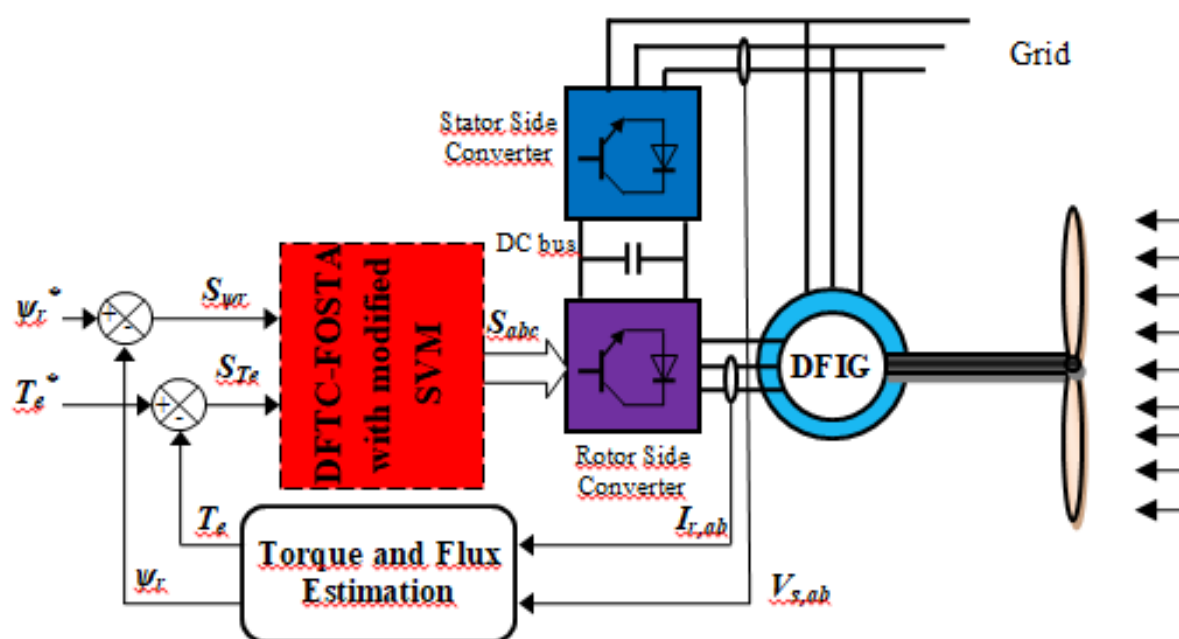


Fig. 2. Block diagram of the DFIG with DFTC-FOSTA.

Electromagnetic torque and rotor flux FOSTA controllers are used to influence respectively the two rotor voltage components as in (23) and (24).

$$V_{qr}^* = (k_1 \sqrt{|S_{Te}|} \cdot \text{sign}(S_{Te}) + k_2 \int \text{sign}(S_{Te}) \cdot dt)^\alpha \quad (23)$$

$$V_{dr}^* = (k_3 \sqrt{|S_{\psi_r}|} \cdot \text{sign}(S_{\psi_r}) + k_4 \int \text{sign}(S_{\psi_r}) \cdot dt)^\alpha \quad (24)$$

Where the sliding mode variables are the rotor flux magnitude error $S_{\psi_r} = \psi_r^* - \psi_r$ and the electromagnetic torque error $S_{Te} = T_e^* - T_e$, and the control gains K_3 , K_4 , K_1 and K_2 should check the stability conditions.

The SVM technique is real-time modulation. it uses the fact that a vector can represent the three voltages of a three-phase zero-sum system. This modulation is used by modern controls of alternating current machines, the reference voltages are the desired voltages at the output of the inverter. The advantage of this technique is reducing the harmonic distortion compared to pulse width modulation (PWM). But this method is complicated, especially in the case of multilevel inverter and the cost becomes very high in this case. In [32], the author proposes a new SVM structure based on the calcule of minimum and maximum of three-phase voltages. This proposed SVM strategy is simple and easy to implement compared to the classical SVM technique [33]. The block diagram of the modified SVM technique is shown in Fig. 3.

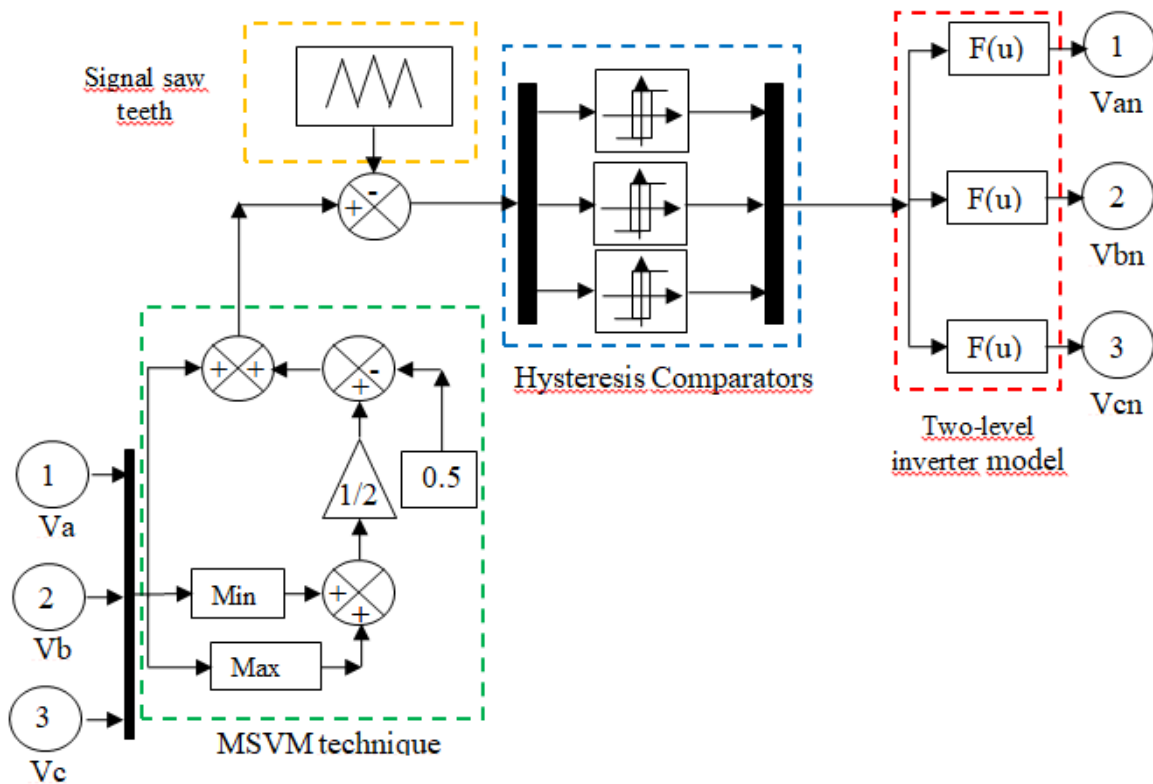


Fig. 3. Block diagram of the modified SVM technique

6. NUMERICAL SIMULATION

In this section, numerical simulations are carried out with a 1.5 MW DFIG attached to a 398 V/50 Hz grid, by using the MATLAB software. The two DFTC methods; DFTC-PI and DFTC-FOSTA technique are simulated and compared in terms of robustness against machine parameter variations, stator current harmonics distortion, and reference tracking.

The DFIG used in our work has the following parameters [32, 33]:

$$P_n = 1.5 \text{ MW}$$

$$p = 2$$

$$R_s = 0.012 \, \Omega, 50 \text{ Hz}, 380/696 \text{ V}$$

$$R_r = 0.021 \, \Omega$$

$$L_s = 0.0137 \text{ H}$$

$$J = 1000 \text{ kg}\times\text{m}^2$$

$$f_r = 0.0024 \text{ Nm/s}$$

$$L_r = 0.0136 \text{ H}$$

$$L_m = 0.0135 \text{ H}$$

6.1 Reference tracking test

In this case, the effectiveness and performance of the DFTC-FOSTA and DFTC-PI control are tested under reference electromagnetic torque and rotor flux variation. The reference values of electromagnetic torque and rotor flux are set at 3500 N×m and 1 wb, respectively. Fig. 4-11 show the obtained simulation results from this test. The waveforms are taken from 0 to 0.4 sec for better illustrations. From Fig. 7, 8, we notice that the electromagnetic torque and rotor flux follow the references precisely. On the other hand, the proposed technique reduced the torque and flux ripples compared to the DFTC-PI technique (Fig. 10, 11). It is shown that the FOSTA controller has high effectiveness compared to the traditional PI controller.

Fig. 6 represents the current signal for both DFTC methods. Starting from Fig. 6, we notice that the stator current is related to the system, as well as the reference values of electromagnetic torque and rotor flux. From Fig. 9, we notice that the proposed DFTC method greatly reduced the ripple of stator current of the DFIG compared to DFTC-PI. On the other hand, Fig. 4, 5 show the THD of current (I_{as}) of the DFIG for the designed and classical DFTC methods. It can be clearly observed through these Figures that the THD value is more reduced for the DFTC-FOSTA (0.16 %) when compared to the DFTC-PI (0.63 %). Based on the obtained results, it can be said that DFTC-FOSTA has proven effective in reducing the value of undulations both in stator current and electromagnetic torque.

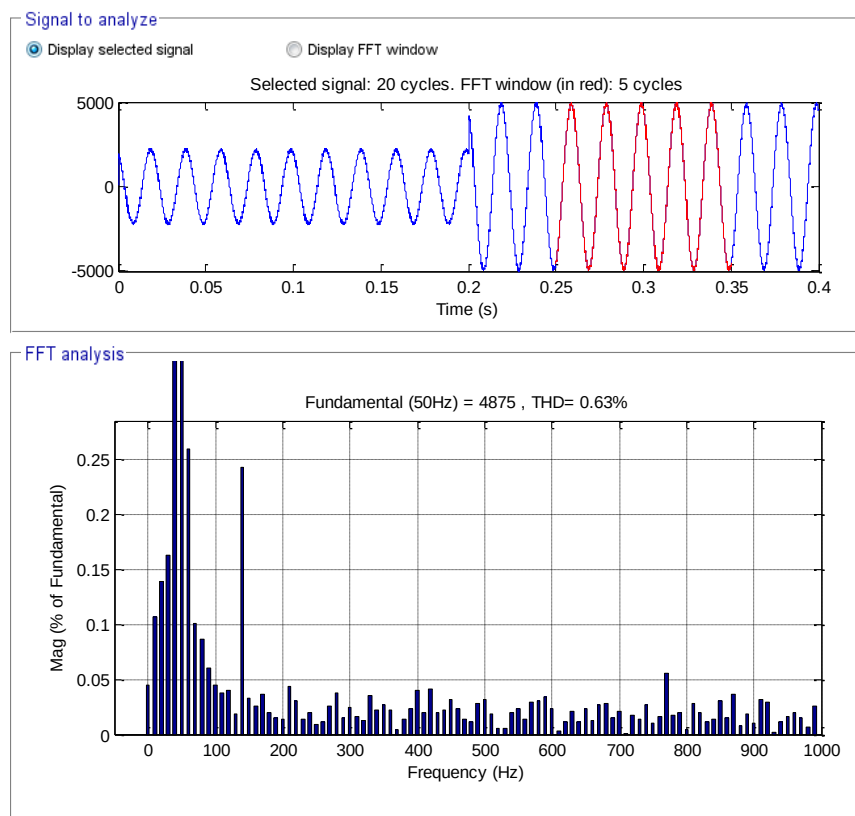


Fig. 4. THD (DFTC-PI)

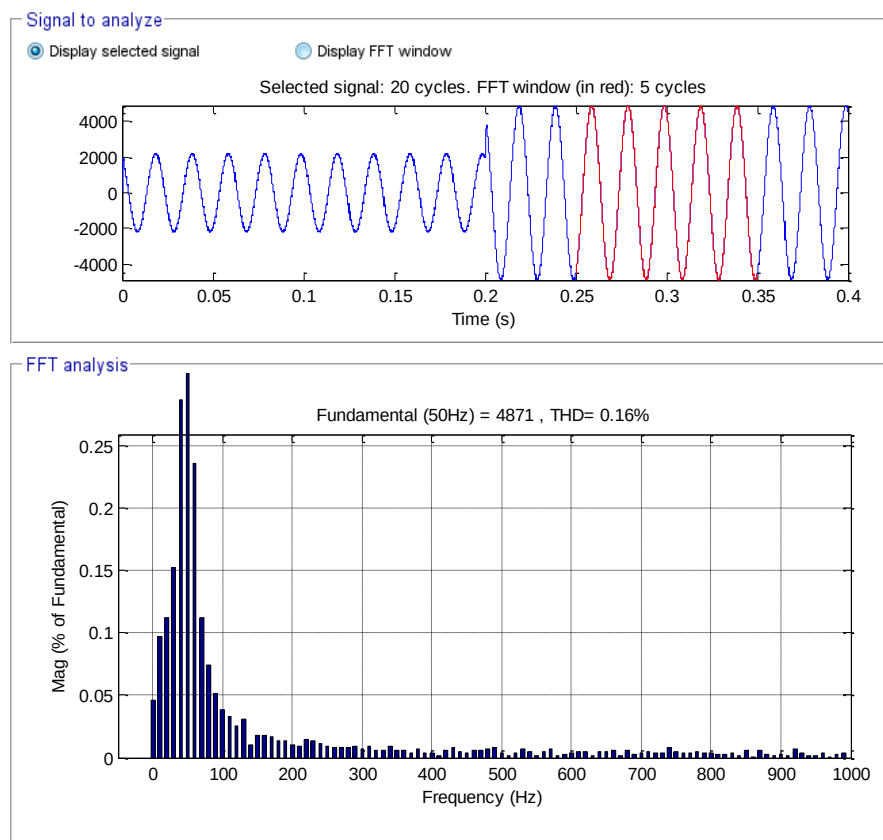


Fig. 5. THD (DFTC-FOSTA)

