

ISSN 2413-9203

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

TRANSPORTATION
SYSTEMS AND
TECHNOLOGY
peer-review journal

transsyst.ru

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

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

«ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

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

ИНДЕКСАЦИЯ

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

КОНТАКТЫ

Адрес: 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 115, ауд. 9/11-5
E-mail: info@trassyst.ru
WEB: www.trassyst.ru
Телефон: +7 (812) 6198152; +7 (911) 2384445

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

СВИДЕТЕЛЬСТВО о регистрации средства массовой информации

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

ОПИСАНИЕ ЖУРНАЛА

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

ПУБЛИКАЦИЯ В ЖУРНАЛЕ

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

ПОДПИСКА

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

**ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ
И ТЕХНОЛОГИИ**

Том 7, № 1

2021

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА, НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

Антонов Юрий Федорович, д.т.н., профессор ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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;

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

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

Паньчев 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 Паняпиватского института управления, Паккред, Таиланд;

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

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

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

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

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

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

FOUNDER AND PUBLISHER

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

"TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY"

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

INDEXING

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

CONTACTS

Address: 190031, St. Petersburg, 115 Moskovskiy Ave., room 9/11-5
E-mail: info@trassyst.ru
Website: www.trassyst.ru
Phone: +7 (812) 6198152; +7 (911) 2384445

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

AIMS & SCOPE

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

JOURNAL CONTENT SELECTION

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

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

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

SUBSCRIPTION

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

TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY

Vol. 7, Issue 1

2021

ELECTRONIC PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF, THE SCIENTIFIC EDITOR

Yuri Antonov, Dr.Sc., Professor PSTU, St. Petersburg, Russia

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Aleksandr Bogdanov, Dr. Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;
Vladimir Vereskun, Dr. Sc., Professor, Rector of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Rivner Ganiev, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor, Director Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
Vasily Glukhikh, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor, Scientific Adviser at JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», St. Petersburg, Russia;
Johannes Kluehspies, 2nd Dr.'s Degree, Full Professor at Deggendorf Institute of Technology, Munich, Germany;
Vladimir Kolesnikov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor, the President Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Irina Kruchinina, Dr.Sc., Acting Director of Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia;
Guobin Lin, PhD, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Director, Professor, Tongji University, Shanghai, China;
Weili Li, Ph.D., Professor, Beijing Jiaotong University, Beijing, China;
Zhixun Ma, PhD, Associate Professor, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Tongji University, Shanghai, China;
Radik Mulyukov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Physics and Mathematics, Director of Superplasticity Metals Institute for Metals Superplasticity Problems at RAS, Ufa, Russia;
Sergey Mylnikov, PhD, Associate professor, Scientific secretary LCC "Eco-Vector", St. Petersburg, Russia;
Vladimir Nikitenko, Dr. Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics Russian University of Transport, Moscow, Russia;
Viktor Nikitin, Dr.Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;
Fei Ni, PhD, Assistant Researcher, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center, Tongji University, Shanghai, China;
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
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Транспортные и транспортно-логистические системы</p> <p>Janić M.</p> <p>Analysing and Modeling Performances of a Long-haul Air Route Network</p>	5	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Transport And Transport & Logistics Systems</p> <p style="text-align: right;">Janić M.</p> <p>Analysing and Modeling Performances of a Long-haul Air Route Network</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов</p> <p>Васильев К.А., Борисов В.А., Аверченко Г.А.</p> <p>Понтонные (наплавные) мосты из некондиционных труб полиэтилена низкого давления</p>	37	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Design and Construction of Roads, Subways</p> <p style="text-align: right;">Vasiliev K.A., Borisov V.A., Averchenko G.A.</p> <p>Ponton (flow) Bridges from Metal Polyethylene Pipes</p>
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ		ORIGINAL STUDIES
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Математическое моделирование</p> <p>Смагин В.А., Бубнов В.П., Султонов Ш.Х.</p> <p>Математические модели для расчета количественных характеристик оптимального квантования информации</p>	46	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Math Modeling</p> <p>Smagin V.A., Bubnov V.P., Sultonov Sh.Kh.</p> <p>Mathematical models for calculating the quantitative characteristics of the optimal quantization of information</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника</p> <p>Таран В.Н., Шевлюгин М.В., Шандыбин А.В.</p> <p>Точность численных методов оценки внешних электрических воздействий</p>	59	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Engineering</p> <p style="text-align: right;">Taran V.N., Shevlyugin M.V., Shandybin A.V.</p> <p>The Accuracy of Numerical Methods for Assessing External Electrical Influences</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника</p> <p>Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Ле К.Т., Ахсаниев Г.Р.</p> <p>Вычисление интегрального показателя надежности тягового электрооборудования городского электротранспорта</p>	71	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Engineering</p> <p style="text-align: right;">Litvinenko R.S., Aukhadeev A.E., Le K.T., Akhsaniev G.R.</p> <p>Calculation Integral Reliability Indicator of the Urban Electric Transport Traction Electrical Equipment</p>

<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехника</p> <p>Соломин В.А., Соломин А.В., Трубицина Н.А., Замшина Л.Л.</p> <p>Шаговые асинхронные двигатели для электропривода</p>	85	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrical Engineering</p> <p>Solomin V.A., Solomin A.V., Trubitsina N.A., Zamshina L.L.</p> <p>Stepper induction motors for electric drive</p>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Транспортные и транспортно-логистические системы</p> <p>Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М., Кравец А.И., Митровска Д., Большихшапок И.С.</p> <p>Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали в Санкт-Петербурге</p>	99	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Transport And Transport & Logistics Systems</p> <p>Senkin N.A., Filimonov A.S., Khalimbekov I.M., Kravets A.I., Mitrovska D., Bolshikhshapok I.S.</p> <p>Proposals for the construction of overpass structures and transport hubs for the high-speed highway in St. Petersburg</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p>Бельницкий Д.С.</p> <p>Модель результативного рынка и технология грузовых железнодорожных перевозок</p>	124	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p>Belnitsky D.S.</p> <p>Model of effective market and technology of freight railway transportation</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p>Фёдорова М.В.</p> <p>Предложения по тарифной политике на линии магнитолевитационного транспорта</p>	139	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p>Fedorova M.V.</p> <p>Tariff Policy Offers on the Line of Magnetic Levitation Transport</p>

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Transport and Transport & Logistics Systems

DOI 10.17816/transsyst2021715-36

© **M. Janić**

University of Maribor

(Celje, Slovenia)

University of Belgrade

(Belgrade, Serbia)

ANALYSING AND MODELING PERFORMANCES OF A LONG-HAUL AIR ROUTE NETWORK

Abstract. This paper deals with analyzing and modelling performances of a long-haul air route network operating as the queuing network. The network consists of the routes/tracks with flight levels serving aircraft/flights as the “service channels”. The main network performances are the “ultimate” and “practical” capacity of “service channels”, the aircraft/flight demand, delays before entering and total time of aircraft/flights spending in the network, and the related generalized costs including those of airlines, air passengers, policy makers and society. The analytical models of the particular network performances and three routing or assignment models/procedures for matching the aircraft/flight demand to capacity are developed and applied to the long-haul air route network in the North Atlantic airspace between Europe and North America.

The results have indicated that. the network capacity has been strongly dependent on the number of routes/tracks and flight levels, i.e., “service channels” and their “ultimate” and/or “practical” capacity. The “ultimate” capacity has been mainly influenced by the ATC (Air Traffic Control) separation rules applied between aircraft/flights operating in the same directions. The “practical” capacity has been strongly influenced by the “ultimate” capacity and the average delays imposed on aircraft/flights before entering the network. The rather superior and close to optimal model/procedure for matching demand to capacity has been routing or assignment of the aircraft/flights demand in proportion to the “ultimate” or “practical” capacity of particular “service channels” minimizing the total generalized costs of the actors/stakeholders involved.

Keywords: Long-haul air route network, performances, analysis, modelling, aircraft/flight demand, route/track capacity, assignment models/procedures, evaluation, North Atlantic airspace.

1. INTRODUCTION

The ATC (Air Traffic Control) is considered as one of the main components of the air transport system together with airports and airlines. This includes: i) the controlled airspace established over the particular countries, continents and oceans; ii) technical/technological components such as radio-

navigational facilities and equipment located on the ground and in space (satellites) and their complements at aircraft; and iii) the operating staff (the ATC controllers on the ground) and the aircraft crews. The ATC controllers use the operating rules and procedures in serving its users – aircraft/flights – under given conditions [1–5].

The main objectives of ATC are to serve the aircraft/flights in the airspace safely, efficiently, and effectively. Safety implies serving the aircraft/flights without the risk and occurrence of air traffic incidents/accidents due to the already known reasons. Efficiency implies operating without imposing unnecessary congestion and delays on aircraft/flights. Effectiveness relates to serving the aircraft/flights at as low as possible their and own operating costs [2].

In general, regarding the length, the flights are divided into the short, medium, and long-haul. The short-haul flights (from 0.5 to 3 hours) are usually those between airports in the same country. The medium-haul flights (from 3 to 6 hours) are those between airports in the same large country (for example, U.S., Russia, China) and between different countries. The long-haul flights (longer than 6 hours) are generally those between airports at the ends of the same and different continents [7].

The ATC handles the aircraft/flights in the air route networks established in the airspace of its responsibility. If over the ground, these aircraft/flights are radar-monitored and separated by the ATC minimum horizontal and vertical-distance based separation rules. The over-water (ocean) segments of flights are monitored in discrete time intervals by communicating of ATC controllers and pilots. In these cases, the ATC minimum horizontal time-based and vertical-distance separation rules are applied.

The relatively stable and continuous growth of the world passenger air traffic (in RPK (Revenue Passenger-Kilometres)) at an average annual growth rate of 5.0 % driven by the global growth of GDP (Gross Domestic Product) of 2.8 % since 1995 until the start of COVID-19 pandemic disease, has continuously risen the question of the ATC performances in terms of fulfilling the above-mentioned objectives - providing safe, efficient, and effective services [8]. Despite in the year 2020 the air traffic has dropped for about 61 % compared to the pre-pandemic level, the ATC will continue to deal with the same objectives during and after recovery of air traffic. including that in the recovered long-haul air route networks. Consequently, the performances of these networks such as the spatial configuration, aircraft/flight demand, capacity, their relationship causing the aircraft/flight congestion and delays, and related generalized costs of actors/stakeholders involved would again come of increased research and practical interests.

This paper deals with an analysis and modelling of performances of a long-haul air route network established in the large controlled airspace. The

network is modelled as the queuing network serving the aircraft/flights demand by the capacity of its nodes and links. In addition to this introductory, the paper consists of four other sections. Section 2 describes the characteristics of this air route network, pattern of controlling the aircraft/flights there, and the related performances. Section 3 presents the analytical models for estimating these performances including the models/procedures for matching demand to capacity. Section 4 illustrates an application of the proposed models to the transatlantic air route network over Atlantic Ocean serving the air traffic between Europe and North America according to the specified “what-if” scenario(s). the last section summarizes some conclusions.

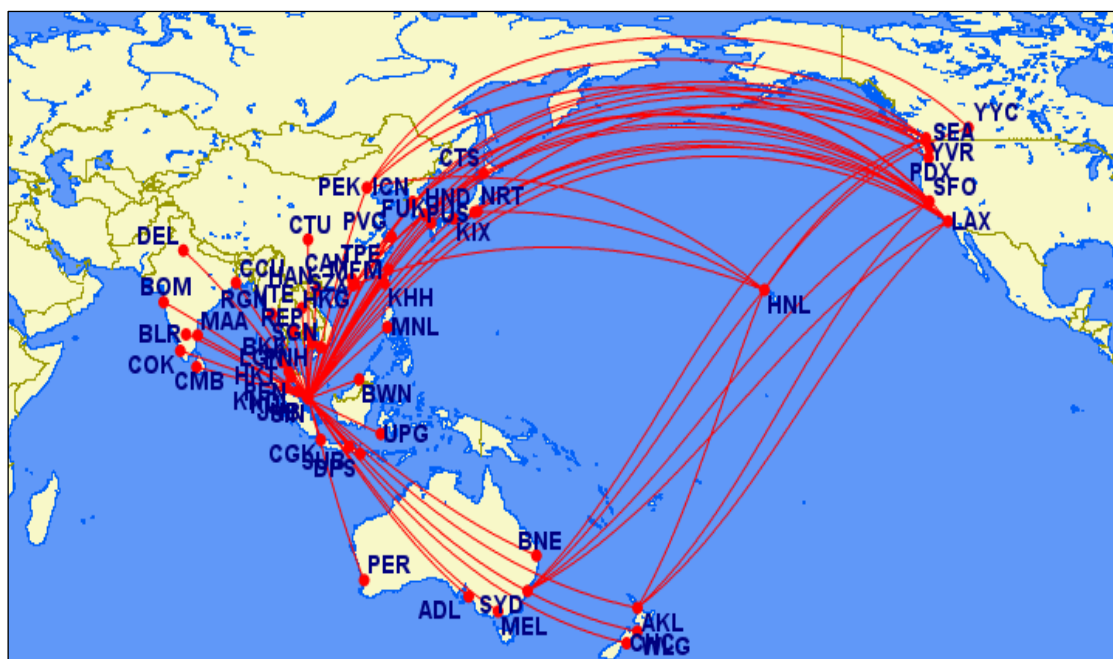
2. THE AIR ROUTE NETWORK

2.1 Configuration. The considered long-haul air route network is characterized by referring to an analogy with the communication networks operating as the queuing networks as follows [9]:

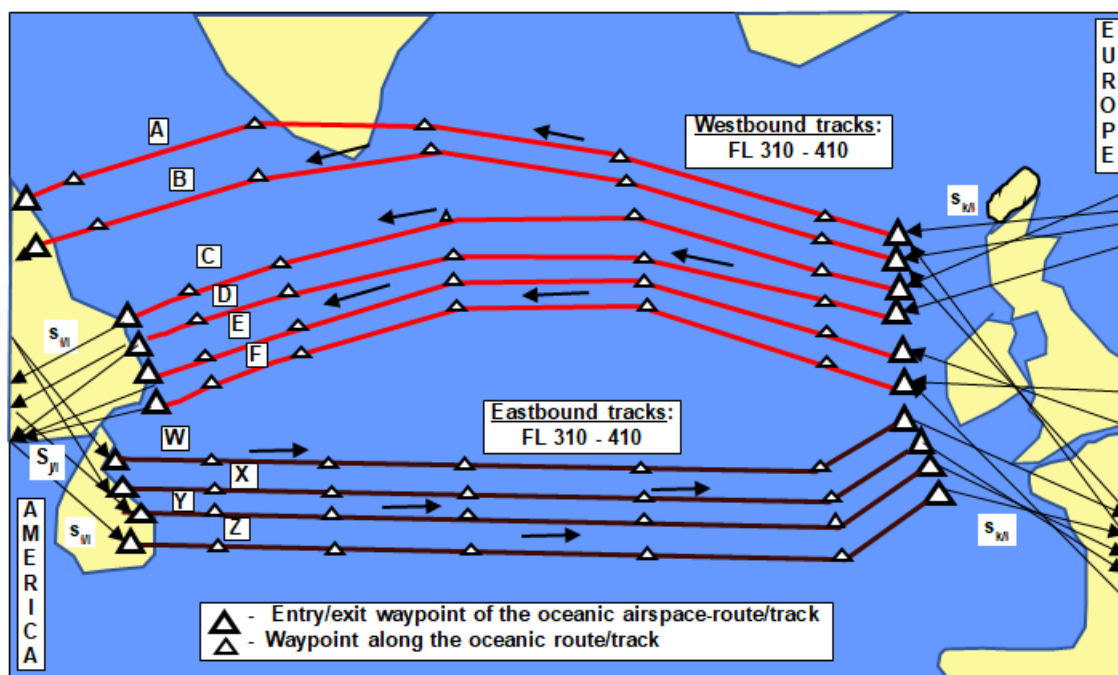
Network “node”	The central ATC centre, which monitors, controls, and manages the aircraft/flights in the network
Network “links”	The routes/tracks, each with the flight levels as the “service channels” of the aircraft/flights requesting service under given conditions.
Aircraft/flight demand	Aircraft/flights are characterized by origin and destination airports and the preferred routes fully or partially passing through the given air route network.
Matching demand to capacity	Models/procedures for routing or assigning the aircraft/flights to the particular network’s “service channels” according to the specified rules/criteria.
Aircraft/flight total delays	The sum of the average delays before entering and the average delay-free service time in the particular “service channels” of the network.
Generalized costs	Those of the actors/stakeholders involved.

The main actors/stakeholders involved in dealing with the above-characterized air route network are the users – airlines and air passengers, the service provider – ATC, and policy makers and society. The users are mainly interested in the aircraft/flight delays and their related generalized costs. The ATC intends to provide safe, effective, and, efficient services to aircraft/flights under given conditions. The policy makers and society mainly consider the impacts of these aircraft/flights on the environment in terms of global GHG

emissions and related costs/externalities. The examples of spatial configuration of the above-mentioned long-haul air route network are shown on Fig. 1 (a, b).



a) Airline-based network - Transpacific airlines [10]



b) ATC-based network - Routes/tracks in the North Atlantic airspace [11, 12]

Fig. 1. Examples of the spatial schemes of long-haul air route networks

Fig. 1a shows the scheme of the long-haul network over Pacific Ocean consisting of the routes of airline flights between the origin and destination

airports on the West Coast of U.S. and East Coast of Asia and Australia. Fig. 1b shows the ATC structured air route network with air routes/tracks over Atlantic Ocean between Europe and North America.

2.2 Performances. The main performances of the above-mentioned air route networks are generally their aircraft/flight demand, capacity, their relationship causing the aircraft/flights congestion and delays, the impacts of GHG emissions on the environment, and related generalized costs of the main actors/stakeholders involved.

The aircraft/flight demand requests service in the air route network during a given period of time, which can be an hour, day or year. For the short-term operational purposes and prediction of the ATC controller's workload up to the certain maximum values and consequently capacity, the daily and hourly number of aircraft/flights is usually relevant [13–15].

The capacity of air route network is usually expressed by the maximum number of aircraft/flights, which can be served during a given period of time under given conditions. These can be the constant demand for service, which refer to the “ultimate” capacity and the average delay imposed on the aircraft/flight before entering the network referring to the “practical” capacity. In general, this capacity is mainly dependent on the network configuration characterized by the number of routes/tracks (i.e., links) and FLs (Flight Levels), and the ATC minimum separation rules applied between the aircraft/flights. The aircraft/flights on the FLs operating in the same direction are separated by the ATC minimum time- or distance-absed horizontal separation rules. Those on different closest FLs operating in the same and/or opposite directions are separated by the ATC minimum vertical separation rules. The capacity based on the corresponding ATC controller's workload is expressed by the number of aircraft/flights, which can be simultaneously controlled in the network during a given period of time under the predefined maximum workload. The short-term period of time for operating and planning the capacity can be an hour or day [2, 16].

The time and spatial interaction between the demand and the air route network capacity can cause congestion and delays of the affected aircraft/flights. In general, these happen as soon as the demand exceeds the capacity of the particular routes/tracks, i.e., links. As such, if predicted/expected in advance, these delays can be realized at the origin airports or otherwise along the corresponding assessing routes to the network [2, 17, 18].

In order to deal with the above-mentioned performances of the long-haul air route networks in the given context the pre-conditions are as follows: i) the network characterized by the number and spatial configuration of routes/tracks (i.e., network links) supported by the facilities and equipment used by the ATC and the aircraft pilots; ii) the pattern of aircraft/flight demand requesting service

during a given period of time in terms of intensity, structure, time and space distribution in the network; and iii) the models/procedures for matching demand to capacity aiming at minimizing the generalized costs of the actors/stakeholders involved.

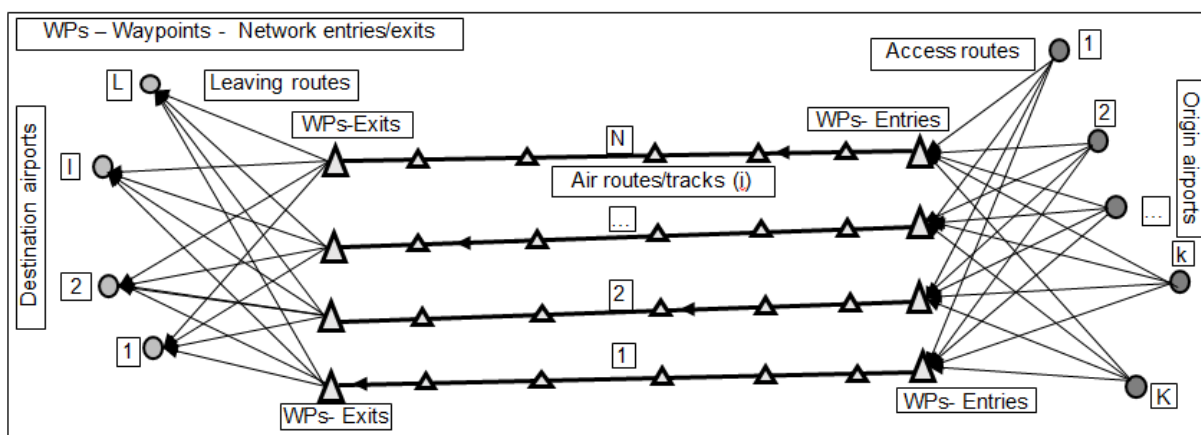
3 MODELLING PERFORMANCES OF A LONG-HAUL AIR ROUTE NETWORK

3.1 Literature review. The research on analysing and modelling performances of the air route networks similar to that presented in the given context has been scarce and actually not existing in an explicit form. Therefore, this rather short literature review presents the research related to analysing performances of air route networks similar to that presented in this paper and some studies by the air transport industry. For example, this has been the long-standing, exhaustive, and rather matured academic research on the analytical and simulation modelling of the airport and airspace “ultimate” and “practical” capacity based on the stochastic and deterministic queuing theory [2, 17, 19, 20]. The queuing networks have been also the subject of intensive academic research. The analytical models for estimating performances of these networks such as the demand, capacity, average customers delay and the total customers time in the network and related costs, different routing procedures enabling minimization of both previous individually (per customer) and the system (all customers), and prioritizing of particular categories of customers using different criteria have been under focus. The applications of these models have primarily been considered for the computer networks [9, 18, 21, 22].