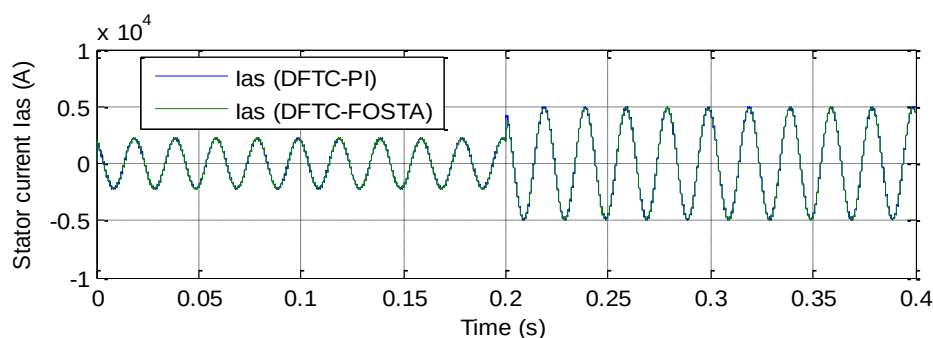


Fig. 6. Stator current

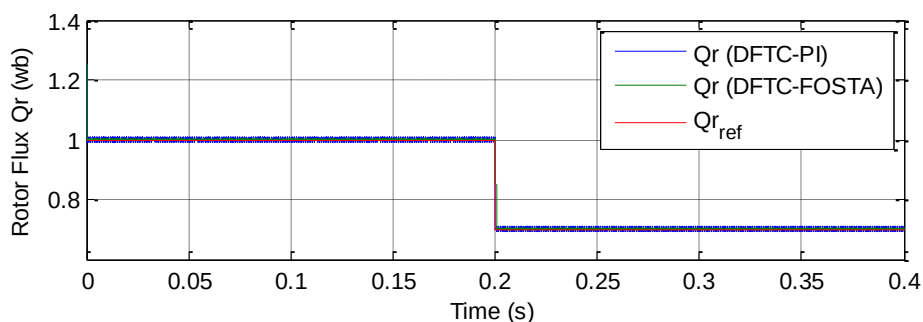


Fig. 7. Rotor flux

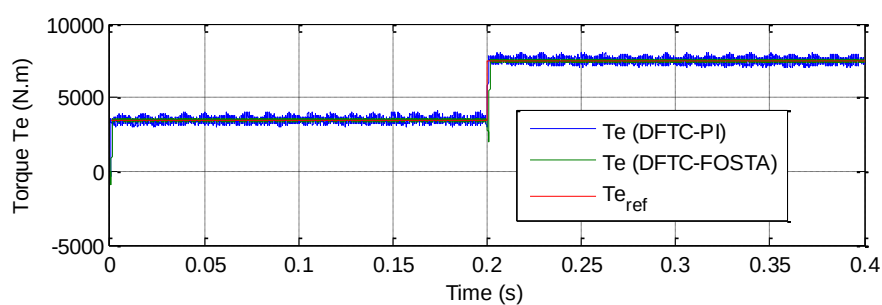


Fig. 8. Torque

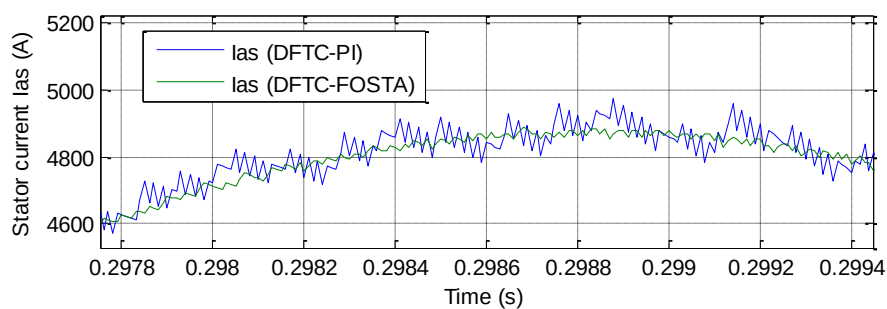


Fig. 9. Zoom (Current Ias)

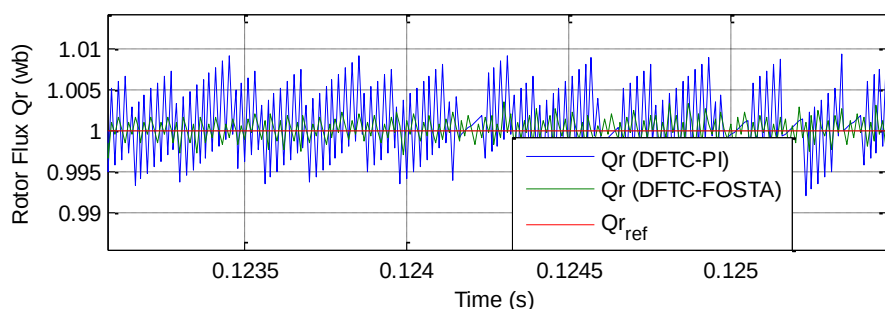


Fig. 10. Zoom (Rotor flux)

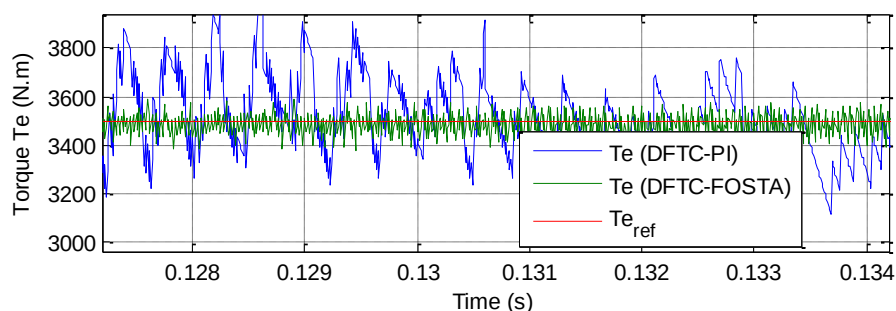


Fig. 11. Zoom (Torque)

6.2 Robustness test

In order to examine the robustness of the DFTC-FOSTA technique, the nominal value of the values of inductances L_s , M , and L_r are multiplied by 0.5 and the R_r and R_s are multiplied by 2. Simulation results are presented in Fig. 12-19. As it's shown by these Figures, these variations present a clear effect on the stator current, rotor flux, and electromagnetic torque curves (Fig. 15-17) and that the effect appears more important for the DFTC-PI control method compared to the DFTC-FOSTA technique (Fig. 18-19). On the other hand, the THD value of stator current in the DFTC-FOSTA method has been minimized significantly (Table). Thus, it can be concluded that the designed DFTC-FOSTA technique is more robust than the DFTC-PI control method.

Table. Comparative analysis of THD value

Title	THD (%)	
	<i>DFTC-PI</i>	<i>DFTC-FOSTA</i>
Current (Ias)	1.29	0.32

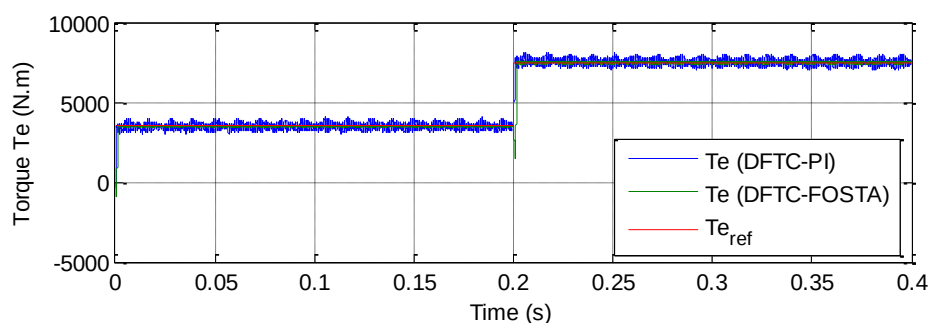


Fig. 12. Torque

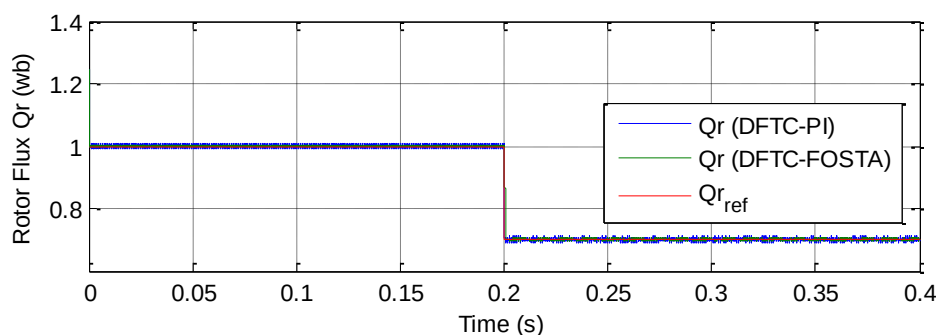


Fig. 13. Rotor flux

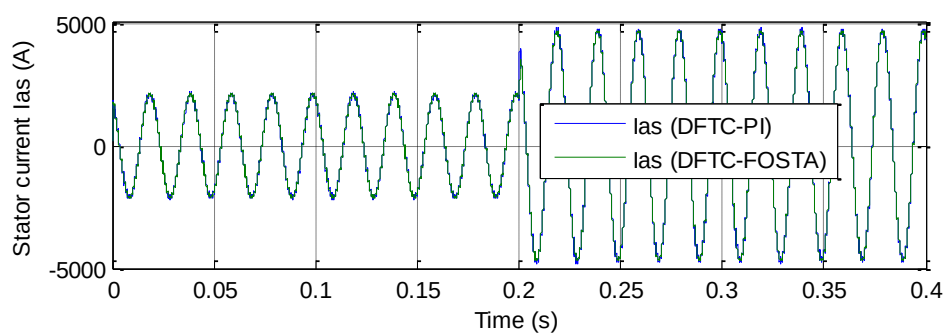


Fig. 14. Stator current

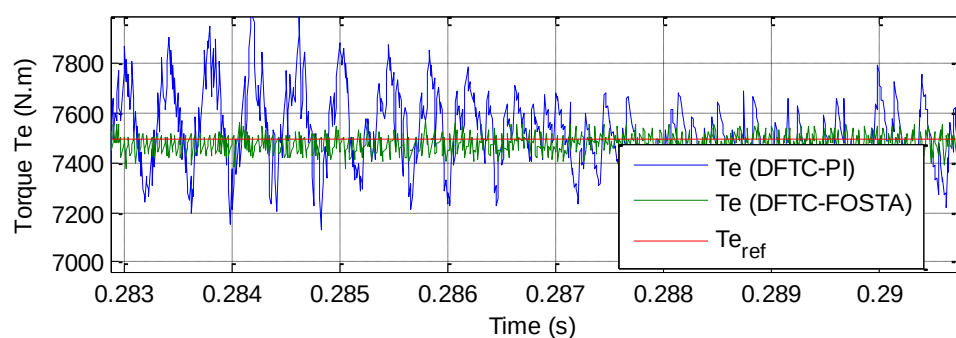


Fig. 15. Zoom (Torque)

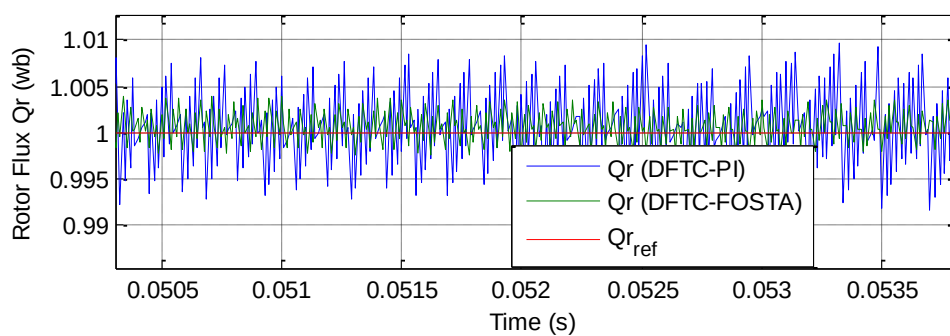


Fig. 16. Zoom (Rotor flux)

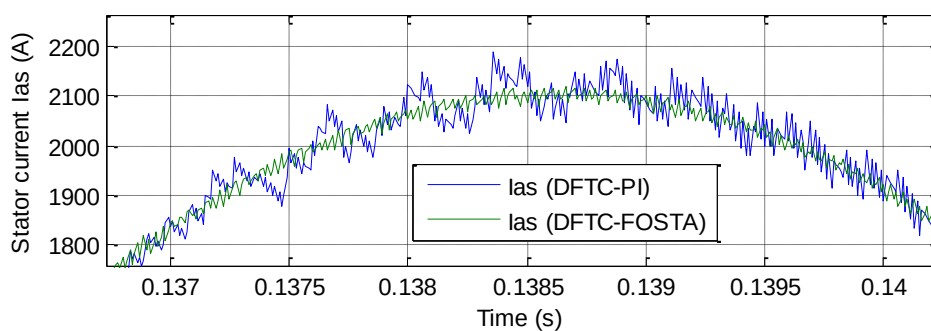


Fig. 17. Zoom (Stator current)