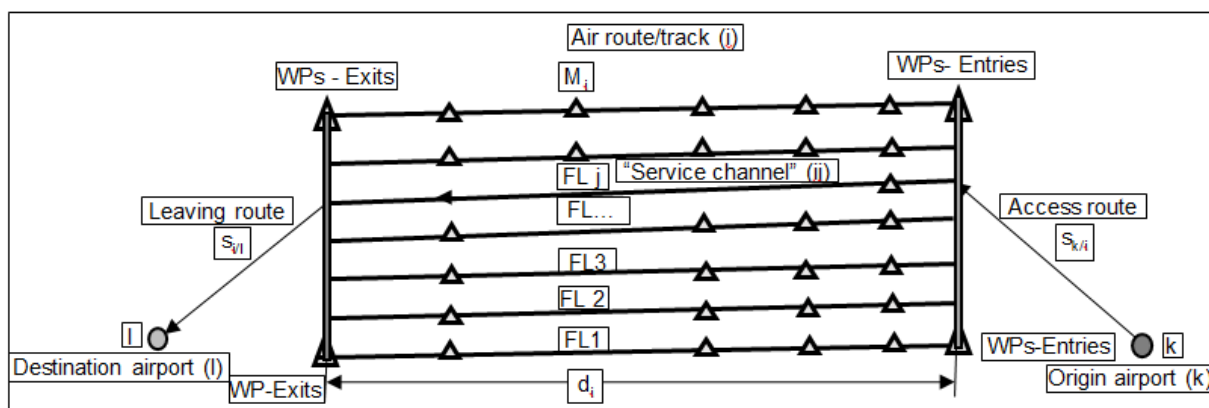
The research closely related to operations of the long-haul air route networks has mainly dealt with optimization of the aircraft/flight trajectories subject to different criteria. In particular, the effects of new technologies contributing to the aircraft/flight precise guidance, reducing the ATC separation rules, and the impacts of weather intended to more efficient and safer (conflict-free) operations have been under focus in the transatlantic airspace as the most congested overwater airspace in the world [23–27]. Some research has also dealt with the analysis of fuel efficiency of airline flights in the transatlantic airspace [28].

The relevant studies carried out by the aviation industry stakeholders have mostly included the long-term forecasting of the aircraft/flight demand and potential effects of the ATC innovative technologies on the capacity and efficiency of operations of the given (Transatlantic) air route network [29, 30].

3.2 Configuration of the network. The simplified spatial configuration of the long-haul air route network synthesized from that on Fig. 1b and shown on Fig. 2 (a, b) is considered for analysis and modelling performances.



a) Horizontal layout



b) Vertical layout

Fig. 2. Simplified scheme of the air route network for the purpose of analysing and modelling performances

As can be seen, the network consists of (N) routes/tracks of the approximately same average length (d_i) each with (M_i) available FLs (Flight Levels). The aircraft/flights between (K) origin and (L) destination airports are handled in the network. They access the network along (K) routes connecting their origin airports with the entry points of the network defined as the geographical WPs (Way Points). After passing through the network, these aircraft/flights leave the network along (L) routes connecting the corresponding network exit WPs and their destination airports.

3.3 Assumptions. In addition to the above-mentioned configuration, modelling of the network performances similarly as that of the queuing network is based on the following assumptions [2, 18]:

- The network consists of the fixed set of routes/tracks of approximately equal length each with several FLs (Flight Levels); they represent the longest (second in order) segments of three-segment long-haul routes spreading between the origin and

destination airports of aircraft/flights where cruising phase of flights is performed. The first in order segments enable access of the aircraft/flights from the origin airports to the entries of particular network “service channels”. The last third in order segments enable the aircraft/flights reaching the destination airports after leaving the network “service channels”;

- The routes/tracks of the network approximately parallel to each other are separated by the ATC specified minimum lateral distance(s);
- The routes/tracks and their FLs operate as the “service channels” independently of each other;
- The aircraft/flights routed or assigned to the particular “service channels” stay there all the time; they are handled by the constant capacity of “service channels” based on the ATC time-based horizontal and vertical minimum separation rules; those on the same FLs maintain approximately the same speed thus eliminating the potential overtaking conflicts and needs for their resolving by changing FLs and/or route/track;
- The intensity of aircraft/flight demand is usually lower than the capacity of particular “service channel(s)” and that of the corresponding ATC controllers; however some delays can be imposed on particular aircraft/flights before entering the network due to the inherent randomness of their arrivals at the entry WPs of particular “service channels”; depending on their length these delays can be realized at the origin airports just before the aircraft/flight departures in the scope of the “ground holding” procedures and/or along the access routes to the entry WPs”; and
- Different models/procedures for routing or assigning the aircraft/flights to the particular “service channels” depending on their expected performances can be applied under given conditions.

3.4 The models of performances. The models of performances of a given air route network are developed based on the above-mentioned assumptions.

3.4.1 “Ultimate” capacity. The “ultimate” capacity of a given air route network is defined as the maximum number of aircraft/flights, which can be served during the specified period of time under conditions of the constant demand for service [2, 20, 31]. The “ultimate” capacity of the route/track, i.e., the “service channel” (i), can be estimated as follows:

$$\mu_i(\Delta t) = \sum_{j=1}^{M_i} 1/\tau_{ji/min}(\Delta t) \quad (1a)$$

where

$\tau_{ji/min}(\Delta t)$ is the ATC minimum time-based separation rules between the aircraft/flights on the FL (j) of the “service channel” (i) during time

(Δt) (min).

Under conditions of the constant demand of “perfectly packed” aircraft/flights separated by the ATC minimum separation rules requesting service in the particular “service channels”, the “ultimate” capacity of the network from Eq. 1a is estimated as follows:

$$\mu(\Delta t) = \sum_{i=1}^{N(\Delta t)} \mu_i(\Delta t) \quad (1b)$$

where all symbols are analogous to those in the previous Eqs.

3.4.2 “Practical” capacity. The “practical” capacity of a given air route network can be expressed by the maximum number of aircraft/flights handled during a given period of time under conditions of imposing an average delay on each of them before entering the network. If the aircraft/flights arrive at the “service channel” (i) according to the Poisson processes and are served by the constant “ultimate” capacity (1a), each “service channel” can be considered to operate as $M/G/1$ queuing system. Under the steady-state conditions when the intensity of aircraft/flight demand $\lambda_i(\Delta t)$ remains always lower than the “service channel’s” “ultimate” capacity $\mu_i(\Delta t)$, i.e., $\rho_i(\Delta t) = \lambda_i(\Delta t)/\mu_i(\Delta t) < 1$, the average delay imposed on of aircraft/flights before entering it is estimated as follows [2, 18, 32, 33]:

$$\bar{w}_i(\Delta t) = \frac{\lambda_i(\Delta t) \cdot \{1/[\mu_i(\Delta t)]^2 + \sigma_{i/s}^2\}}{2 \cdot [1 - \lambda_i(\Delta t)/\mu_i(\Delta t)]} \quad (2a)$$

where

$\sigma_{i/s}$ is the standard deviation of the service time of aircraft/flights on route/track (i) independent of time (Δt) (min/ac).

After specifying the maximum average delay in (2a) as $\bar{w}_i(\Delta t) \equiv w_i^*(\Delta t)$, the intensity of aircraft/flights representing the “practical” capacity of the “service channel” (i) operating under conditions $\rho_i(\Delta t) < 1$ can be estimated as follows:

$$\lambda_i^*(\Delta t) \equiv \mu_i^*(\Delta t) = \frac{2 \cdot w_i^*(\Delta t) \cdot [\mu_i(\Delta t)]^2}{1 + 2 \cdot w_i^*(\Delta t) \cdot \mu_i(\Delta t) + [\mu_i(\Delta t)]^2 \cdot \sigma_{i/s}^2} \quad (2b)$$

where all symbols are analogous to those in the previous Eqs.

3.5 Matching demand to capacity. Matching demand to capacity in the given context can generally be carried out by three models/procedures for routing or assigning the particular aircraft/flights to the network air routes/tracks and their FLs (i.e., “service channels”): i) user-optimizing deterministic; ii) user-optimizing stochastic; and iii) the system optimizing [34]. For such a purpose

the utility of each aircraft/flight to be maximized under given conditions needs to be specified. This utility is usually expressed by the generalized aircraft/flight costs and can be maximized by minimizing them. These generalized costs can include the airline operating and air passenger time costs while onboard, and the internalized costs of impacts of GHG (Green House Gases) emissions on the environment. They all directly depend on the total aircraft flying time, i.e., the average delay, through the network. Thus, minimizing this time minimizes the generalized aircraft/flight costs and maximizes their corresponding utilities given the other factors constant.

3.5.1 Model I: User-optimizing deterministic assignment procedure. The user-optimizing deterministic assignment procedure actually starts by submitting the flight plans to the ATC service provider(s) some time in advance. They usually aim at optimizing own (individual) above-mentioned utilities under perfectly expected conditions in the network. This will make the utilities of all aircraft flights approximately equal if assigned to the available routes/tracks and their FLs (i.e., “service channels”). In other words, the utilities of all aircraft/flights are expected to be equal independently on the assigned route/track, i.e., “service channel”. This also implies that none aircraft/flight can increase its utility if changes the assigned route/track, i.e., “service channel. If the capacities and total travel times through the network are assumed to be equal for all available routes/tracks, i.e., “service channels”, the user-optimizing deterministic procedure implies the uniform routing or assigning aircraft/flights to each of them. For the “service channel” (i), the assigned demand is equal to:

$$\lambda_i(\Delta t) = \frac{\gamma(\Delta t)}{N(\Delta t)}, \text{ for } i \in N(\Delta t) \text{ and } \gamma(\Delta t) = \sum_{k=1}^{K(\Delta t)} \sum_{l=1}^{L(\Delta t)} \gamma_{kl}(\Delta t) \quad (3)$$

where

- $\gamma(\Delta t)$ is the intensity of aircraft/flights demand requesting service, i.e., passing through the network during time (Δt);
- $K(\Delta t), L(\Delta t)$ is the number of origin and destination airports of the aircraft/flights demand during time (Δt); and
- $\gamma_{kl}(\Delta t)$ is the intensity of aircraft/flights demand between the origin airport (k) and destination airport (l) during time (Δt).

The other symbols are analogous to those in the previous Eqs.

From (2a) and (3), the average aircraft/flight delays before entering the network can be estimated. Since both demand and capacity at each route/track, i.e., “service channel” are equal, the corresponding average delays will also be equal implying that eventual shifting the “channel” would not increase the utility of corresponding aircraft/flight(s). Otherwise, the utilities of aircraft/flights will

be exclusively influenced by different capacities of routes//tracks, i.e., service channels”.

3.5.2 Model II: User-optimizing stochastic assignment procedure. The user-optimizing stochastic assignment model/procedure implies the probabilistic choice of route/tracks, i.e., “service channel” by aircraft/flights at the time close to their departure times. The choice is influenced by the inherent randomness of factors influencing the expected utility of aircraft/flights. One of the main causes of such randomness can be uncertainty in predicting weather in the network. Again, each aircraft/flight aims at optimizing its own (individual) utility if the ATC accepts and enables chosen route/track under given conditions.

The user-optimizing stochastic assignment model/procedure routes or assigns the aircraft/flights to the “service channel” (i) according to the MNL (Multinomial Logit) model as follows:

$$\lambda_i(\Delta t) = p_i(\Delta t) \cdot \gamma(\Delta t) = \frac{e^{-U_i(\Delta t)}}{\sum_{i=1}^{N(\Delta t)} e^{-U_i(\Delta t)}} \cdot \gamma(\Delta t) \quad (4a)$$

and

$$U_i(\Delta t) = 1/\mu_i(\Delta t) + \tau_i(\Delta t) = 1/\mu_i(\Delta t) + d_i/V_i(\Delta t) \quad (4b)$$

for $i \in N(\Delta t)$

where

- $\tau_i(\Delta t)$ is the delay-free average time of aircraft/flight on the route/track, i.e., in the “service channel” (i), during time (Δt) (h); and
- d_i is the length of route/track, i.e., “service channel”(i) (nm; km).

The other symbols are analogous to those in the previous Eqs.

3.5.3 Model III: System-optimizing assignment procedure. The system-optimizing assignment model/procedure is applied when the ATC acts as the single decision-making entity. In approving the submitted flight plans and realizing the corresponding flights, the ATC aims on the one hand at optimizing their total above-mentioned utilities and on the other its own utility, the latter in terms of maximizing utilization of the available network capacity. The procedure implies an intuitively reasonable assignment of the expected aircraft/flight demand in direct proportion to the “ultimate” or “practical” capacity of particular (available) routes/tracks, i.e., “service channels”. The experience so far with optimization of the communication networks operating as the queuing networks has indicated that this is not optimal but close to the optimal assignment enabling minimization of the total aircraft/flights service time, i.e., the total average delay, in the network and consequent above-mentioned utilities as the total generalized costs of the actors/stakeholders involved [18]. This model/procedure is as follows:

$$\lambda_i(\Delta t) = \left(\frac{\mu_i(\Delta t)}{\sum_{i=1}^N \mu_i(\Delta t)} \right) \cdot \gamma(\Delta t) \quad (5)$$

where the other symbols are analogous to those in the previous Eqs.

This model/procedure can also be useful for the practical purposes when the capacities of particular routes/tracks, i.e., “service channels”, are not as expected. In most cases they can be compromised in terms of availability of routes/tracks due the fast and intensive-changing weather (head/tail wind, storms, volcanic eruptions). In (5), the “practical” capacities of tracks/routes, i.e., “service channels” instead of their “ultimate” counterparts estimated by (2b) can also be used.

3.6 Evaluation of the models/procedures for matching demand to Capacity. The above-mentioned models/procedures for matching demand to capacity are evaluated based on the above-mentioned generalized costs of aircraft/flights including those of airlines, air passengers onboard, and impacts of GHG emissions on the environment (externalities). These costs directly or indirectly mainly depend on the aircraft/flights total time spending in the network, i.e., the total average delay. In this case, the extra aircraft/flight generalized costs compared to their delay-free time-based counterparts are used for evaluation.

3.6.1 Airline operating costs. When served on the route/track, i.e., “service channel” (i), the average airline operating costs can be estimated by the regression equation using the empirical data as follows [2, 35, 36]:

$$C_{i/a}(d_i, S_i, t_i, \Delta t) = (a_0 + a_1 \cdot d_i + a_2 \cdot S_i) \cdot t_i(\Delta t) \quad (6a)$$

where

- $C_{i/a}(d_i, S_i, t_i, \Delta t)$ is the average operating cost of an aircraft/flight on the route/track (i) (US/flight);
- a_k is the coefficient of regression equation ($k = 1, 2, 3$);
- S_i is the average aircraft/flight seating capacity on the route/track (i) (seats); and
- d_i is the length of route/track (i) (km); and
- $t_i(\Delta t)$ is the total average aircraft/flight time, i.e., the total average delay of spending on the route/track, i.e., “service channel” (i), during time (Δt).

The other symbols are analogous to those in (6a). The time ($t_i(\Delta t)$) in (6a) is the sum of average delay before entering and the delay-free time of staying of the aircraft/flights on the route track, i.e., “service channel” (i), as follows:

$$t_i(\Delta t) = \bar{w}_i(\Delta t) + 1/\mu_i(\Delta t) + \tau_i(\Delta t) \quad (6b)$$

where all symbols are analogous to those in the previous Eqs.

The total average aircraft/flight time, i.e., the total average delay of spending in the network from Eq. 6a is equal as follows:

$$\bar{t}(\Delta t) = \left(\frac{1}{N(\Delta t)} \right) \cdot \sum_{i=1}^{N(\Delta t)} t_i(\Delta t) \quad (6c)$$

where all symbols are analogous to those in the previous Eqs.

3.6.2 Cost of passenger time. The average costs of time of air passengers onboard an aircraft/flight served on the route/track, i.e., in the “service channel” (i) of the network is estimated as follows [2], [37], [38]:

$$C_{i/p}(\tau_i, S_i, \alpha_i, \Delta t) = t_i(\Delta t) \cdot S_i \cdot LF_i \cdot \alpha_i \quad (7)$$

where

α_i is the average value of passenger time while onboard of an aircraft/flight in the “service channel”, i.e., route/track (i) (\$US/h).

The other symbols are analogous to those in Eq. 6a.

3.6.3 Environmental costs / externalities. The environmental costs/externalities relate to the impacts of GHG emissions from the consumed fuel of aircraft/flights served in the network.

- Fuel consumption

The average fuel consumed by an aircraft/flight served on the route/track, i.e., in the “service channel” (i) is estimated as follows [28], [39]:

$$FC_i(S_i, d_i, \Delta t) = SFC_i \cdot S_i \cdot LF_i \cdot d_i \quad (8a)$$

where

$FC_i(S_i, d_i, \Delta t)$ is the average fuel consumed by an aircraft/flight of the seating capacity (S_i) served on the route/track, i.e., in the “service channel” of length (d_i) during time (Δt) (ton/flight);

SFC_i is the average specific fuel consumption of an aircraft/flight served on the route/track, i.e., in “service channel” i.e., (i) (kg/p-km); and

LF_i is the average load factor of an aircraft/flight served on the route/track, i.e., in the “service channel” (i).

The other symbols are analogous to those in the previous Eqs.

- GHG emissions

The average quantity of GHG emissions of an aircraft/flight served on the route/track, i.e., in the “service channel” (i), based on Eq. 8a is estimated as follows [2, 40]:

$$Q_{i/CO_{2e}}(d_i, S_i, \Delta t) = CO_{2e} \cdot FC_i(d_i, S_i, \Delta t) \quad (8b)$$

where

CO_{2e} is Carbon Dioxide equivalent (tonCO_{2e}/ton of fuel).

- Cost/externalities of GHG emissions

The average costs/externalities of GHG emissions of an aircraft/flight served on the route/track, i.e., in the “service channel” (i) i.e., based on (8b) are estimated as follows [2, 41]:

$$C_{i/e}(d_i, S_i, \Delta t) = c_{CO_{2e}} \cdot Q_{i/CO_{2e}}(d_i, S_i, \Delta t) \quad (8c)$$

where

$c_{CO_{2e}}$ is the average cost of GHG emissions based on the GWP (Global Warming Potential) (\$US/tonCO_{2e}). The other symbols are analogous to those in the previous Eqs.

3.6.4 Total generalized costs. From (6), (7), (8), the total average costs of an aircraft/flight served on the route/track, i.e., in the “service channel” (i), is equal as follows:

$$C_i(\Delta t) = C_{i/a}(d_i, S_i, \tau_i, \Delta t) + C_{i/p}(\tau_i, S_i, \alpha_i, \Delta t) + C_{i/e}(d_i, S_i, \Delta t) \quad (9a)$$

Under the assumption that these average costs are approximately equal for all aircraft/flights served in the network during the specified period of time, the total extra generalized costs of realized flights based on the difference between their total and delay-free time counterparts are estimated as follows:

$$\Delta C(\Delta \tau) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(\Delta \tau) [C_i(\Delta t) - C_{i/0}(\Delta t)] \quad (9b)$$

where

$C_{i/0}(\Delta t)$ is the total average cost based on the aircraft/flight delay-free time on the route/track, i.e., in the “service channel” (i), during time (Δt) (\$US/flight).

The other symbols are analogous to those in the previous Eqs.

4 AN APPLICATION OF THE MODELS OF NETWORK PERFORMANCES

4.1 Configuration and operation of the network. The ATC-based long-haul air route network considered in this paper is established in the NAT HLA (North Atlantic High-Level Airspace) divided into 6 ACCs (Area Control Centres): Bodo, Reykjavik, Gander, Shanwick, New York East, and Santa

Maria Oceanic [42]. The airspace is completely overwater and consequently without the ground-based navigational facilities and radar coverage preventing the ATC radar- monitoring and controlling of aircraft/flights. While in this airspace, As shown on Fig. 1b the network consists of the set of almost parallel air routes/tracks with the specified number of FLs (Flight Levels) called OTS (Organized Track System) spreading between two continents. These routes/tracks generally coincide with the great-circles, i.e., the shortest distances between any two points on the globe implying performing the orthodrome-based air navigation. Starting from the year 2015, these routes/tracks have been laterally separated by the standard distance of: $g = 30$ nm called RLSM (Reduced Lateral Separation Minima) instead of the previously: $g = 60$ nm (i.e., from 1 to $\frac{1}{2}$ degree of latitude).