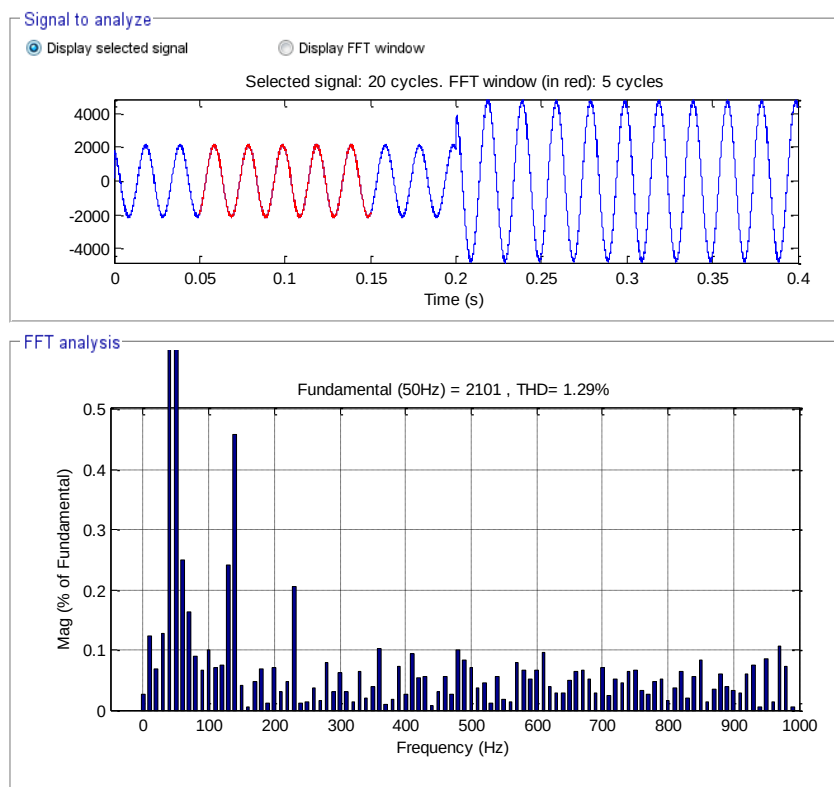


Fig. 18. THD (DFTC-PI)

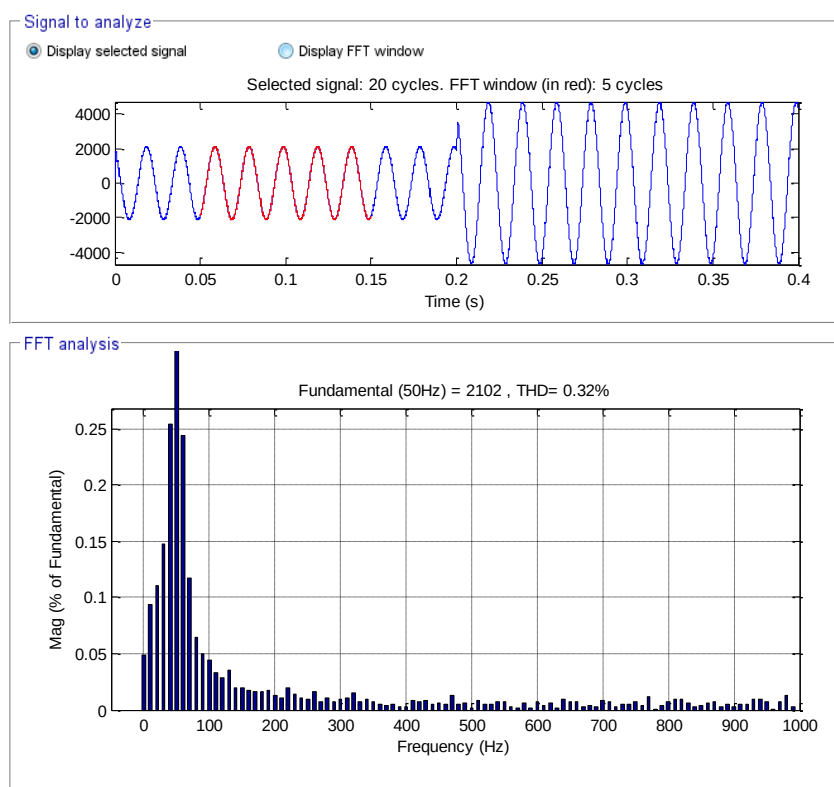


Fig. 19. THD (DFTC-FOSTA)

7. CONCLUSION

This work presents the simulation results of the rotor flux and electromagnetic torque fractional-order super twisting control technique of a DFIG-based wind turbine, using the modified SVM technique. With results obtained from the numerical simulation, it is clear that for the same operation condition, the DFTC control with FOSTA controllers had high effectiveness and performance than the DFTC control using traditional PI controllers and that is clear in the THD value of stator current which the use of the FOSTA controller, it is reduced of harmonics more than the PI controller.

The authors make it expressly clear that:

1. No conflict of interests has taken or make take place;
2. The present article does not contain any researches with people involved as the objects of researches.

References

1. Liu D, Polinder H, Abrahamsen AB, Ferreira JA. Effects of armature winding segmentation with multiple converters on the short circuit torque of 10-MW superconducting wind turbine generators. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017; 27(4):1-5. doi: 10.1109/TASC.2016.2639029
2. Djeriri Y. Lyapunov-based robust power controllers for a doubly fed induction generator. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2020; 16(4):551-558. doi: 10.22068/IJEEE.16.4.551
3. Prasad R, Padhy NP. Synergistic frequency regulation control mechanism for DFIG wind turbines with optimal pitch dynamics. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020; 35(4):3181-3191. doi: 10.1109/TPWRS.2020.2967468
4. Mondal S, Kastha D. Input reactive power controller with a novel active damping strategy for a matrix converter fed direct torque controlled DFIG for wind power generation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2020; 8(4):3700-3711. doi: 10.1109/JESTPE.2019.2938012
5. Yu SS, Zhang G, Fernando T, Iu HH. A DSE-Based SMC method of sensorless DFIG wind turbines connected to power grids for energy extraction and power quality enhancement. *IEEE Access*, 2018;6:76596-76605. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2883591
6. Benbouhenni H, Boudjema Z, Belaidi A. DPC based on ANFIS super-twisting sliding mode algorithm of a doubly-fed induction generator for wind energy system. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2020;53(1):69-80.
7. Prasad RM, Mulla MA. A novel position-sensorless algorithm for field-oriented control of DFIG with reduced current sensors. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2019;10(3):1098-1108. doi: 10.1109/TSTE.2018.2860993
8. Mondal S, Kastha D. Improved direct torque and reactive power control of a matrix-converter-fed grid-connected doubly fed induction generator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015;62(12):7590-7598. doi: 10.1109/TIE.2015.2459056
9. Zhang Z, Tang R, Bai B, Xie D. Novel direct torque control based on space vector modulation with adaptive stator flux observer for induction motors.

- IEEE Transactions on Magnetics*. 2010;46(8):3133-3136. doi: 10.1109/TMAG.2010.2051142
10. Benbouhenni H. Four-level direct torque control of permanent magnet synchronous motor based on neural networks with regulation speed using neural PI controller. *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*, 2019;8(4):1-10.
 11. Benbouhenni H, Boudjema Z. Two-level DTC based on ANN controller of DFIG using 7-level hysteresis command to reduce flux ripple comparing with traditional command. *2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS)*. November 24-25. Medea, Algeria. 2018. doi: 10.1109/ICASS.2018.8652013
 12. Zhang Z, Zhao Y, Qiao W, Qu L. A discrete-time direct torque control for direct-drive PMSG-based wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015;51(4):3504-3514. doi: 10.1109/TIA.2015.2413760
 13. El Ouanjli N, Motahhir S, Derouich A, El Ghzizal A, Chebabhi A, Taoussi M. Improved DTC strategy of doubly fed induction motor using fuzzy logic controller. *Energy Reports*. 2019;5:271-279. doi: 10.1016/j.egy.2019.02.001
 14. Benbouhenni H. Torque ripple reduction of DTC DFIG drive using neural PI regulators. *Majlesi Journal of Energy Management*. 2019;8(2):21-26.
 15. Arbi J, Ghorbal MJ, Slama-Belkhodja I, Charaabi L. Direct virtual torque control for doubly fed induction generator grid connection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009;56(10):4163-4173. doi: 10.1109/TIE.2009.2021590
 16. Giribabu D, Kumar A. Comparative study of control strategies for the induction generators in wind energy conversion system. *Wind and Structures*. 2016;22(6):635-662. doi: 10.12989/was.2016.22.6-.635
 17. Boudjema Z, Taleb R, Djerriri Y, Yahdou A. A novel direct torque control using second order continuous sliding mode of a doubly fed induction generator for a wind energy conversion system. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2017;25(2): 965-975.
 18. Farid B, Tarek B, Sebti B. Fuzzy super twisting algorithm dual direct torque control of doubly fed induction machine. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021;11(5). doi: 10.11591/ijece.v11i5.pp%25p
 19. Benbouhenni H. Utilization of an ANFIS-STSM algorithm to minimize total harmonic distortion. *International Journal of Smart Grid*. 2020;4(2):56-67.
 20. Benbouhenni H. Stator current and rotor flux ripples reduction of DTC DFIG drive using FSTSMC algorithm. *International Journal of Smart Grid*. 2019;3(4).
 21. Benbouhenni H. Rotor flux and torque ripples minimization for direct torque control of DFIG by NSTSM algorithm. *Majlesi Journal of Energy Management*. 2018;7(3).
 22. Amrane F, Chaiba A. A novel direct power control for grid-connected doubly fed induction generator based on hybrid artificial intelligent control with space vector modulation. *Rev. Sci. Techni.-Electrotechn. Et Energ*. 2016;61(3):263-268.
 23. Tavakoli SM, Pourmina MA, Zolghadri MR. Comparison between different DPC methods applied to DFIG wind turbines. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2013;3(2):446-452.
 24. Listwan J. Application of super-twisting sliding mode controllers in direct field-oriented control system of six-phase induction motor: experimental studies. *Power Electronics and Drives*. 2018;3(1):23-34. doi: 10.2478/pead-2018-0013.
 25. Nieto JJ. Maximum principles for fractional differential equations derived from mittag-leffler functions. *Applied Mathematics Letters*. 2010;23(10):1248-1251. doi: 10.1016/j.aml.2010.06.007
 26. Chen H, Wei X, Chen X, Jingang H, Aït-Ahmed N, Zhibin Z, Tianhao T, Mohamed

- B. Fractional-Order PI Control of DFIG-Based Tidal Stream Turbine. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020;8(5):1-23. doi: 10.3390/jmse8050309
27. Ebrahimkhani S. Robust fractional order sliding mode control of doubly-fed induction generator (DFIG)-based wind turbines. *ISA Transactions*, 2016;63:343-354. doi: 10.1016/j.isatra.2016.0-3.003
 28. Xiong L, Wang J, Mi X, Khan MW. Fractional order sliding mode based direct power control of grid-connected DFIG. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018;33(3):3087-3096. doi: 10.1109/TPWRS.201-7.2761815
 29. Azza A, Kherfane H. Robust control of doubly fed induction generator using fractional order control. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2018;9(3):1072-1080. doi: 10.11591/ij-peds.v9.i3.pp1072-1080
 30. Kashkooli MRA, Madani SM, Lipo TA. Improved Direct Torque Control for a DFIG under Symmetrical Voltage Dip With Transient Flux Damping. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020;67(1):28-37. doi: 10.1109/TIE.2019.2893856
 31. Cherifi D. Improvement technique of direct torque control of DFIG based in wind energy conversion system. *Global Journal of Information Technology: Emerging Technologies*. 2020;10(1):22-34. doi: 10.18844/gjit.v10i1.4630
 32. Benbouhenni H, Boudjema Z, Belaidi A. Power Control of DFIG in WECS Using DPC and NDPC-NPWM Methods. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2020;7(2):223-236.
 33. Benbouhenni H, Boudjema Z, Belaidi A. Direct power control with NSTSM algorithm for DFIG using SVPWM technique. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*. 2021;17(1):1-11.

Information about the authors:

Almakki Ali Nadhim Jbarah, Postgraduate;

ORCID: 0000-0002-0061-6425;

E-mail: alinadhimj@gmail.com

Mazalov Andrey, PhD, associate professor;

eLibrary SPIN: 6534-7455; ORCID: 0000-0003-3761-0059; Scopus ID: 55927486000;

E-mail: anmaz8@list.ru

To cite this article:

Almakki ANJ, Mazalov AA. Improved DFIG DFTC by using a fractional-order super twisting algorithms in wind power applications. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):131-149. doi: 10.17816/transsyst202173131-149

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов

УДК [UDC] 625.122

DOI 10.17816/transsyst202173150-157

© А. А. Лычковский

Российский университет транспорта (МИИТ)
(Москва, Россия)

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗВЕДЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Обоснование: Произведен анализ комплексной технологии возведения земляного полотна, разработанной в РУТ (МИИТ), с целью ее модернизации на основе мониторинга изменения характеристик грунтов с применением опто-волоконного кабеля в ходе строительства.

Цель: Разработка интенсивных технологических режимов повышения надежности дорожного земляного полотна

Методы: Методы контроля и технологического регулирования уплотнения грунтов с целью снижения влажности на стадии морозного влагонакопления в основании возводимой насыпи.

Результаты: В результате анализа модернизация комплексной технологии является целесообразной.

Заключение: предложенные способы технологического регулирования эффективны при возведении земляного полотна на переувлажненных грунтах.

Ключевые слова: земляное полотно, технологическое регулирование опто-волоконный кабель, строительство железных дорог, технология.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Design and Construction of Roads, Subways

© A. A. Lychkovskiy

Russian university of transport (MIIT)
(Moscow, Russia)

MODERNIZATION OF THE COMPLEX TECHNOLOGY OF CONSTRUCTION OF THE ROADBED

Background: The analysis of the complex technology of the construction of the roadbed, developed in RUT (MIIT), with the aim of its modernization on the basis of monitoring changes in the characteristics of the soil with the use of fiber-optic cable during construction.