Supported by SLOP (Strategic Lateral Offset Procedure), this separation still guarantees the safe aircraft deviating around the route/track centerlines of about or one or two nm (nm – nautical mile). The network, i.e., OTS set up 24h in advance and based on the prevailing weather (primary wind) conditions aims at reducing the impacts of headwinds and increasing benefits from tailwinds as much as possible including the airline preferences submitted in advance. In general, using the OTS is not mandatory but highly recommended [23, 42, 43].

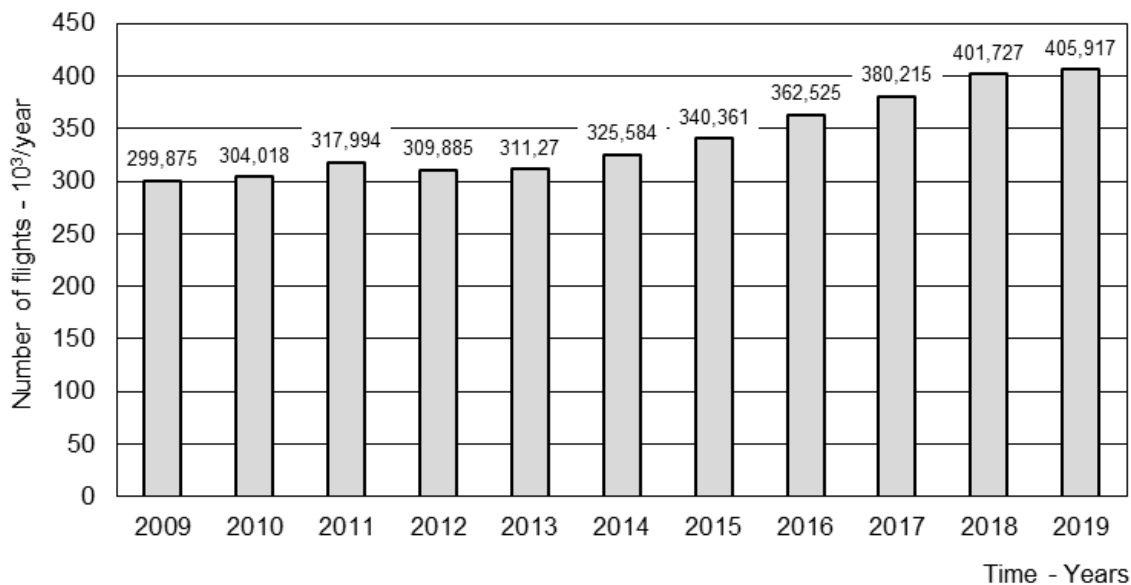
The sets of WPs along each route/track enable checking the aircraft/flights position where the course, speed, and/or altitude can change. Under such conditions, the aircraft/flights have to perform RNAV (Area Navigation) by using the traditional compass and/or the satellite navigation systems such as GPS (Global Position System) [44].

For reporting their positions, the aircraft/flights use the satellite communication CPDLC (Controller-Pilot Data Link Communications), HF (High Frequency) link and/or alternatively ADS-C & ADS-B (Automatic Dependent Surveillance) system. In the latest case, the controller-pilot-controller voice communication is replaced by the automatic downlink transfer of the position reports and the other flight information if necessary [23, 43, 45–47].

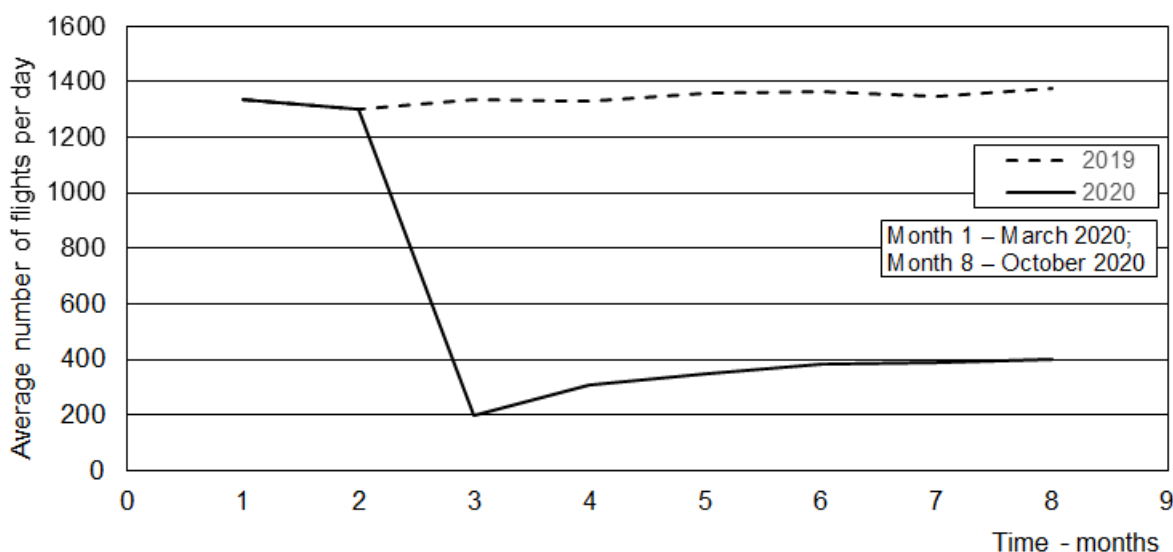
Before entering the network, the aircraft/flights contact the ATC Oceanic Center requesting the already assigned routes/tracks including the estimated time of arrival at their entry gates (WPs). This enables the ATC controllers to estimate and establish the required separation between the aircraft/flights and issue the corresponding clearances to pilots. The assigned routes/tracks can coincide or be different from the initial ones, but the aircraft/flights have to follow these assigned the latest.

After entering the network, the aircraft have to report their position when crossing the WPs along routes/tracks including predicting the time of crossing the next and the successive WPs ahead as shown on Fig. 1b. In this way, the ATC controllers can “monitor” the safe separation between aircraft/flights while in the network [1, 43, 48].

4.2 Developments of air traffic. The above-mentioned network serves the air transport market between Europe, North, and South America as one of the busiest in the world. Fig. 3 (a, b) shows some relevant development of the air traffic in this market over time.



a) Number of flights: Period 2009-2019



b) Flights per day (westbound + eastbound): Period March-October 2019/2020

Fig. 3. Some relevant characteristics of transatlantic air traffic between Europe and Americas over time [49–52]

Fig. 3a shows that before being affected by COVID-19 pandemic disease at the beginning of the year 2020, which caused complete closure of the airspace and network, the annual number of flights operated by about 20 airlines was increased for about 35 % during the observed period (2009–2019), i.e., by the

rate of about 3.2 % per year¹ [53–55]. Fig. 3b shows the daily number of flights impacted by COVID-9 pandemic disease during the nine months of the year 2020 (March-October). As can be seen, just after the closure of the airspace and network (March 2020), the average number of daily flights decreased for about 85 % compared to its counterpart in the year 2019. Later it has been gradually recovering but not more than up to about 30 % of its counterpart in October 2019 [51].

The developments before the impact of COVID-19 pandemic disease questioned the sufficiency of capacity of this network to handle generally expecting growing aircraft/flight demand safely, effectively, and efficiently. While the COVID-19 crisis has impacted the air passenger demand and corresponding airline capacity hardly, they are expected to return to 2019 level by 2024 and then continue to grow at the rate similar to that before the pandemic. This expectation is based on the similarity with the recovery patterns from the previous crisis [16, 56]. Under such conditions, it is reasonable to expect that the performances of this network will again come to the research and practice agenda.

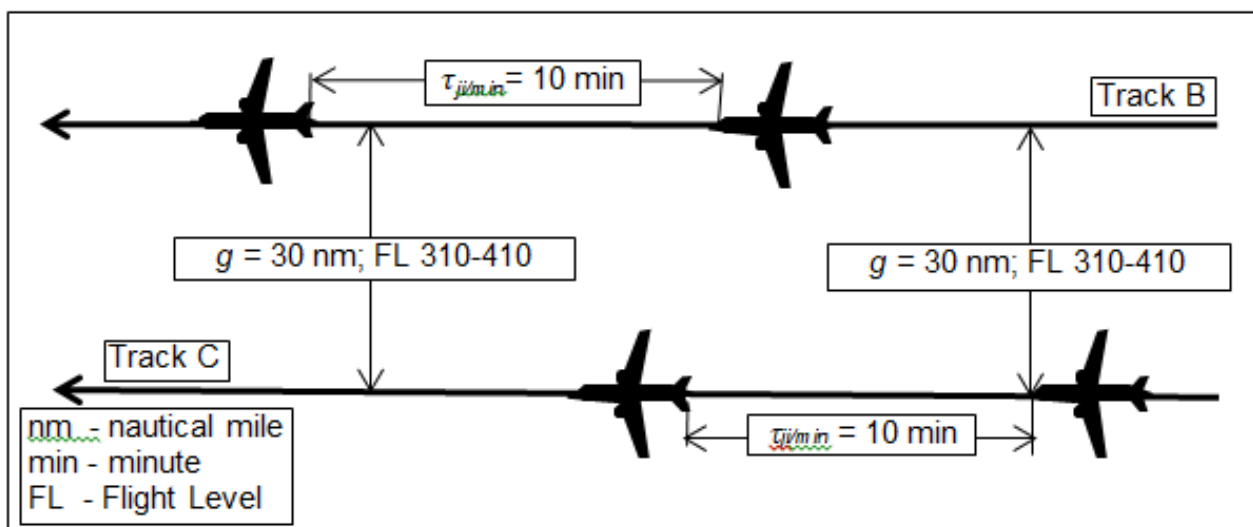
4.3 Inputs.

4.3.1 The air route network and traffic pattern. The application of the above-mentioned models to the long-haul air transport network on Fig. 1b (Westbound tracks and traffic). The considered network, i.e., the OTS to handle the westbound traffic between Europe and North America is assumed to consist of: $N(\Delta t) = 6$ routes/tracks (A, B, C, D, E, F), each with $M_i(\Delta t) = 11$ most preferred FSs (Flight level(s)) (FL 310 - FL 410). These aircraft/flights typically depart from Europe during the daylight between early morning and late afternoon (11:30h-19:00h UTC (Coordinated Universal Time) at 30⁰W) in order to arrive at North America between early afternoon and late evening, i.e., during daylight. The opposite eastbound flights are scheduled to depart from North America to Europe in the evenings (01:00h UTC to 08:00h UTC on the North American side at 30⁰W), thus enabling passengers to arrive at their European destinations in the morning.