Aim: Development of intensive technological modes for improving the reliability of the road surface.

Methods: Methods of control and technological regulation of soil compaction in order to reduce humidity at the stage of frost moisture accumulation at the base of the embankment being built.

Results: As a result of the analysis, the modernization of the integrated technology is appropriate.

Conclusion: The proposed methods of technological regulation are effective in the construction of the roadbed on waterlogged soils.

Keyw ords: roadbed, technological regulation fiber-optic cable, railway construction, technology.

ВВЕДЕНИЕ

Задача повышения несущей способности основания геотехнических сооружений актуальна, она соответствует стратегии развития железнодорожного транспорта до 2025 года с повышением массы грузовых поездов и требованиями по развитию и обеспечению безопасности инфраструктуры [1].

КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Существующее состояние несущей способности земляного полотна и искусственных сооружений на слабых основаниях не в полной мере соответствует перспективным нагрузкам грузовых поездов, которые должны быть достигнуты к 2025 году.

Опыт постройки и эксплуатации дорог показал, что безопасность сооружений должна быть обеспечена уже в строительный период. В строительных нормах и правилах содержатся конструктивные решения для завершенных геотехнических объектов, обеспечивающие их устойчивость и стабильность. Между тем, на слабых грунтах актуальны требования технологической надежности незавершенных геотехнических сооружений при изменении физическо-механических и теплофизических характеристик.

Для упрочнения слабых и переувлажненных грунтов предлагается модернизировать разработанную в РУТ (МИИТ) комплексную технологию возведения земляного полотна [2], включающую этапы:

- 1) Подготовительный этап;
- 2) Устройство дренажной системы в верхнем слое основания;
- 3) Организация виброуплотнения грунтов и отжатия воды в дренажную систему.

В подготовительный этап следует выполнить работы по устройству сетей контроля температурного режима [3] оснований и пространственных деформаций земляного полотна, которые позволят зарегистрировать

изменения параметров теплообмена насыпи, основания и окружающей среды. В ходе работ могут измениться многие начальные характеристики объекта, особенно основания насыпи, включая состав грунтов. Регулярный опрос сетей необходим для длительного периода использования технических решений, применяемых в комплексной технологии, особенно по снижению влажности и стабилизации грунтов оснований.

Второй этап – устройство дренажной системы, включающей дренажные прорези (ширина до 1,5 м, глубина до 1 м, крупный песок с коэффициентом фильтрации свыше 4 м/сут) и защитный песчаный слой с геотекстилем [4]. Прорези в слабых водонасыщенных грунтах обеспечивают ускорение консолидации основания за счет сокращения пути фильтрации и отвода воды. Завершить работы по устройству дренажной системы следует до промерзания деятельного слоя, когда можно использовать процессы миграции воды в защитный слой и ее отжатие по дренажным прорезям.

Третий этап включает выбор техники и оборудования для уплотнения грунтов в интенсивном режиме с заделом на ежедневное постепенное повышение нагрузки. Производить работы следует при постоянном мониторинге состояния грунтов и нагрузок. Выбор типа виброкатка и режима его работы должен быть выполнен с учетом ограничения:

$$[P_6(c, \varphi, w) - P_{\Pi}] \geq [P_K + P_3], \quad (1)$$

где P_6 – безопасная нагрузка, не вызывающая появления предельного состояния грунта по сдвигу, зависит от состояния грунта в технологическом цикле;

P_K – регулируемая нагрузка виброкатка, зависящая от веса вальца, скорости движения и амплитуды вибрации;

P_3 – нагрузка от песчаного защитного слоя;

P_{Π} – поровое давление [5].

Следует отметить необходимость мониторинга состояния основания земляного полотна при виброуплотнении в режиме реального времени. Для контроля характеристик грунтов и выполнения неравенства (1) предлагается в подготовительный период проложить по оси будущей трассы опто-волоконный кабель (ОВК) для регистрации температурного режима и нагрузок на земляное полотно. [6],[7] Устройство ОВК может быть выполнено при помощи трактора со специальным навесным оборудованием – баровой установкой. По требованиям стабильности основания следует предварительно сравнить по [8] давление от данной машины с предельно допустимой (критической) нагрузкой $P_{кр}$ на грунт:

$$P_{кр} = \frac{\pi \cdot (\gamma \cdot h + C \cdot \cot(\varphi))}{\cot(\varphi) + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot h \quad (2)$$

где γ – удельный вес грунта, т/м³;

h – толщина слоя, м;

C – удельное сцепление грунта основания, кПа;

φ – угол внутреннего трения грунта основания, рад.

Покажем порядок расчетов критической нагрузки применительно к исходным данным, приведенным в Табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики грунтов основания на ПК 3083+50 – ПК 3084+50 [9]

Инженерно-геологический элемент	Глубина, м	Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³	Влажность на границе раскатывания W_p , д.е.	Модуль деформации E , Мпа	Сцепление C , Мпа	Угол внутреннего трения φ , град.
Суглинок текучепластичный, легкий	1,7	1,44	0,245	8	0,011	11
Суглинок текучий	3,3	1,53	0,219	10	0,009	10

$$P_{кр} = \frac{3,14 \cdot (14,4 \cdot 1,7 + 11 \cdot 5,14)}{5,14 + 0,19 - \frac{3,14}{2}} + 14,4 \cdot 1,7 = 92,14 \text{ кН/м}^2$$

В качестве базовой строительной машины выбран трактор Т10 ПМ8100,с баровой установкой, нагрузка от которого на слабый слой грунта определена по паспортным параметрам машины в размере 55,32 кН/м². Давление машины в данном примере не превышает критическую нагрузку и является допустимым.

Для реализации технологического этапа отжатия воды и упрочнения грунта следует обосновать режим работы грунтоуплотняющей техники. Для этой цели уплотнение следует начать осенью, когда связанная в грунте вода поднимается к поверхности - фронту промерзания основания. Чтобы использовать опто-волоконный кабель не только как индикатор нагрузки, но и как температурный датчик, следует принять глубину укладки равной середине слоя промерзания грунта по формуле [5]:

$$\xi_3 = \sqrt{s_3^2 + \frac{2\lambda_m |\Omega_3^{\text{покр}}|}{Q_\phi}} - s_3; \quad (3)$$

$$s_3 = \lambda_m (\overline{R_{сн}} + R_{II}^3). \quad (4)$$

где R_{Π}^3 — зимнее термические сопротивления напочвенного покрова;
 R_{CH} — среднее термическое сопротивление снежного покрова;
 λ_m — соответственно теплопроводность мерзлой породы слоя;
 Q_{ϕ} — теплота фазовых переходов промерзающего слоя;
 $\Omega_z^{\text{покp}}$ — сумма градусо-часов за зимний период на дневной поверхности,
 ξ_z — глубина зимнего промерзания грунта [10].

Глубину заложения кабеля и координаты ее изменения следует определить по трассе земляного полотна через каждые 10 метров и передать на бортовой компьютер баровой машины, которая оснащена системой GPS навигации. Укладку ОВК выполняют по технологии [11].

Во время промерзания грунта, как только отрицательные температуры достигнут половины глубины промерзания грунта, следует начинать интенсивное уплотнение грунта с отжатием воды в дренажную систему под контролем показаний ОВК.

Опто-волоконный кабель эффективно применяется для контроля температур [12] непосредственно в грунте как непрерывный по длине датчик. В сравнении с устройством термометрических скважин диаметром до 160 мм, в которых температура должна измеряться посредством гирлянд из термометров или термодатчиками, ОВК позволяет снимать показания температуры не точечно, а на всем протяжении будущей трассы непрерывно во времени. Это позволяет эффективно регулировать режим уплотнения грунтов с учетом объема миграции воды к фронту промерзания [13].

После окончания строительства и приемки земляного полотна ОВК и оборудование переходят в состав мониторинга состояния эксплуатируемого железнодорожного участка в дополнение к контрольно-оповестительной системе для информации о повышении напряжения в грунтах основания и опасных состояниях земляного полотна [14]. Непрерывный контроль состояния грунтов в основании позволяет прогнозировать развитие деформаций земляного полотна, которые могут привести к возникновению отказов в работе и снижению надежности всей конструкции железнодорожного пути [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологические режимы сооружения земляного полотна целесообразно дополнить применением опто-волоконного кабеля для оперативной информации и регулирования работы грунтоуплотняющих машин при отжатии воды в период морозного влагонакопления. Модернизация комплексной технологии упрочнения слабых и просадочных грунтов за счет функций опто-волоконного кабеля позволяет

снизить влажность и повысить стабильность основания в процессе строительства. Контрольные функции ОВК полезны и в эксплуатационный период для дополнения мониторинга нагрузок на основание и состояния грунтов земляного полотна.

Статья подготовлена под научным руководством д.т.н., профессора Российского университета транспорта С.Я. Луцкого.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Сайт ОАО Российские железные дороги «Повышение веса поездов является единственным способом увеличить погрузку в РФ» [Site ОАО Rossijskie zheleznye dorogi "Povyshenie vesa poezdov yavlyayetsya edinstvennym sposobom uvelichit' pogruzku v RF". [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?accessible=true&id=157643>. Ссылка активна на 23.03.2021.
2. Lutskiy SYa, Roman LT. Technological Control of Permafrost Soil Characteristics in Roadbeds. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017;54(3):187-191. doi: 10.1007/s11204-017-9456-2
3. ГОСТ 25358-2012 Грунты. Метод полевого определения температуры (Переиздание). – М.: Стандартинформ, 2019. – 19 с. [GOST 25358-2012 Grunty. Metod polevogo opredeleniya temperatury (Pereizdanie). Moscow: Standartinform, 2019. 19 p. (In Russ.)].
4. Kempfert H-G, Stadel M, Zaeske D. Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen. *Bautechnik*. 1997;74(12):8-2.
5. Рекомендации по интенсивной технологии и мониторингу строительства земляных сооружений на слабых основаниях. – М.: Тимр, 2005. – 96 с. [Rekomendacii po intensivnoj tekhnologii i 155onitoring stroitel'stva zemlyanyh sooruzhenij na slabyh osnovaniyah. Moscow: Timr; 2005. 96 p. (In Russ.)].
6. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с. [Udd E. Volokonno-opticheskie datchiki. Vvodnyy kurs dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov. Moscow: Tekhnosfera, 2008, 520 p. (In Russ.)]. Доступно по: <http://bookre.org/reader?file=718954>. Ссылка активна на 23.03.2021.
7. Томышев К.А., Баган В.А., Астапенко В.А. Распределенные волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности. Труды МФТИ. – 2012. – Т. 4. – № 2. – С. 64–72. [Tomyshev KA, Bagan VA, Astapenko VA. Raspredelennye volokonno-opticheskie datchiki davleniya dlya primeneniya v neftegazovoy promyshlennosti. *Trudy MFTI*. 2012;(2):64-72. (In Russ.)]. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelyonnye-volokonno-opticheskie-datchiki-davleniya-dlya-primeneniya-v-neftegazovoy-promyshlennosti/viewer>
8. СП 32-104-98 Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм. М.: Госстрой России; ГУП ЦПП, 1999 – 95с. [Code of rules 32-104-98 Design of the earthen bed of railways with a gauge of 1520 mm. M.: Gosstroy of Russia;

- GUP TSPP, 1999 - 95p. (In Russ.)]
9. Строительство новой железнодорожной линии «Обская–Салехард». Проектная документация. Раздел 5 «Проект организации строительства». Книга 1. Общая пояснительная записка. 6550-004-ПОС 1. Том 5.1. «ЛЕНГИПРОТРАНС». 2013 [Construction of a new railway line «Ob–Salekhard». Project documentation. Section 5 “construction organization Project”. Book 1. General explanatory note. 6550-004-PIC 1. Volume 5.1. “LENGIPROTRANS”. 2013 (In Russ.)].
 10. Дыдышко П.И. Проектирование земляного полотна железнодорожного пути: справочное пособие. – М.: Интекст, 2011. – 152 с. [Dydyshko PI. Design of the railway trackbed: reference guide. Moscow: Intext, 2011. – 152 p. (In Russ.)].
 11. Лычковский А.А., Луцкий С.Я., Ландсман А.Я., Навроцкая Н.В. Диагностика морозного влагонакопления и технологическое регулирование сооружения земляного полотна Сетевой электронный журнал «Транспортные системы и технологии» – 2020. – Том 6, – № 2. – С. 61–69 [Lychkovsky AA, Lutsky SYa, Landsman AYa, Navrotskaya NV. Diagnostics of frost moisture accumulation and technological regulation of earthen dam construction. *Transport Systems and Technologies*. 2020;6(2):61-69 (In Russ.)]. doi: [10.17816/transsyst20206261-69](https://doi.org/10.17816/transsyst20206261-69)
 12. Неудодников А.П., Ахлебинин М.Ю., Егоров Ф.А., Быковский В.А. Строительный мониторинг на базе волоконно-оптических датчиков. Опыт и результаты применения для высотных зданий / Междунар. симп. «Проблемы современного бетона и железобетона». – Минск, 2009. [Neugodnikov AP, Akhlebinin MYu, Egorov FA, Bykovskiy VA. Stroitelnyy monitoring na baze volokonno-opticheskikh datchikov. Opyt i rezul'taty primeneniya dlya vysotnykh zdaniy. In Mezhd. Simp. “Modern Problems of Concrete and Reinforced Concrete” Minsk, 2009. (In Russ.)].
 13. Liu JK, Peng L. Experimental Study on the Unconfined Compression of a Thawing Soil. *Cold Regions Science and Technology*. 2009;58:92-96. doi: [10.1016/j.coldregions.2009.03.008](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.03.008)
 14. ВСН-61-89. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты. Минтрансстрой СССР. – М.: ЦНИИС, 1990. – 208 с. [VSN-61-89. Izyskaniya, proektirovanie i stroitel'stvo zheleznnyh dorog v rajonah vечноj merzloty. Mintransstroj USSR. Moscow: CNIIS, 1990. 208 p. (In Russ.)].
 15. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов. ПНИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 72 с. [Recommendations for accounting and prevention of deformations and forces of frost heaving of soils. PNIIS. Moscow: Stroizdat; 1986. 72 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data1/50/50944/>. Ссылка активна на 23.03.2021.