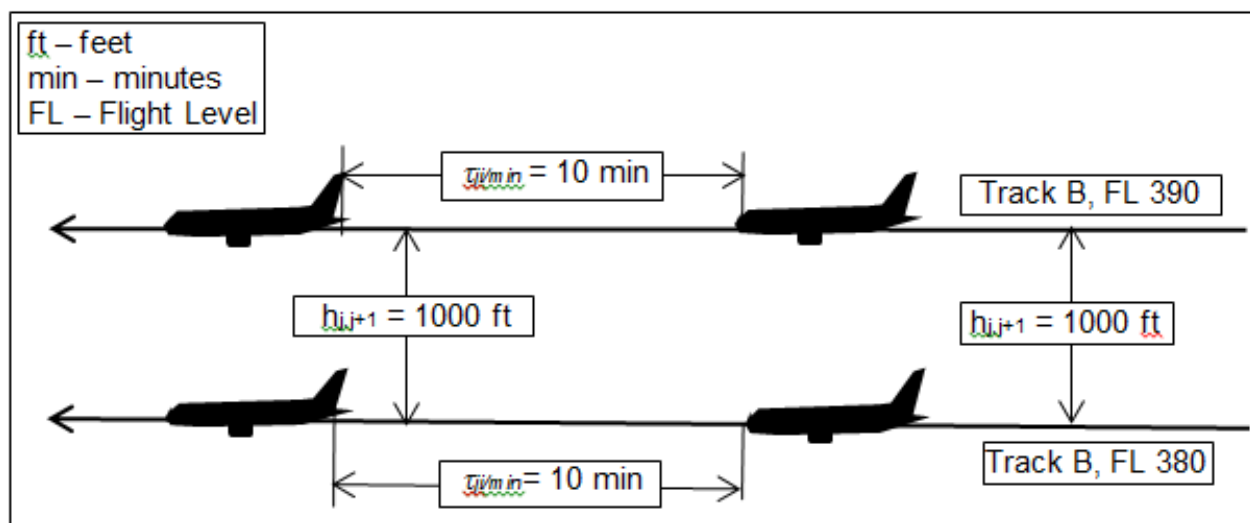
4.3.2 The ATC separation rules. The aircraft flying along the given route/tracks on the same FLs are longitudinally separated by the ATC minimum time-based separation rules of: $\tau_{ji/min}(\Delta t) = 10$ min. The ATC minimum vertical separation rules between the closest FLs are: $h = 1000$ ft thanks to RVSM (Reduced Vertical Separation Minima) program implemented in the year 2004.

¹ At the same time, the volumes of ASK (Available Seat Kilometres(s)) and RPKs (Revenue Passenger Kilometer(s)) were growing at an annual rate of 3.4 % and 3.9 %, respectively. The average load factor during the period was about 75 % [53–55].

Fig. 4 (a, b) shows the simplified scheme of application of these ATC separation rules (nm - nautical mile; ft - feet) [1, 42].



a) Lateral and longitudinal separation rules



b) Vertical and longitudinal separation rules

Fig. 4. Scheme of application of the ATC minimum separation rules to the aircraft/flights in the given example - case of the North Atlantic air route network

(1 nm = 1.852 km; 1ft = 0.305 m)

Recently, the new ATC longitudinal separation rules of: $\tau_{j/min}(\Delta t) = 5 \text{ min}$ have been introduced between the adequately equipped aircraft (with ADS-B system) operating on the same flight levels in the Gander and Shanwick area [57].

4.4 Analysis of the results

4.4.1 Capacity

4.4.1.1 “Ultimate” capacity.

Based on the ATC minimum longitudinal separation time of: $\tau_{ji/min}(\Delta t) = 10$ min, the “ultimate” capacity of the route/track (i) with $M_i = 11$ FLs during the period of $(\Delta t) = 1$ h is equal to:

$$\mu_i(\Delta t) = \sum_{j=1}^{M_i} 1/\tau_{ji/min}(\Delta t) = \sum_{j=1}^{11} (1/10) \cdot 60 = 66 \text{ ac/h}.$$

If this route/track “ultimate” capacity is equal for all ($N(\Delta t)=7$) routes/tracks and their equal number of available FLs, ($M_i(\Delta t) = 11$; $i = 1, 2, \dots, 6$), the total network “ultimate” capacity will be:

$$\mu(\Delta t) = N(\Delta t) \cdot \mu_i(\Delta t) = 6 \cdot 66 = 396 \text{ ac/h}.$$

If the constant intensity of aircraft/flight demand takes place in the westbound direction during the period: $\Delta \tau = 8$ h (for example between 11:30 - 19:30 UTC or GMT), the total “ultimate” capacity of the network will be:

$$\mu(\Delta t = 8) = 396 \cdot 8 = 3168 \text{ ac/8h}.$$

Similarly, the “ultimate” capacity of the network handling the eastbound traffic under given conditions represented by the given/constant configuration of the air route network and constant demand for service can be estimated.

The average length of 20 busiest routes between Europe and North America has been $D(\Delta t) = 3620$ nm, of which the oceanic segment (the second in order as mentioned above) has been $d_i = 1325$ nm (i.e., about 37 % of the total length) ($i = 1, 2, \dots, 7$; $M_i = 11$) [58].

If the aircraft/flight average cruising speed is $V_i(\Delta t) = 490$ kt, then the average delay-free aircraft flying time along any FL of any route/track is about

$$\tau_i(\Delta t) = d_i/V_i(\Delta t) = 1325/490 = 2.704 \text{ h } (i = 1, 2, \dots, 7) \text{ (kt - knot)}.$$

Then, under conditions of the constant demand for service, the total maximum number of aircraft/flights, which can simultaneously be handled in the network under given conditions can be:

$$n(\Delta t) = \mu(\Delta t) \cdot \tau(\Delta t) = 396 \cdot 2.704 = 1071 \text{ ac [59]}.$$

4.4.1.2 "Practical" capacity

Based on the "ultimate" capacity, the "practical" capacity of the given air route network is estimated by specifying the maximum average delay imposed on each aircraft/flight before entering the network (2b). Fig. 5 shows dependence of the network's "practical" capacity on the maximum average delays imposed on an aircraft/flight before entering the network, the standard deviation of average service time, i.e., the ATC minimum time-based separation rules, and the "ultimate" capacity.

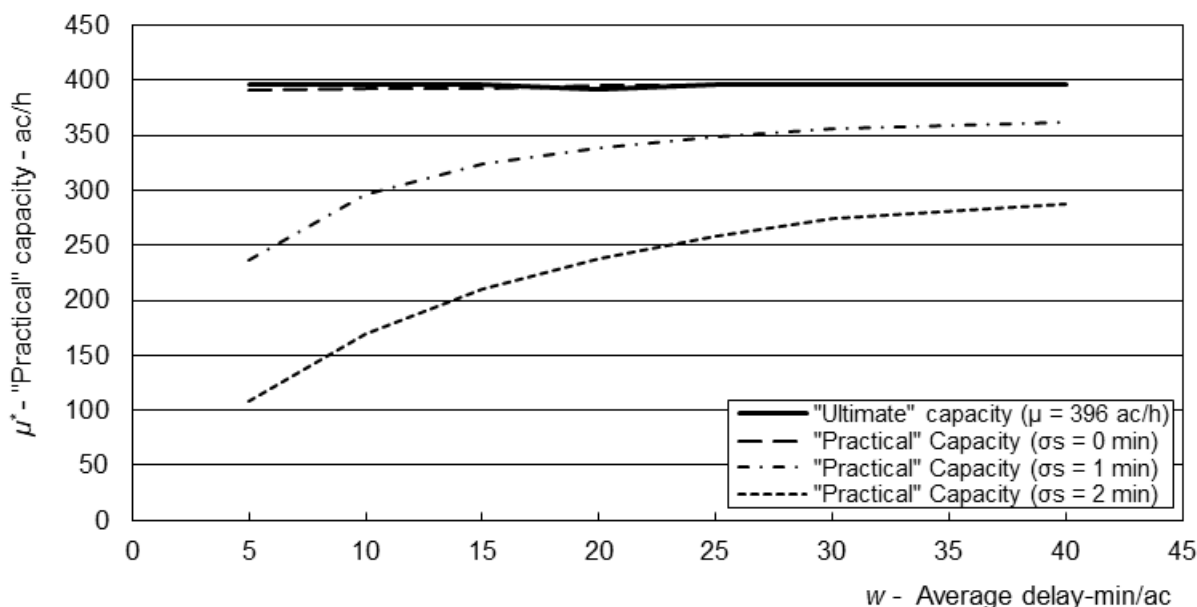


Fig. 5. Relationship between the "practical" capacity of the given air route network, the average delay imposed on an aircraft/flight and the standard deviation of its service time

As can be seen, if the average aircraft service time, i.e., the ATC minimum time-based separation rules are almost perfectly adjusted (i.e., without any deviations), then independently on the imposed delays on the aircraft/flights before entering the network, the corresponding "practical" capacity will remain very close to its "ultimate" counterpart.

If the deviations from the aircraft/flight service time increase even for a couple of minutes, the "practical" capacity will substantively decrease. At the same time, it will increase at decreasing rate with increasing of the average imposed delays and consequently come closer to its "ultimate" counterpart.

4.4.2 Matching demand to capacity

4.4.2.1 Scenario of the network available "ultimate" capacity. The above-mentioned three models of matching demand to capacity are applied by using a part of data related to the North Atlantic air route network shown on Fig. 1b. The scenario of available "ultimate" capacity of the air route network is given in Table 1.

Table 1. Scenario of the available “ultimate” capacity of the air route network in the given example

<u>Route/ track</u> <u>(i)</u>	FL(j) (10 ³ ft)							Total: $\mu_i(\Delta t)$ (ac/h; ac/8h)	Delay- free flying time $\tau_i(\Delta t)$ (h)	
	350	360	370	380	390	400	410			
	<i>Available “ultimate” capacity (ac/h; ac/8h)</i>									
1(A)	3;24	5;40	6;48	6;48	6;48	6;48	6;48	38/304	2.704	
2(B)	-	-	6;48	6;48	6;48	6;48	6;48	30/240	2.704	
3(C)	-	-	5;40	5;40	-	6;48	6;48	22/176	2.704	
4(D)	-	-	-	6;48	6;48	6;48	6;48	24/192	2.704	
5(E)	-	-	4;32	-	-	6;48	6;48	16/128	2.704	
6 (F)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Total: $\mu_j(\Delta t)$	3/24	5/40	21/168	23/184	18/144	30/240	30/240	130/1040		

Table 1 indicates that the total available “ultimate” capacity of the given network is:

$$\mu(\Delta t) = 1040 \text{ ac/8h (Period 11:30-19:30 h).}$$

On average, during that period, $\gamma(\Delta t) = 500 \text{ ac/8h}$ have requested service in the network (Based on Fig. 3b, Month 1-March 2020). As mentioned above, the total potential “ultimate” capacity of the given network is: $\mu_a(\Delta t) = 3168 \text{ ac/8h}$. This implies that the share of available “ultimate” capacity to which the aircraft/flight demand of $\gamma(\Delta t) = 500 \text{ ac/8h}$ can be assigned is:

$$u(\Delta t) = \mu_a(\Delta t)/\mu(\Delta t) = 1040/3168 = 0.328 \text{ or } \approx 32.8 \text{ \%}.$$

In addition, the utilization of the network available “ultimate” capacity is:

$$u_a(\Delta t) = \gamma(\Delta t)/\mu_a(\Delta t) = 500/1040 = 0.48 \text{ or } 48 \text{ \%}.$$

In addition, utilization of the potential “ultimate” capacity under given conditions would be:

$$u(\Delta t) = \gamma(\Delta t)/\mu(\Delta t) = 500/3168 = 0.158 \text{ or about } \approx 13.8 \text{ \%}.$$

4.4.2.2 Assignment of demand to capacity. By taking into account the available “ultimate” capacity and the total delay-free average flying time along the particular routes/tracks, i.e., “service channels”, of the given network, the

above-mentioned aircraft/flight demand $\gamma(\Delta t)=500$ ac/8h is assigned by three- above-mentioned assignment procedures/models as shown on Fig. 6.

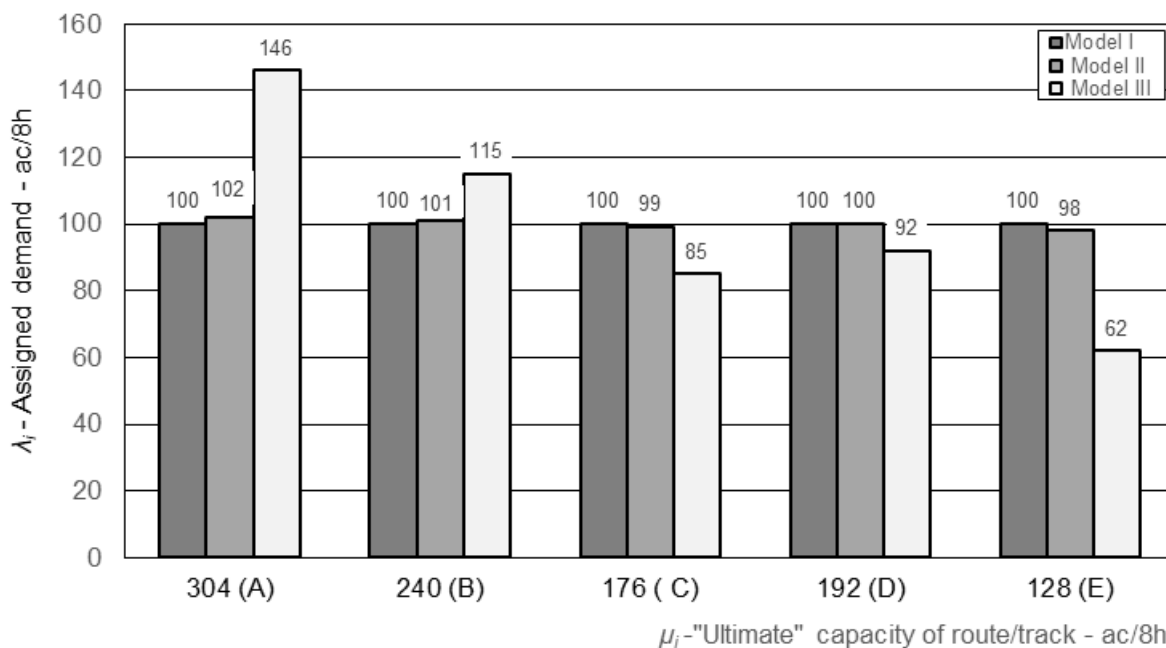


Fig. 6. Relationship between the assigned aircraft/flight demand, “ultimate” capacity of particular routes/tracks of the network, and applied routing or assignment models/procedures in the given example

As can be seen, the Model I-User-optimizing deterministic procedure assigns the demand of 500 aircraft/flights during the period of 8h uniformly to particular routes/tracks independently on their “ultimate” capacity. The Model II-User-optimizing stochastic procedure tends to assign the higher number of aircraft/flights to the routes/tracks of higher capacity, but with very slight variations. The Model II-System-optimizing procedure assigns the aircraft/flight demand just in proportion to the “ultimate” capacities of the particular routes/tracks, i.e., the higher number of aircraft/flights is assigned to the routes/tracks with higher “ultimate” capacity, and vice versa.

4.4.2.3 Average aircraft/flight delays. Based on the assigned aircraft/flight demand by the specified assignment models/procedures on Fig. 6 and its relationship with the “ultimate” capacity of particular routes/tracks of the network, the corresponding average delays per aircraft/flight before entering the network are estimated by (2a) and shown on Fig.7 ($\rho_i(\Delta t) = \lambda_i(\Delta t)/\mu_i(\Delta t) < 1$).

As can be seen, in general, the average delays from applying three assignment models/procedures are relatively low (up to about 7 min) particularly if compared to the aircraft/flights delay-free average time of spending in the network ($t_i = 2.704$ h; $i = 1, 2, \dots, 5$).

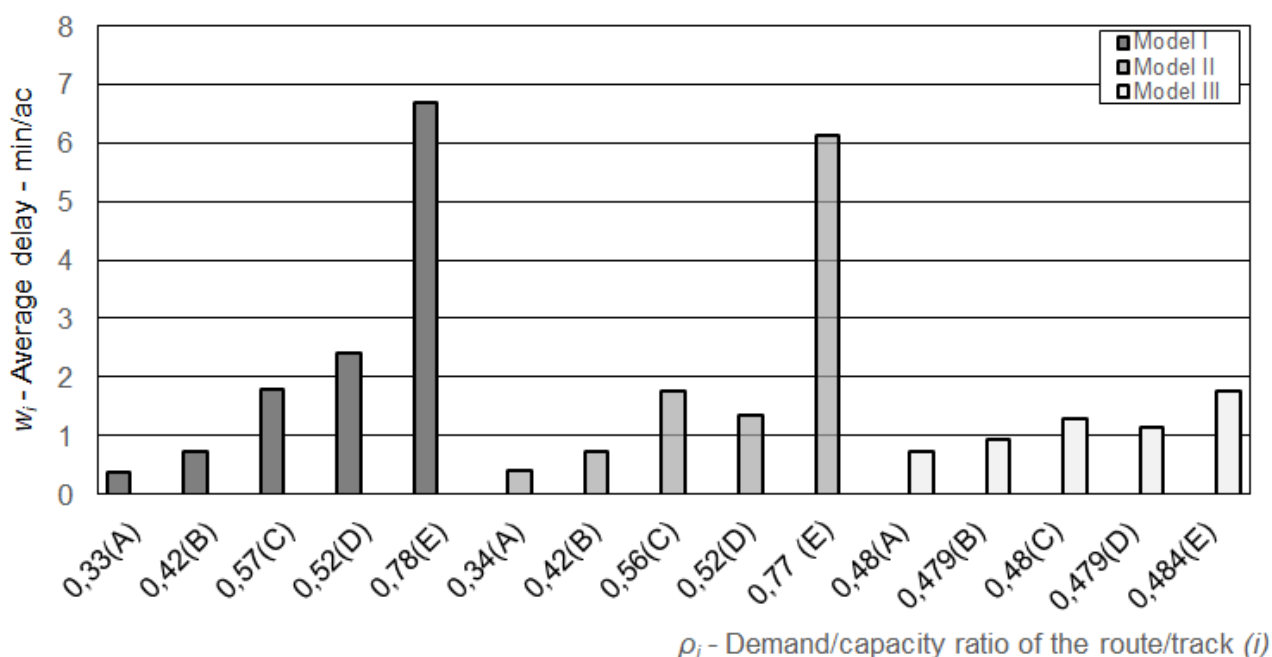


Fig. 7. Relationship between the average delay of an aircraft/flight, demand/capacity ratio of particular routes/tracks, and routing or assignment models/procedures in the given example

When the assignment Model I and Model II are applied, the corresponding average delays will increase more than proportionally with increasing of the demand/capacity ratio of the route/tracks due to the almost uniform assigned demand on the one hand and their lower “ultimate” capacity on the other. Model III will produce generally lower and more uniform distribution of the average delays of aircraft/flights among particular routes/tracks than its two counterparts. The average aircraft/flight delay is generally the highest on the route/track with the lowest “ultimate” capacity independently on the applied assignment model/procedure.

4.4.2.4 Evaluation of the assignment models/procedures. The above-mentioned routing or assignment procedures/models are evaluated by the average extra generalized costs of airlines, air passengers, and environmental externalities, all depending on the total average aircraft/flight delays, i.e., total time spending in the network. The reference case has been the costs based on the average delay-free aircraft/flight time spending in the network. These average extra costs are estimated for the single aircraft/flight and 500 flights/8h (i.e., during the above-mentioned east-west daily shift) served in the network independently on the assigned route/track.

- Airline operating costs

For particular routing or assignment procedures/models, the average delays on Fig. 8 and the aircraft/flight delay-free time spending in the network, the total corresponding times independently on the route/track are estimated by

(6b), (6c), respectively. Then, the airline operational costs per an aircraft/flight are estimated by the regression equation as follows [35, 36]:

$$C_{i/a}(d_i, S_i, t_i) = (177.479 + 0.301 \cdot d_i + 21.956 \cdot S_i) \cdot t_i$$

$$t \quad (0.285) \quad (1.764) \quad (4.967)$$

$$R^2 = 0.712; F = 82.655; DW = 1.636; N = 70,$$

where all symbols are analogous to those in (6a). These and the corresponding airline extra costs compared to the reference delay-free time costs (Model/procedure 0) are estimated and given in Table 2.

Table 2. Airline operating costs (Average for $i \in N$; $N = 5$)

<u>Element</u>	<u>Assignment model/procedure</u>			
	<u>Model 0</u> <u>Reference</u> <u>Delay-free</u>	<u>Model I</u> <u>User-</u> <u>optimizing</u> <u>Deterministic</u>	<u>Model II</u> <u>User-</u> <u>optimizing</u> <u>Stochastic</u>	<u>Model III</u> <u>System-</u> <u>optimizing</u>
Delay (min/flight) - \bar{w}	0	2.40	2.05	1.71
Flying time (h/flight) ¹⁾ - \bar{t}	2.704 ¹⁾	2.744	2.738	2.732
Cost (\$US/flight) ²⁾ - \bar{C}_a	19542	19831	19788	19745
Extra cost (\$US/flight) - $\Delta \bar{C}_a$	0	+ 289	+ 246	+ 203
Extra costs (\$US) - $\Delta \bar{C}_a$ (500 flights)	0	+ 144500	+ 123000	+ 101500

¹⁾Based on: $\bar{t} = \bar{d}/\bar{V} = 1325 \text{ nm}/490 \text{ kts} = 2.704 \text{ h}$

As can be seen, the extra costs per an aircraft/flight and for 500 flights/8h are the lowest as the Model III is applied. Compared to Model III, Model I and Model II produce the higher extra costs for about 42 % and 21 % costs, respectively.