Сведения об авторе:

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

Information about the author:

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

Цитировать:

Лычковский А.А. Модернизация комплексной технологии возведения земляного полотна // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 150-157. doi: 10.17816/transsyst202173150-157

To cite this article:

Lychkovskiy AA. Modernization of the complex technology of construction of the roadbed. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):150-157. doi: 10.17816/transsyst202173150-157

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов

УДК [UDC] 624.21

DOI 10.17816/transsyst202173158-168

© А. Н. Яшнов, А. Н. Иванов

Сибирский государственный университет путей сообщения
(Новосибирск, Россия)

СТРУННЫЕ ПРОЛЕТНЫЕ СТРОЕНИЯ ДЛЯ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Цель: Обоснование технической возможности применения для «Маглев» струнных пролетных строений из полимерных композиционных материалов.

Методы: Расчетно-теоретические методы исследований.

Результаты: Показано, что путем натяжения струны и применения специальных конструктивных решений можно создать близкий к «идеальному» профиль путевой структуры для движения «Маглев». При этом в качестве материала струн предпочтительнее использовать полимерные композиты, позволяющие при том же уровне натяжения струны получать меньшее провисание, чем у металлических струн.

Заключение: Обоснован альтернативный традиционным железобетонным или металлическим конструкциям вариант струнных композиционных пролетных строений.

Ключевые слова: магнитолевитационный транспорт, струнные композиционные пролетные строения.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Design and Construction of Roads, Subways

© A. N. Yashnov, A. N. Ivanov

Siberian Transport University
(Novosibirsk, Russia)

STRING SUPERSTRUCTURES FOR MAGLEV TRANSPORT

Aim: Justification of the technical feasibility of using string spans made of polymer composite materials for maglev transport systems.

Methods: Computational and theoretical methods of research.

Results: It is shown that by stretching the string and applying special design solutions, it is possible to create a close to "ideal" profile of the track structure for the maglev movement. At the same time, it is preferable to use polymer composites as the string material, which allow for less sagging than metal ones at the same level of string tension.

Conclusion: The alternative to traditional reinforced concrete or metal structures of string composite superstructures is justified.

Key words: maglev transport, string composite superstructures.

ВВЕДЕНИЕ

«Маглев» – малошумный, экологически чистый и безопасный транспорт, независимый от климатических условий. Проекты магнитолевитационных транспортных систем появились еще в начале прошлого века [1], но до настоящего времени такие системы не получили широкого распространения. Хотя, очевидно, что магнитолевитационные транспортные системы перспективны при организации высокоскоростного и сверхвысокоскоростного движения и перевозки контейнеров. В современных мегаполисах также перспективно внедрение городского транспортного движения на магнитном подвесе [2, 3]. Исследования, проведенные японскими учеными, показали, что реализация транспортного сообщения внутри мегаполисов и между ними по технологии «Маглев» оказывает положительный экономический эффект, способствуя более равномерному расселению людей по рассматриваемой территории и увеличению валового регионального продукта регионов [4].

Сравнение высокоскоростных железнодорожных магистралей работающих на системах «колесо-рельс» и «магнитный подвес» [5] свидетельствует о наличии у магнитолевитационного транспорта таких преимуществ, как рекордное значение скорости (581 км/час), сравнительно меньшие радиусы кривых из-за возможности большего поперечного наклона, максимальные уклоны продольного профиля теоретически могут достигать 100 %, уровень шума значительно ниже при одинаковом уровне скоростей. Как отмечают некоторые исследователи транспорт на магнитном подвесе является перспективным в условиях Севера [6], в первую очередь, это транспортные системы эстакадного типа для устойчивых грузо- и пассажиропотоков над снегом и зонами интенсивного водородного износа конструкций [7]. Но «Маглев» имеет и такие существенные недостатки, как несовместимость с существующей сетью обычных железных дорог, а также отсутствие опыта строительства и эксплуатации [4].

Как справедливо отмечено в [8] магнитолевитационный транспорт является преимущественно эстакадным, доля эстакадных участков составляет до 100 %. При этом эстакады занимают значительно меньшие площади, чем насыпи, а подэстакадное пространство может быть использовано для многих нужд. Общие вопросы проектирования мостовых сооружений были рассмотрены в работе [9], отмечено, что необходимо решать вопросы строительства эстакад, осуществляя поиск новых конструктивных и организационно-технологических решений.

В настоящее время первый в мире коммерческий «маглев»-поезд курсирует на линии Шанхай – аэропорт Пудонг. На этой линии применены эстакады с отдельными для каждого направления пути опорами.

Пролетные строения – железобетонные балочно-неразрезные, в основном 2×25 м, высотой около 2,0 м. Высота железобетонных опор принята от 1,5 до 20 м, при небольшой высоте опор длина пролетов уменьшается. В поперечном сечении пролетное строение под каждый путь представляет собой одну Т-образную балку, состоящую из довольно «толстого» ребра и плиты [10]. Плиты смежных неразрезных пролетных строений объединены в температурно-неразрезную плеть. В отличие от Китая в Японии, на экспериментальном участке будущей магистрали «Маглев» Токио – Осака опоры эстакады приняты Т-образной формы, с размещением на ригеле двух путей. Таким образом, реализуются традиционные конструктивные решения пролетных строений и опор. Заметим, что для освобождения подэстакадного пространства могут быть применены и металлические опоры.

А. Э. Юницкому [11, 12] принадлежит идея создания струнного транспорта, главным преимуществом которого перед традиционными видами транспорта является новизна применяемых технологий и технических решений, что приводит к снижению материалоемкости при строительстве, повышению долговечности путевой структуры и снижении энергопотребления при эксплуатации. Однако скорости движения магнитолевитационного транспорта (до 300 км/час и более) требуют, чтобы профиль пути был идеально ровным, без переломов, что вызывает определенные трудности при реализации идеи А. Э. Юницкого для «Маглев», так как натяжение струны без провисания требует бесконечно большого усилия. Из имеющихся в открытом доступе публикаций неясно решаются ли А. Э. Юницким вопросы обеспечения ровного (без переломов над опорами и провисаний в пролете) профиля движения. Цель данной работы – обоснование технической возможности применения струнных пролетных строений с использованием полимерных композиционных материалов для магнитолевитационных транспортных систем.

СОЗДАНИЕ СТРУННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Предложено следующее запатентованное [13] конструктивное решение струнного пролетного строения, принципиальная схема которого показана на Рис. Струнную систему натягивают между двумя концевыми опорами (1, 6), а по длине линии поддерживают промежуточными опорами (5) с шарнирно-подвижным опиранием (4) струны (2) на них. В концевых опорах возможна абсолютно жесткая заделка струны, но в одной из опор может быть устроено подвижное опирание с анкерным грузом (8), имеющим массу, создающую требуемое усилие натяжения. Кроме того, для гашения колебаний может быть установлен пружинный демпфер (7). Струна по длине пролета будет иметь провисание (Y), зависящее от

величины натяжения. Идеально ровная струна требует бесконечно большого усилия натяжения, что принципиально не достижимо. Однако можно выровнять поверхность движения, уложив на струну специальную путевую конструкцию (3) переменной по длине пролета высоты (Рис.).

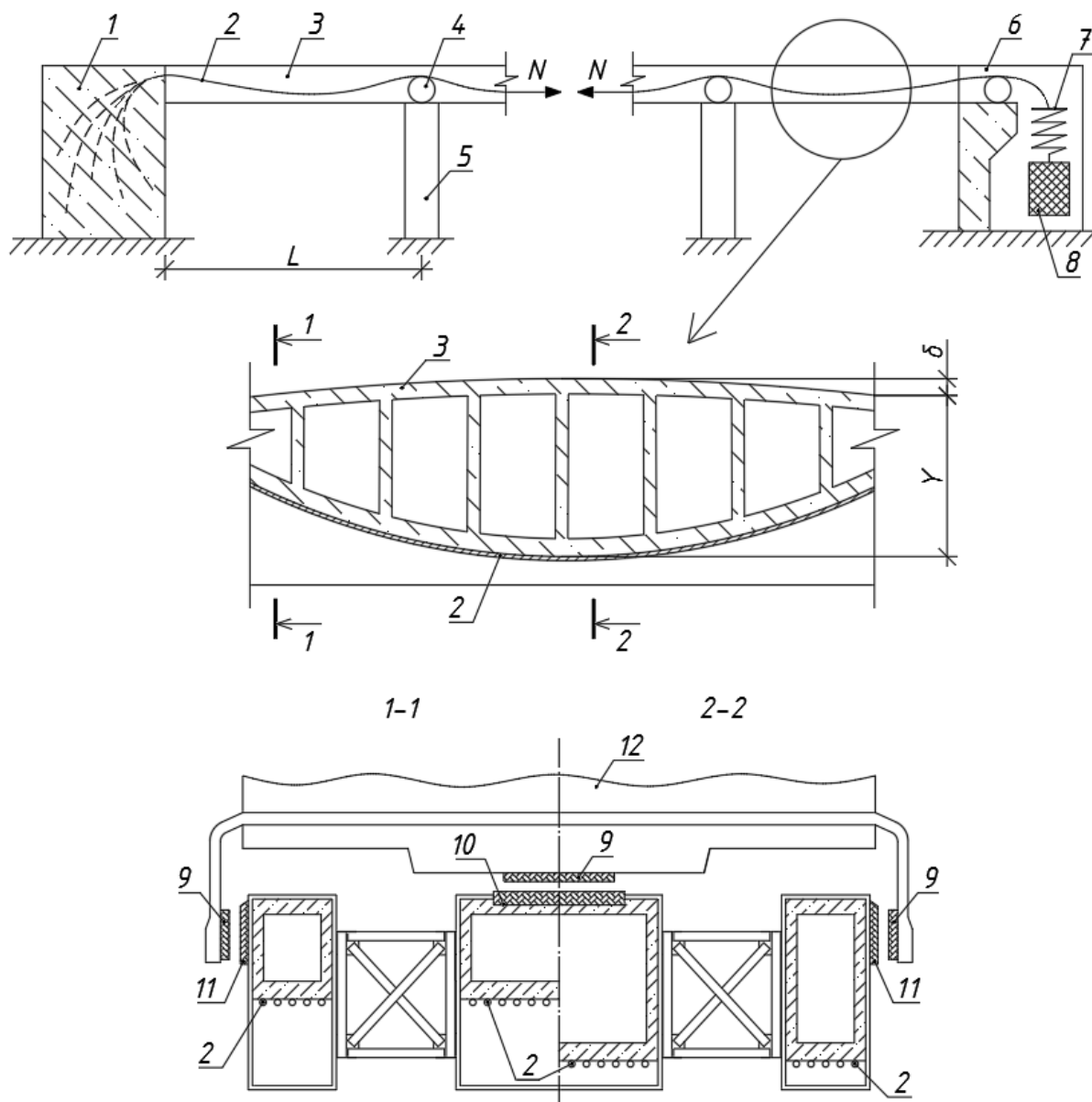


Рис. Схема струнного пролетного строения: 1 – концевая анкерная опора с жесткой заделкой струны, 2 – струна; 3 – путевая конструкция, 4 – шарнирное продольно-подвижное опирание на промежуточную опору, 5 – промежуточная опора, 6 – концевая опора с анкерным грузом, 7 – пружинный демпфер, 8 – анкерный груз, 9 – высокотемпературная сверхпроводящая лента, 10 – путевой электромагнит, 11 – магнит боковой стабилизации, Y – провисание струны, δ – строительный подъем

С точки зрения строительной механики струна представляет собой гибкую нить, работающую только на растяжение ввиду своей малой

изгибной жесткости. Придавая нити начальный прогиб (провисание) и загружая её нагрузкой от собственного веса конструкции по пролету (Рис.), можно записать формулу для определения величины натяжения в следующем виде:

$$N = \frac{q \cdot L^2}{8Y \cdot \cos \alpha} \quad (1)$$

где q – нагрузка от собственного веса конструкции;

L – пролет нити;

Y – провисание нити;

α – угол наклона нити при провисании.

Практический интерес представляет ограничение провисания нити до величины не более 0,5 м, что позволит встроить несущую нить в специальную путевую конструкцию в виде коробчатого кожуха небольшой высоты по фасаду с переменной высотой опирания на струну по длине пролета. Заметим, что величина провисания в этом случае будет малой по сравнению с пролетом, и действительная кривая провисания нити не будет существенно отличаться от параболы, полученной в предположении равномерного распределения нагрузки по пролету нити, а не по ее длине, как то имеет место в действительности. Косинус угла α стремится к единице. Значение погрешности в величине натяжения при таких допущениях не превосходит 0,3 %.

Напряжение, возникающее в струне от натяжения (с учетом формулы (1)):

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{\rho \cdot L^2}{8Y \cdot \cos \alpha} \quad (2)$$

где A – площадь сечения нити (струны);

ρ – плотность материала нити (струны).

Вычисления по формуле (2) показывают, что, используя не более 10 % несущей способности стальной проволоки или каната, можно создать требуемый профиль струны при пролетах 25 – 100 м.

Усилия натяжения, возникающие в несущих струнах от подвижного состава, могут быть определены по формуле (1) с заменой постоянной нагрузки q на равномерно распределенную нагрузку v от высокоскоростных поездов «Маглев». Если рассматривать подвижной состав для высокоскоростной магистрали с классом нагрузки С8 и с учетом необходимости ограничения прогибов по СП 453.1325800.2019, то усилия по формуле (2) будут весьма значительны и потребуют применения струн большой площади, что, учитывая значительный объемный вес

металла, неминуемо приведет к удорожанию конструкций опор и фундаментов.

Оправданным будет использование металлических струнных пролетных строений для создания контейнерных мостов [8]. При этом усилия натяжения струн от нагрузки могут быть определены по формуле:

$$N = \frac{P \cdot L}{4Y} \quad (3)$$

где P – вес магнитолевитационной тележки с контейнером.

В этом случае небольшие по площади поперечного сечения струны обеспечат необходимую грузоподъемность и жесткость конструкции пролетного строения.

Заметим, что при использовании стальных струн необходимо учитывать дополнительные температурные напряжения, которые для различных климатических условий РФ могут превышать 10 % от разрывного усилия:

$$\sigma = E \alpha \Delta T \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала;

α – коэффициент линейного расширения;

ΔT – максимальная разность температур.

Важными с точки зрения обеспечения работоспособности предлагаемой струнной конструкции будут расчеты динамических параметров, в первую очередь собственных частот колебаний. Низкие частоты могут быть опасны при их совпадении с вынуждающими силами при пропуске подвижного состава. Частота собственных поперечных колебаний струны может быть определена по формуле:

$$v = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{N}{\rho \cdot A}} \quad (4)$$

где n – число полувольт (1,2,3,...).

При необходимости можно предусмотреть регулирование колебаний путем их гашения специальным демпфером (Рис.). В динамическом гасителе для гашения колебаний используется явление антрирезонанса. Принцип действия динамического гасителя заключается в создании гасителем силы направленной противоположно возмущающей силе. Настройка динамического гасителя заключается в подборе его собственной

частоты: собственная частота гасителя должна быть равна частоте тех колебаний, амплитуду которых необходимо уменьшить («погасить»).

Собственная частота колебаний демпфера, в первом приближении, представлена формулой:

$$\nu_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}} \quad (5)$$

где C – жесткость пружины (кг/с²);

m – масса подвешиваемого на пружину груза (кг).

Для гашения колебаний необходимо подобрать жесткость и массу пружины таким образом, чтобы удовлетворить условию:

$$\nu_d = \nu \quad (6)$$

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СТРУННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Для получения компактного поперечного сечения несущей конструкции требуется материал с высокими прочностными показателями и низким удельным весом. Такими характеристиками обладают композиционные материалы с углеродными волокнами [14]. Прочность углеволокна превышает прочность стальной проволоки в 2–4 раза, при этом удельный вес этого материала в 4 раза меньше стали (Табл.). Кроме того, композиты с углеродными волокнами превосходят сталь по демпфирующей способности, которая зависит от соотношения угла приложения нагрузки к направлению армирования, что положительно отражается на скорости затухания колебаний от воздействия подвижной нагрузки.

Немаловажными факторами, которые необходимо учитывать при проектировании несущих конструкций, являются природно-климатические воздействия. Так, например, на значительной территории России перепад температур за календарный год приближается к 100 °С, что вызывает значительные температурные напряжения в элементах конструкций. Расчеты показывают, что обеспечение необходимого профиля струнного пролетного строения путем натяжения стальной высокопрочной проволоки при таких климатических условиях не представляется возможным, в то время как с помощью полимерных композиционных материалов эту задачу можно решить. Коэффициент линейного температурного расширения углеродных волокон отрицателен (Табл.), а однонаправленно армированных углепластиков близок к нулю [15]. Кроме того, полимерные

композиты более устойчивы к агрессивным средам, а потому менее подвержены деградации в сравнении со сталью.

Заметим, что характеристики композиционных материалов могут изменяться в широких пределах в зависимости от состава композиции, которая при необходимости может быть подобрана под заданные условия для обеспечения требуемых показателей.

Таблица. Характеристики углеволокна [15] и стальной проволоки

Материал	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа	Коэффициент линейного температурного расширения, 1/град	Удельный вес, кгс/м ³
Углеволокно	235–310	3600–5170	$-0,5 \cdot 10^{-6}$	1800–1900
Высокопрочная стальная проволока	177	1100–1490	$1,2 \cdot 10^{-6}$	7850

Таким образом, очевидно, что композиты на основе углеродных волокон превосходят сталь по физико-механическим характеристикам и их вариативности в широких пределах, а также более устойчивы к воздействию природно-климатических факторов. Все это указывает на целесообразность применения углепластиков в основных несущих конструкциях струнных пролетных строений для пропуска перспективного магнитолевитационного транспорта. При применении высокопрочного углеволокна окажется возможным и целесообразным встраивание несущей струны в путевую конструкцию. Технология сооружения будет предусматривать натяжение несущей струны, а затем монтаж на нее путевой конструкции с дополнительным строительным подъемом δ (Рис.) по верхней поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показана принципиальная возможность создания альтернативного традиционным железобетонным или металлическим конструкциям варианта струнных композиционных пролетных строений. Но для практической реализации струнной транспортной системы необходимо проведение дополнительных исследований, касающихся обеспечения безопасности движения и надежности ее функционирования. Для сооружения струнных систем потребуется разработка специальных технологических схем.

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. Магнитоплан профессора Вейнберга. [Magnitoplan professora Weinberga. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <http://idea1.westsib.ru/vactrain>. Ссылка активна на 28.04.2021.
2. Фёдорова М.В. Городской пассажирский транспорт на магнитном подвесе: технико-экономический анализ / Труды I Международной научно-практической конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии». 29-31 октября 2013 года; СПб. Под общ. ред. Антонова Ю.Ф. СПб.: ООО PUDRA, 2013 г. – С. 116–117. [Fedorova MV. Gorodskoj passazhirskij transport na magnitnom podvese: tehniko-jekonomicheskij analiz / Trudy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tehnologii”. 2013 october 29-31; St. Petersburg. St. Petersburg: PUDRA LLC; 2013. p. 116–117. (In Russ.)]. Доступно по: <http://mtstpgups.ru/files/trudy-mtst13-pdf.pdf>. Ссылка активна на 29.04.2021.
3. Изъюрова Т.И. Магнитолевитационные технологии в решении транспортных проблем в мегаполисах / Труды I Международной научно-практической конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии». 29-31 октября 2013 года; СПб. Под общ. ред. Антонова Ю.Ф. СПб.: ООО PUDRA, 2013 г. – С. 119–122. [Iz'jurova TI. Magnitolevitacionnye tehnologii v reshenii transportnyh problem v megapolisah / Trudy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tehnologii”. 2013 october 29-31; St. Petersburg. St. Petersburg: PUDRA LLC; 2013. p. 119-122. (In Russ.)]. Доступно по: [https:// http://mtstpgups.ru/files/trudy-mtst13-pdf.pdf](https://http://mtstpgups.ru/files/trudy-mtst13-pdf.pdf). Ссылка активна на 29.04.2021.
4. Tetsuji Sato, Masahiro Shiraishi. Time-series economic effect of developing MAGLEV among metropolitan areas in Japan considering urbanization economies. *Transportation Research Procedia*. 2020; 48:150-167. doi: 10.1016/j.trpro.2020.08.013
5. Костенко В.В., Четчуев М.В., Федоров В.П. Сравнительная характеристика высокоскоростных пассажирских наземных линий на основе систем «колесо-рельс» и «магнитный подвес» / Труды I Международной научно-практической конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии». 29-31 октября 2013 года; СПб. Под общ. ред. Антонова Ю.Ф. СПб.: ООО PUDRA, 2013 г. – С. 95–98. [Kostenko VV, Chetchuev MV, Fedorov VP. Sravnitel'naja harakteristika vysokoskorostnyh passazhirskih nazemnyh linij na osnove sistem “koleso-rel's” i “magnitnyj podves”/ Trudy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tehnologii”. 2013 october 29-31; St. Petersburg. St. Petersburg: PUDRA LLC; 2013. p. 95–98. (In Russ.)]. Доступно по: <http://mtstpgups.ru/files/trudy-mtst13-pdf.pdf>. Ссылка активна на 29.04.2021.
6. Киселенко А.Н., Кротов А.П., Сундуков Е.Ю. Применение транспортных систем с низкзатратной инфраструктурой в условиях северного региона // Политические, экономические и социокультурные аспекты регионального управления на Европейском Севере / Материалы докладов VII Всероссийской научно-теоретической конференции. Часть I. – Сыктывкар: КРАГСиУ, 2008. – С. 99-102.

- [Kiselenko AN, Krotov AP, Sundukov EJu. *Primenenie transportnyh sistem s nizkozatratnoj infrastrukturoj v usloviyah severnogo regiona. Politicheskie, jekonomicheskie i sociokul'turnye aspekty regional'nogo upravlenija na Evropejskom Severe. Materialy dokladov VII Vserossijskoj nauchno-teoreticheskoy konferencii. Chast' I.* Syktyvkar: KRAGSiU, 2008. pp. 99-102. (In Russ.)].
7. Киселенко А.Н., Сундуков Е.Ю. Использование транспортных систем на магнитной подвеске для решения проблем северного региона / Труды I Международной научно-практической конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии». 29-31 октября 2013 года; СПб. Под общ. ред. Антонова Ю.Ф. СПб.: ООО PUDRA, 2013 г. – С. 122–124. [Kiselenko AN, Sundukov EJu. *Ispol'zovanie transportnyh sistem na magnitnoj podveske dlja reshenija problem severnogo regiona. Trudy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tehnologii".* 2013 october 29-31; St. Petersburg. St. Petersburg: PUDRA LLC; 2013. p. 122–124. (In Russ.)]. Доступно по: <http://mtstpgups.ru/files/trudy-mtst13-pdf.pdf>. Ссылка активна на 29.04.2021.
 8. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе магнитной левитации / Магнитолевитационные транспортные системы и технологии. МТСТ'14. Труды 2-й Международной научной конференции. 17-20 июня 2014 года; СПб. Под ред. проф. Антонова Ю.Ф. – Киров: МЦНИП, 2014 г. – С. 11–23. [Zajcev AA, Antonov JuF. *Kontejnernyj most Sankt-Peterburg–Moskva na osnove magnitnoj levitacii. Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tehnologii.* МТСТ'14. Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. 2014 june 17-20; St. Petersburg. Kirov: MCNIP, 2014. p. 11-23. (In Russ.)]. Доступно по: <http://mtstpgups.ru/files/trudy-mtst14-pdf.pdf>. Ссылка активна на 29.04.2021.
 9. Красковский В.Е. Общие вопросы проектирования искусственных сооружений на дорогах с использованием магнитолевитационной технологии / Магнитолевитационные транспортные системы и технологии. МТСТ'14. Труды 2-й Международной научной конференции. 17-20 июня 2014 года; СПб. Под ред. проф. Антонова Ю.Ф. – Киров: МЦНИП, 2014 г. – С. 75–80. [Kraskovskij VE. *Obshhie voprosy proektirovanija iskusstvennyh sooruzhenij na dorogah s ispol'zovaniem magnitolevitacionnoj tehnologii. Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tehnologii.* МТСТ'14. Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. 2014 june 17-20; St. Petersburg. Kirov: MCNIP, 2014. p. 75–80. (In Russ.)]. Доступно по: <http://mtstpgups.ru/files/trudy-mtst14-pdf.pdf>. Ссылка активна на 29.04.2021.
 10. Antlauf W, Bernardeau FG, Coates KC. Fast track. *Civil Engineering Magazine*. Vol. 74. Num. 11 [cited 29 April 2021] Available from: <https://http://www.pubs.asce.org/ceonline/ceonline04/1104feat.html>.
 11. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе. Гомель, 1995. 337 с. [Junickij AJe. *Strunnye transportnye sistemy: na Zemle i v kosmose. Gomel'*, 1995. 337 p. (In Russ.)].
 12. Юницкий А.Э. Публикации. [Anatoli Unitski. Publication [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://unitsky.engineer/author>. Ссылка активна на: 03.05.2021.
 13. Патент РФ на изобретение № 2536564/ 24.05.2013. Бюл. № 36. Яшнов А.Н., Суляев А.П. Способ монтажа рельса транспортной системы. [Pat. RUS № 2014712/ 15.06.94. Byul. № 36. Yashnov A.N., Suljaev A.P. *Sposob montazha rel'sa transportnoj sistemy.* Available from: <https://patenton.ru/patent/RU2536564C1> (In Russ.)]. Доступно по: <https://patenton.ru/patent/RU2536564C1>. Ссылка активна на: 05.05.2021.
 14. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / под ред. А.А.Берлина.

– СПб.: Профессия, 2008. – 560 с. [Kerber ML, Vinogradov VM, Golovkin GS, et al. *Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svojstva, tekhnologiya: ucheb. posobie*. Berlin AA, editor. Saint-Petersbourg: Professiya; 2008. 560 p. (In Russ.)].

15. Zoghi M, editor. *The international handbook of FRP composites in civil engineering*. CRC Press; 2013. 706 p.

Сведения об авторах:

Яшнов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 4319-4860; ORCID: 0000-0001-7435-3376; Scopus ID: 57204686937;
E-mail: yan_andr@mail.ru

Иванов Артем Николаевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 3895-8272; ORCID: 0000-0003-4445-6782;
E-mail: a.n.ivanov1@mail.ru

Information about the authors:

Andrey N. Yashnov, candidate of technical sciences, associate professor;
eLibrary SPIN: 4319-4860; ORCID: 0000-0001-7435-3376; Scopus ID: 57204686937;
E-mail: yan_andr@mail.ru

Artem N. Ivanov, candidate of technical sciences, associate professor;
eLibrary SPIN: 3895-8272; ORCID: 0000-0003-4445-6782;
E-mail: a.n.ivanov1@mail.ru

Цитировать:

Яшнов А.Н., Иванов А.Н. Струнные пролетные строения для магнитолевитационного транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 158–168. doi: 10.17816/transsyst202173158-168

To cite this article:

Yashnov AN, Ivanov AN. String superstructures for maglev transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):158-168. doi: 10.17816/transsyst202173158-168

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 338.47

DOI 10.17816/transsyst202173169-179

© Л. М. Чеченова

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

СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ ОАО «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ» В ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Цель: определение взаимосвязи между принятием политики устойчивого развития и эффективностью реализации инфраструктурных проектов развития ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»). Мы доказываем, что функционирование Холдинга в рамках установленных принципов устойчивого развития – Environmental, Social, and Corporate Governance (ESG) способствует улучшению его операционной деятельности.

Методы: Методология исследования строится на анализе международных подходов и критериев оценки по ESG-факторам с использованием аналитических процедур выявления причинно-следственных связей стратегии развития железнодорожного транспорта РФ в рамках ESG. Работа выполнена с ориентацией на текущее состояние железнодорожной отрасли РФ в контексте целей устойчивого развития и опирается на анализ отчетов международных организаций и данных ОАО «РЖД», обозначенных в Концепции финансирования проектов устойчивого развития.

Результаты: Дана оценка стратегическим приоритетам ОАО «РЖД» в стратегии устойчивого развития с обоснованием тенденций и критериев развития. Установлен формат соответствия стратегии развития железнодорожного транспорта России целям устойчивого роста с сопоставлением национальных проектов, государственных программ и стратегических целей развития транспортного комплекса РФ.

Заключение: Проведенный анализ подтверждает возможность использования основных результатов исследования при принятии решений устойчивого развития инфраструктурных отраслей экономики и, в частности, транспорта для привлечения «зеленых» инвестиций в проекты развития магистральной инфраструктуры с приоритетными установками по энергоэффективности, экологичности и безопасности железнодорожной транспортной системы.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, стратегия развития, приоритеты ОАО «РЖД».

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© L. M. Chechenova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**STRATEGIC PRIORITIES OF JSC “RUSSIAN RAILWAYS”
IN THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT**

Aim: to determine the relationship between the adoption of a sustainable development policy and the effectiveness of the implementation of infrastructure development projects of the JSC “Russian Railways”. We prove that the functioning of the Holding within the framework of the established principles of sustainable development – Environmental, Social, and Corporate Governance (ESG) contributes to the improvement of its operational activities.

Methods: The research methodology is based on the analysis of international approaches and assessment criteria for ESG factors using analytical procedures for identifying cause-effect relationships of the strategy for the development of railway transport in the Russian Federation within the framework of ESG. The work was carried out with a focus on the current state of the railway industry in the Russian Federation in the context of sustainable development goals and is based on the analysis of reports from international organizations and data from the JSC “Russian Railways”, indicated in the Concept of financing sustainable development projects.

Results: The evaluation of the strategic priorities of JSC “Russian Railways” in the strategy of sustainable development with the justification and criteria of development trends. The format of compliance of the strategy for the development of railway transport in Russia with the goals of sustainable growth was established with a comparison of national projects, government programs and strategic goals for the development of the transport complex of the Russian Federation.

Conclusion: The analysis confirms the possibility of using the main results of the study when making decisions on sustainable development of infrastructure sectors of the economy and, in particular, transport to attract “green” investments in projects for the development of backbone infrastructure with priority settings for energy efficiency, environmental friendliness and safety of the railway transport system.

Keywords: railway transport, development strategy, the priorities of JSC “Russian Railways”.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая трансформация транспортной отрасли становится неизбежным процессом адаптации бизнеса к новым реалиям и предпочтениям цифрового мира, поскольку определяющим фактором цифровых преобразований являются динамика изменений предпочтений современного потребителя и формы его потребления товаров и услуг.

В последние годы мы можем наблюдать кардинальную трансформацию транспортных систем в целом и прежде всего, железнодорожного транспорта. Это преобразование предопределено масштабными социальным, технологическим и экономическим прогрессом на рынке транспортных услуг, формируемым новой моделью потребления. Появляются новые рынки товаров и услуг, разрушаются и модифицируются старые. Значительные изменения коснулись геодинамики, организации и форм перевозок. Транспортная система переходит в формат экологичной (безопасной), социальной (высокомобильной) и экономической системы [1–3].

Вопросы устойчивого развития представляют интерес как для бизнес-сообществ, так и для национальной экономики государств. Концепция устойчивого развития предусматривает не только «зеленые» ориентиры, но и создает исключительный фактор инвестиционной привлекательности. При этом реализация инвестиционных проектов является более сознательным и менее спекулятивным процессом, в котором заинтересован не только бизнес, но и государство, что показано в исследовании [4].

Следует отметить исследования [5] взаимозависимости и взаимовлияния принципов устойчивого роста и стоимости транспортных компаний. Авторами проведен панельный анализ данных транспортных компаний, результаты которого подтверждают положительную взаимосвязь между оценкой экологического компонента (Env) и оценкой показателей стоимости компании и финансовых показателей, соответственно. Это подтверждает увеличение рыночной стоимости компании и доходности инвестируемых средств в случае положительной динамики показателей ESG.

Помимо этого, существуют убедительные исследования и доказательства того, что наращивание социального капитала положительно влияет на устойчивые бизнес-модели [6]. Ограниченность и сложность этого вопроса состоит в том, чтобы включить в анализ экологические, социальные и управленческие факторы, в частности их стандартизацию и классификацию. На наш взгляд, подход и методология данного исследования позволит частично решить данную проблему.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Новые ориентиры деятельности ОАО «РЖД» аккумулируют процессы поиска и внедрения проектов устойчивого развития, разработанных для обеспечения прозрачности основ для использования инструментов «зеленого» финансирования.

Целью данного исследования является определение взаимосвязи между принятием политики устойчивого развития и эффективностью реализации инфраструктурных проектов развития ОАО «РЖД». Наша задача – доказать, что функционирование Компании в рамках установленных принципов устойчивого развития ESG способствует улучшению его операционной деятельности.

В настоящее время основными задачами Холдинга является достижение национальных целей за счет расширения возможностей транспортной инфраструктуры и повышения экономической связанности территорий. Рассматривая стратегический характер развития железнодорожного транспорта нами структурированы ключевые сферы оказания транспортных услуг с учетом их положительного воздействия на бизнес-процессы, реализуемые в отрасли (Рис. 1).

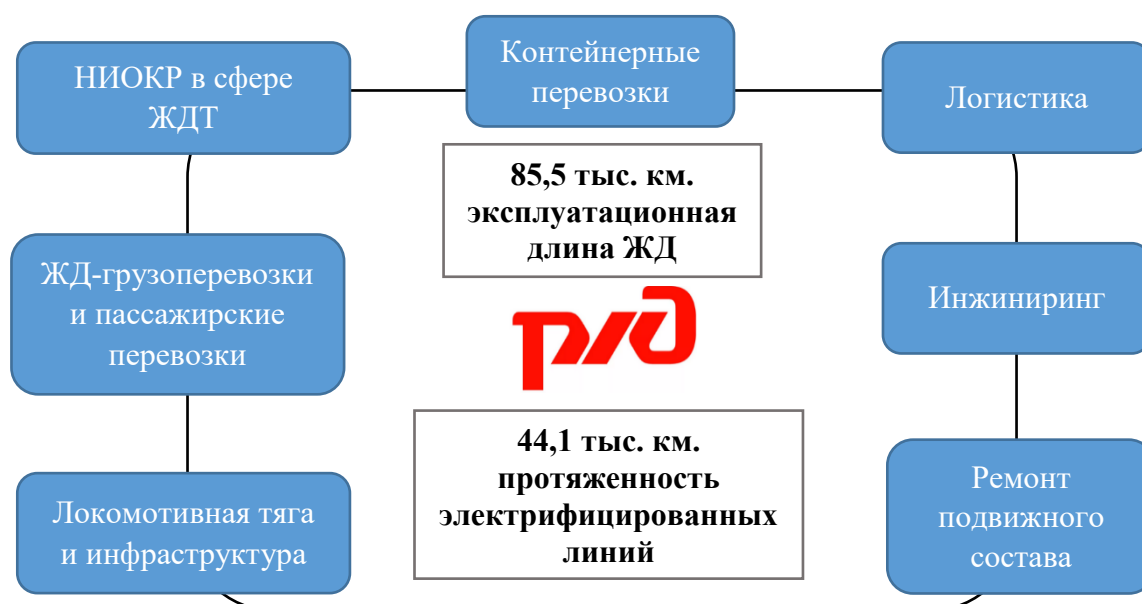


Рис. 1. Область деятельности ОАО «РЖД» по оказанию транспортных услуг
Источник: составлено автором

Необходимо отметить предварительную тенденцию ОАО «РЖД» в соблюдении принципов защиты окружающей среды и соблюдения мер безопасности, что закреплено в Экологической стратегии Холдинга до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. [7]. В настоящее время удельный вес компании по атмосферным выбросам, загрязнению сточных вод и созданию отходов веществ составляет не более 1 % по сравнению со всеми организациями, действующими на территории РФ. При этом в 2019 г. в соответствии с корпоративной Программой мероприятий по повышению экологической ответственности наблюдается сокращение

атмосферных выбросов, сбросов сточных вод и водопотребления в пределах 3–4 % по сравнению с предыдущим периодом.

С целью сокращения отрицательного влияния железнодорожного транспорта на окружающую среду, Холдингом активно используются «зеленые» технологии при электрификации путевых линий, предназначенных для пассажирских перевозок. Экономический эффект от реализации энергоэффективных проектов составил более 2 млрд. руб. в 2019 г., что свидетельствует о лидирующих позициях, занимаемых ОАО «РЖД» в числе международных грузовых и пассажирских железнодорожных перевозчиков в части энергетической и экологической эффективности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Определены стратегические приоритеты ОАО «РЖД» в соответствии с принципами устойчивого развития, представленные на Рис. 2:



Рис. 2. Стратегические приоритеты ОАО «РЖД» в области устойчивого развития
Источник: составлено автором

Основным мероприятием Стратегии развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г. является электрификация железнодорожной транспортной системы. Соответственно, задача Холдинга – оказывать поддержку экологически ориентированным проектам строительства и реконструкции инфраструктурных объектов, а также экологически направленным перевозкам ЖДТ, к которым можно отнести электропоезда и локомотивы на электрической тяге для сокращения вредных выбросов и минимизации энергопотребления. Оценивая ЖДТ как максимально энергоэффективный вид транспорта по сравнению с другими, следует отметить расширение инфраструктурной городской и высокоскоростной географии за последние 10 лет и минимальное 3-х процентное энергопотребление ЖД-сектором, на который приходится порядка 9 % мировых пассажироперевозок и 7 % грузоперевозок.

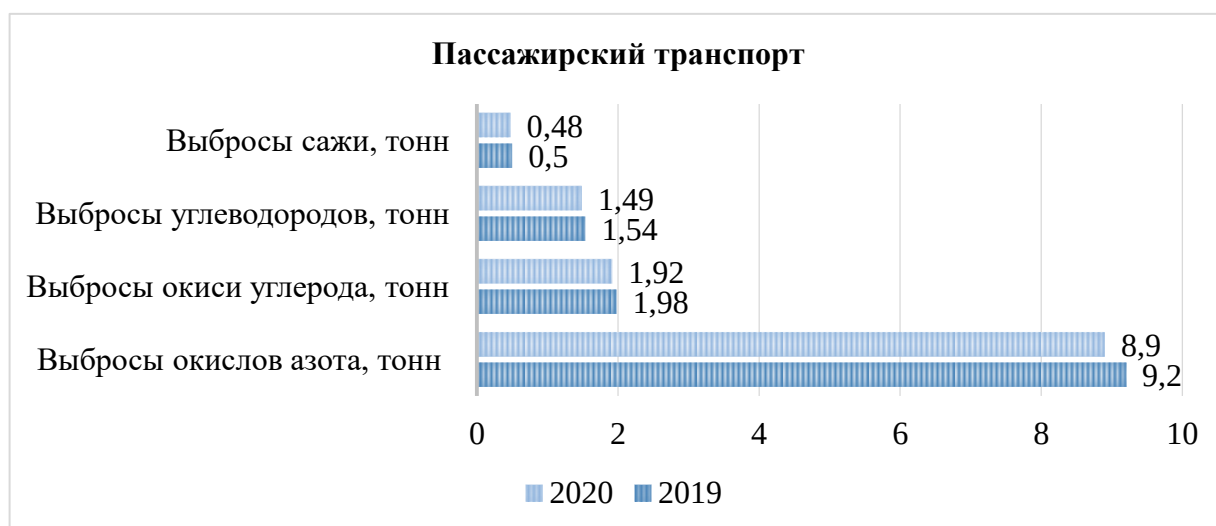


Рис. 3. Объемы выбросов от пассажирского ЖД-транспорта

В целях развития системы учета и управления выбросами парниковых газов утверждена Программа организационно-технических мероприятий, направленных на снижение выбросов парниковых газов в ОАО «РЖД» на 2020–2025 гг.

Реализация мероприятий в рамках указанной программы дает возможность дальнейшего сокращения прямых и косвенных выбросов вредных атмосферных веществ, которые возможно сократить за счет увеличения доли возобновляемой энергии, поставляемой в сеть, через которую поступает электричество для питания локомотивов.

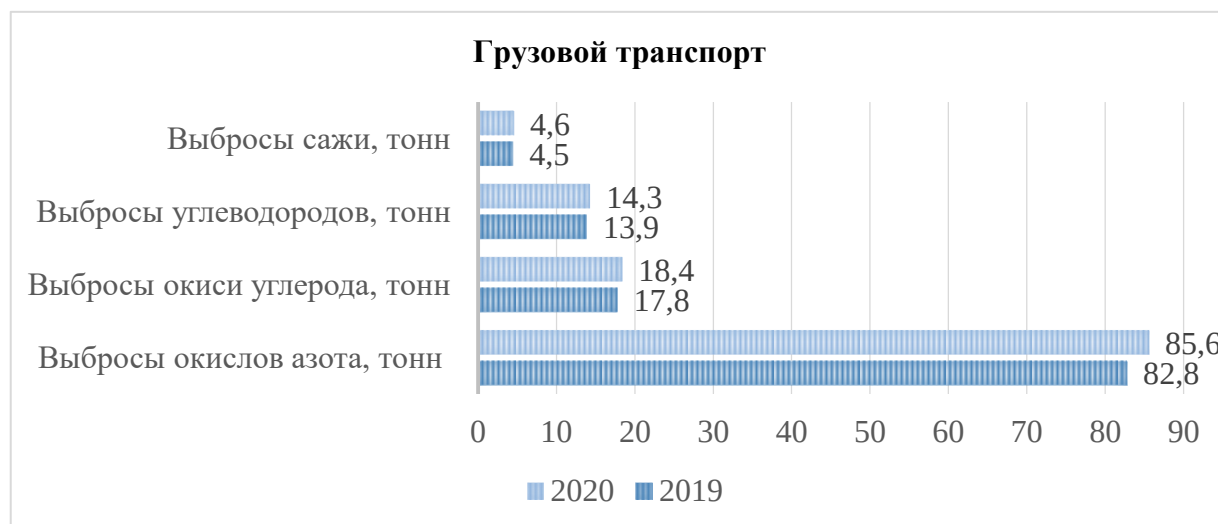


Рис. 4. Объемы выбросов от грузового ЖД-транспорта

Учитывая низкую энергоемкость и интенсивность выбросов углекислого газа на железнодорожном транспорте, развитие железнодорожного транспорта является важным элементом повышения энергетической безопасности и сокращения выбросов вредных веществ в атмосферу. Смещение объёмов пассажирских и грузовых перевозок с более интенсивных по выбросам вредных веществ в атмосферу видов транспорта (таких как личные автомобили, грузовики и самолеты) на железнодорожный транспорт существенно снизит количество таких выбросов и сократит негативное воздействие на окружающую среду. Ввиду того, что деятельность Компании сопряжена с постоянным расширением пропускной способности пассажирского общественного транспорта, строительством и модернизацией пассажирской инфраструктуры, и увеличением доли перевозок с использованием экологически чистого электрического транспорта, ОАО «РЖД» вносит важный вклад в декарбонизацию экономики. Это является основой для выпуска Компанией зеленых облигаций и предоставляет инвесторам возможность поддержать финансирование низкоуглеродных транспортных активов и инфраструктуры в РФ.

2. Обосновано привлечение ОАО «РЖД» инструментов зеленого финансирования в целях реализации экологических инфраструктурных проектов

Выпуск зеленых облигаций обеспечивает гарантированное привлечение капитальных вложений и инвестиций для экологически благоприятных проектов как текущих, так и перспективных. Принципы зеленых облигаций (GBP) подразумевают прозрачность и раскрытие информации, способствуют целостности в развитии рынка зеленых облигаций путем уточнения подхода к выпуску зеленых облигаций.

GBR предназначены для широкого использования рынком: они предоставляют эмитентам рекомендации по ключевым компонентам, участвующим в запуске надежной зеленой облигации; они помогают инвесторам, обеспечивая доступность информации, необходимой для оценки воздействия инвестиций в экологические ресурсы, их инвестиций в зеленые облигации; и они помогают андеррайтерам, перемещая рынок к стандартному раскрытию информации, что существенно облегчает процесс реализации сделки. Одним из участников рынка зеленых облигаций является ОАО «РЖД» (Табл.).

Таблица. Экономический эффект от внедрения проекта

Код облигаций		
XS1843437036	CH0522690715	RU000A102564
Срок погашения		
23 мая 2027 (8 лет)	12 марта 2026 (6 лет)	Без установленного срока погашения
Размер выпуска		
500 000 000 евро	250 000 000 шв. франков	100 000 000 000 руб.
Купон		
2,2 % фиксированный, ежегодный	0,84 % фиксированный, ежегодный	7,25 % плавающий, каждые 182 дня

Источник: составлено автором

3. Систематизированы приоритеты ОАО «РЖД» в стратегии устойчивого развития.

Анализ текущего состояния железнодорожной отрасли в контексте принципов ESG позволил нам обозначить основные приоритеты ОАО «РЖД» в стратегии устойчивого развития, исходя из стратегических задач Холдинга и проектов, позволяющих снизить негативное воздействие на окружающую среду (Рис. 5).

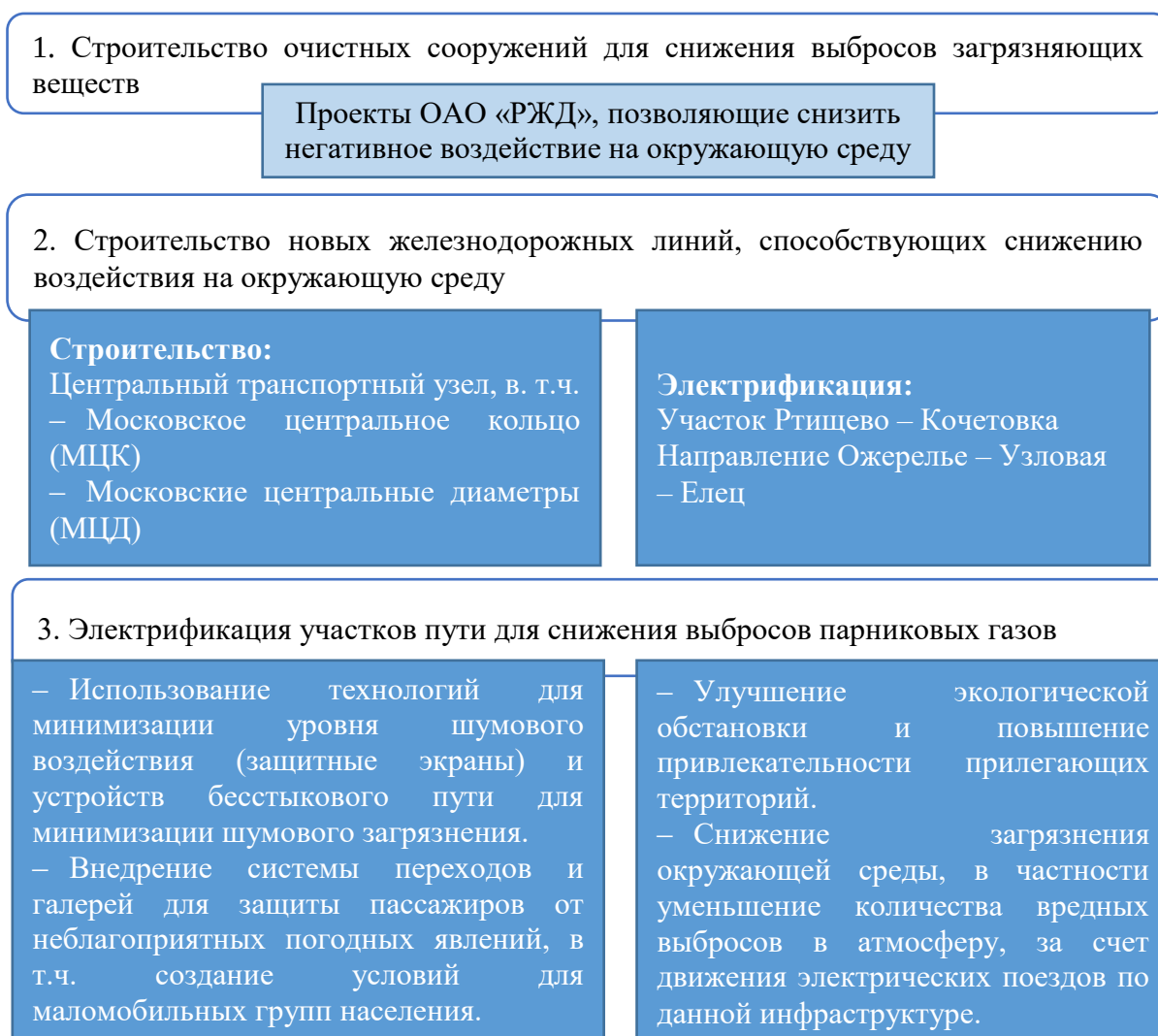


Рис. 5. Экономический эффект от внедрения проекта
Источник: составлено автором

Оценивая влияние «зеленых» проектов ОАО «РЖД» на экономический рост отрасли в целом, необходимо руководствоваться соотношением затрат и ожидаемых результатов по итогам внедрения проектов, согласованных с основными принципами устойчивого роста, что предопределяет тематику наших будущих исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтверждает, что Россия и транспортный сектор в частности достигли незначительных результатов при решении глобальных экологических проблем. Стереотипы развития Холдинга сместились в пользу экологичности, энергоэффективности и безопасности перевозок. Это обязательно приведет к трансформации

отрасли, появлению новых бизнес-моделей и пересмотру структуры стоимости транспортной услуги, поскольку проекты устойчивого развития генерируют свои идеи как финансово привлекательные и социально значимые. Фактически устойчивыми могут считаться любые инфраструктурные проекты, если они соответствуют принципам устойчивого развития. В более узком смысле – «зелеными» могут быть любые инициативы, которые удовлетворяют определенным экологическим требованиям. В мировой практике имеются факты, когда объекты инфраструктуры создавались с применением механизмов ГЧП и в дальнейшем были сертифицированы по «зеленым» стандартам.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Wang X, Wong YD, Yuen KF, Li KX. Environmental governance of transportation infrastructure under Belt and Road Initiative: A unified framework. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020;(139):189-199. doi: 10.1016/j.tra.2020.03.001.
2. Jong E, Vijge M. From Millennium to Sustainable Development Goals: Evolving discourses and their reflection in policy coherence for development. *Earth System Governance*. 2021;(7). doi: 10.1016/j.esg.2020.100087.
3. Svatovskaya L, Drobyshv I, Mikhailova K, Khamenok N. Criteria of green geocoprotective technologies in transport construction. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020;(50):431-440. doi: 10.1007/978-981-15-0454-9_45
4. Shaydurova A, Panova S, Fedosova R, Zlotnikova G. Investment Attractiveness of “Green” Financial Instruments. *Journal of Reviews on Global Economics*. 2018;(7):710-715. doi: 10.6000/1929-7092.2018.07.65.
5. Abdi Y, Li X, Càmara-Turull X. Impact of Sustainability on Firm Value and Financial Performance in the Air Transport Industry. *Sustainability*. 2020;12(23):1-23. doi: 10.3390/su12239957
6. Kluza K, Ziolo M, Spozc A. Innovation and environmental, social, and governance factors influencing sustainable business models - Meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2021;(303). doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127015
7. Экологическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2020 года и перспективу до 2030 года. [Ekologicheskaya strategiya OAO “RZhD” na period do 2020 goda i perspektivu do 2030 goda. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=958>. Ссылка активна на 07.06.2021.
8. Социальная ответственность. Сокращение выбросов парниковых газов. [Socialnaya otvetstvennost. Sokrashchenie vybrosov parnikovyyh gazov. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://company.rzd.ru/ru/9386/page/103290?id=17515>. Ссылка активна на 07.06.2021.
9. Resolution adopted by the General Assembly on 6 July 2017, Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development. [Internet]. [cited 2021 June 7]. Available from: <http://ggim.un.org/meetings/2017->

- 4th_Mtg_IAEG-SDG-NY/documents/A_RES_71_313.pdf
10. Kurenkov P, Pokrovskaya O, Anastasov M, Sokolov M, Bochkov A. Study of the current state of the transport infrastructure of road and rail transport of the Russian Federation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;698(6). doi: 10.1088/1757-899X/698/6/066064
 11. Pokrovskaya O, Kurenkov P, Khmelev I, Goncharenko S. Evolutionary and functional development of transport nodes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;918(16). doi: 10.1088/1757-899X/918/1/012033
 12. Pokrovskaya O, Fedorenko R, Kizyan N. Cargo transportation and commodity flows management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;(918). doi: 10.1088/1757-899X/918/1/012050
 13. Shavshukov V, Zhuravleva N. Global Economy: New Risks and Leadership Problems. *International Journal of Financial Studies*. 2020;8(1). doi: 10.3390/ijfs8010007
 14. Panova Y, Korovyakovskiy E, Semerkin A, et al. Russian railways on the Eurasian market: issue of sustainability. *European Business Review*. 2016;29(6):664-679. doi: 10.1108/EBR-01-2016-0008
 15. Petriaev A, Svatovskaya L, Baidarashvili M, Sakharova A. Green technology with geosynthetics prevent environment from railway dangerous pollutants. In: 11th International Conference on Geosynthetics (ICG); 2018 Sep 16–21; Seoul, Korea; 2018. p. 1554-1560.

Сведения об авторах:

Чеченова Лиана Мухамедовна, кандидат экономических наук;
eLibrary SPIN: 7593-2214; ORCID: 0000-0002-2641-9454;
E-mail: liana1981-149@mail.ru

Information about the authors:

Chechenova Liana Muhamedovna, PhD in Economics;
eLibrary SPIN: 7593-2214; ORCID: 0000-0002-2641-9454;
E-mail: liana1981-149@mail.ru

Цитировать:

Чеченова Л.М. Стратегические приоритеты ОАО «Российские железные дороги» в области устойчивого развития // *Инновационные транспортные системы и технологии*. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 169–179. doi: 10.17816/transsyst202173169-179

To cite this article:

Chechenova LM. Strategic priorities of JSC “Russian Railways” in the sustainable development. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):169-179. doi: 10.17816/transsyst202173169-179