- Air passenger time costs

The air passenger time costs are estimated by (7) and given in Table 3.

Table 3. Air passenger time costs (Average for $i \in N$; $N = 5$)

<u>Element</u>	<u>Assignment model/procedure</u>			
	<u>Model 0</u> <u>Reference</u> <u>Delay-free</u>	<u>Model I</u> <u>User-</u> <u>optimizing</u> <u>deterministic</u>	<u>Model II</u> <u>User-</u> <u>optimizing</u> <u>stochastic</u>	<u>Model III</u> <u>System-</u> <u>optimizing</u>
Passengers (number/flight) ²⁾ - $\bar{S} \cdot \bar{L}\bar{F}$	245	245	245	245
Value of time (\$US/p-h) ¹⁾ - $\bar{\alpha}$	74	74	74	74
Cost of time (\$US/flight) - \bar{C}_p	49023	49749	49640	49531
Extra cost (\$US/flight) - $\Delta\bar{C}_p$	0	+ 726	+ 617	+ 508
Extra costs (\$US) - $\Delta\bar{C}_p$ (500 flights)	0	+ 363000	+ 308500	+ 254000

¹⁾Based on 50 % medium- and 50 % high-income passengers on board and their 50 % business and 50 % leisure trips [37], [38]; ²⁾ $\bar{S} = 303$ seats/flight; $\bar{L}\bar{F} = 0.81$ per flight [28]

As can be seen, these extra costs per an aircraft/flight and for 500 flights/8h are higher than that of the airlines. Again, these costs at Model III are lower than that at the Model I and Model II for about 30 % and 18 %, respectively.

- Environmental costs/externalities

The environmental costs are estimated by (8a), (8b), (8c) and given in Table 4.

Table 4. Environmental costs/externalities (Average for $i \in N$; $N = 5$)

<u>Element</u>	<u>Assignment model/procedure</u>			
	<u>Model 0</u> <u>Reference</u> <u>Delay-free</u>	<u>Model I</u> <u>User-</u> <u>optimizing</u> <u>Deterministic</u>	<u>Model II</u> <u>User-</u> <u>optimizing</u> <u>Stochastic</u>	<u>Model III</u> <u>System-</u> <u>optimizing</u>
Fuel consumption (kg/flight) ¹⁾ - $\bar{F}\bar{C}$	17713	17956	17936	17831
GHG emissions (kg/flight) ²⁾ - \bar{Q}_{CO_2e}	78355	79429	79341	78877
Cost of GHG emissions (\$US/ton CO _{2e}) ³⁾ - \bar{C}_{CO_2e}	212	212	212	212
Cost of GHG (\$US/flight) - \bar{C}_e	16818	17066	17029	16992
Extra cost (\$US/flight) - $\Delta\bar{C}_e$	0	+ 248	+ 211	+ 174
Extra costs (\$US) - $\Delta\bar{C}_e$ (500 flights)	0	+ 124000	+ 105500	+ 87000

¹⁾ [28], [39]; ²⁾Based on CO_{2e} = 4.42358 kg/kg of Jet A fuel (6 components) [40]; ³⁾ High Impact [41]

As can be seen, these extra costs are slightly lower than that of airlines and substantively lower than that of air passengers. Again, Model I and Model II have for about 43 % and 21 % higher extra costs, respectively, compared to that of Model III.

- Total generalized costs

The total generalized extra costs are estimated from the corresponding components in Tables 2, 3, 4, and given in Table 5.

Table 5. Total extra costs (Average for $i \in N; N = 5$)

<u>Element</u>	<u>Assignment model/procedure</u>			
	<u>Model 0</u> <u>Reference</u> <u>Delay-free</u>	<u>Model I</u> <u>User-</u> <u>optimizing</u> <u>Deterministic</u>	<u>Model II</u> <u>User-</u> <u>optimizing</u> <u>Stochastic</u>	<u>Model III</u> <u>System-</u> <u>optimizing</u>
Extra costs (\$US/flight) - $\Delta\bar{C}_a + \Delta\bar{C}_p + \Delta\bar{C}_e$	0	+ 1263	+ 1074	+ 885
Extra costs (\$US-500 flights) - $\Delta\bar{C}_a + \Delta\bar{C}_p + \Delta\bar{C}_e$	0	+ 631500	+ 537000	+ 442500

Table 5 indicates that despite the total extra costs per single aircraft/flight are relatively low, those per 500 aircraft/flights handled during the period of 8h, i.e., during the east-west daily shift, can be rather substantive. As expected, Model III (System-optimizing procedure) is shown superior with about 30 % and 18 % lower generalized costs than that of Model I (User-optimizing deterministic procedure) and Model II (User-optimizing stochastic procedure), respectively. This indicates the crucial role of the ATC as the central air traffic control/management entity enabling optimizing the system generalized costs of all aircraft/flights served in the network under given conditions.

5 CONCLUSIONS

This paper has presented analyzing and modelling performances of the long-haul air route network operating as the queuing network in the large airspace according to “what-if” scenario(s). These performances have been the network capacity consisting of the capacities of particular routes/tracks as the “service channels”, the aircraft/flight demand, and their relationships influencing the aircraft/flight total average delays and related generalized costs of airlines, air passengers, and impacts on the environment/externalities.

The analytical models for estimating the “ultimate” and “practical” capacity of the particular routes/tracks as the “service channels”, three

models/procedures for matching the aircraft/flight demand to the “channels” capacity - user-optimizing deterministic, user-optimizing stochastic, and the system optimizing, and the models for estimating particular generalized costs have been developed. They have been applied to the air route network established in the North Atlantic airspace between Europe and North America.

As expected, the “ultimate” capacity of the given network has been mainly influenced and increasing with increasing of the number of available routes/tracks and their flight levels as the “service channels” given the ATC minimum longitudinal time-based separation rules between the aircraft/flights operating on the same flight level(s). The “practical” capacity has been lower than its “ultimate” counterparts, but with decreasing gap with increasing of the average delays imposed on the aircraft/flights before entering the network. Among three routing or assignment models/procedures for matching demand to capacity, the system-optimizing model assigning the aircraft/flights in proportion to the “ultimate” capacity of particular routes/tracks, i.e., “service channels” has appeared superior. It has produced the lowest total average delays and related extra generalized costs compared to its other two counterparts. This has confirmed that the system-optimizing assignment model/procedure elaborated for the communication networks could also be useful for achieving close to optimal matching demand to capacity in the given context. Despite the total extra costs of an aircraft/flight assigned by all three models/procedures have been relatively low, they have shown to be substantive for the number of aircraft/flights handled in the network during the daily-shift period.

Further research could relate to more detailed analysis of operations of the given network by increasing the number of different operating scenarios, approaches to estimating the network’s “ultimate” and “practical” capacity (for example applying simulation vs analytical approach), models/procedures for matching demand to capacity, and methods for estimating the generalized costs of the main actors/stakeholders involved. The influence of weather could be of particular interest for more realistic estimation of the above-mentioned performances under different “what-if” scenarios.

The author declares:

The present article does not contain any researches with people involved as the objects of researches.

References

1. Cancer-Pain.org [Internet]. New York: Association of Cancer Online Resources [cited 2002 Jul 9]. Available at: <http://www.cancer-pain.org/>.
2. Free Route Airspace: Giving Users the Freedom to Plan a Route in Europe's Airspace [Internet]. Brussels: EUROCONTROL [cited 2020 June 20]. Available at: <http://www.eurocontrol.int/articles/free-route-airspace/>.
3. Automation in Air Traffic Management: Long-term Vision and Initial Research

- Roadmap [Internet]. Washington D.C.: Federal Aviation Administration. [cited 2020 June 22]. Available at: <http://www.sesarju.eu/>.
4. Modernization of U.S. Airspace [Internet]. Washington D.C.: Federal Aviation Administration. U.S. Department of Transportation. [cited 2020 June 23]. Available at: <http://www.faa.gov/nextgen/>.
 5. The Future Innovations that Will Revolutionise Aviation [Internet]. [cited 2020 June 30]; Available at: <https://www.themcggroup.com/blog/the-differences-between-longhaul-and-shorthaul-pilotingbp67/#:~:text=Short%2Dhaul%/20is%20a%20flight,that%20extend%20beyond%206%20hours/>.
 6. Annual Report of the ICAO Council: 2015 - Appendices and Supplement [Internet]. Montreal: International Civil aviation Organization. [cited 2020 July 7]. Available at: https://www.icao.int/sustainability/pages/facts-figures_worlddeconomydata.aspx/.
 7. Kleinrock L. Creating a Mathematical Theory of Computer Networks. *Operations Research*. 2002;50(1):125-131. [cited 2020 November 15]. Available from: <https://pubsonline.informs.org/journal/opre/>.
 8. Trans Pacific Airlines [Internet]. [cited 2020 October 5]. Available at: https://geofs.fandom.com/wiki/Trans-Pacific_Airlines/.
 9. Major L, Johannsson H, Davison HJ, Hvannberg ET, et al. Key Human-Centred Transition Issues for Future Oceanic Air Traffic Control Systems. 2004; *HCI-Aero 2004*. Toulouse. 2004. [cited 2020 October 6]. Available from: <https://pureportal.coventry.ac.uk/en/activities/hci-aero-2004/>.
 10. Lee PU, Klippel A. Dynamic Aspects of Spatial Information in Air Traffic Controller Displays. In AAAI 2005 Spring Symposium Series, Reasoning with Mental and External Diagrams: Computational Modelling and Spatial Assistance. Stanford; 2005. [cited 2020 October 8]. Available from: <https://www.aaai.org/Library/Symposia/Spring/2005/ss05-06-005.php/>.
 11. FAA Aerospace Forecasts: Fiscal Years 2006-2017. U.S. Department of Transportation: Federal Aviation Administration. Office of Policy & Plans. Washington D.C. 2005. [cited 2020 December 5]. Available from: https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/2006-2017/.
 12. FAA. Aerospace Forecast: Fiscal Years 2018-2038. Federal Aviation Administration. Washington D.C.; 2018. [cited 2020 December 5]. Available from: https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/fy2018-38_faa_aerospace_forecast.pdf/.
 13. FAA. *Update of Overflight Fee Rates*. 14 CFR Part 187. Docket No: FAA-2015-3597. Amdt. No. 187-36]. RIN 2120-AK53: Federal Aviation Administration. Department of Transportation. Federal Register; 81 (229): 85843- 85854. Washington D.C.; 2019. [cited 2020 December 7]. Available from: <https://www.federalregister.gov/documents/2016/11/29/2016-28589/update-of-overflight-fee-rates/>.
 14. EEC. Pessimistic Sector Capacity Estimation. EEC Note No. 21/03. Project COCA. EUROCONTROL Experimental Centre. Brussels. 2003. [cited 2020 November 14]. Available from: <https://www.eurocontrol.int/node/9925/>.
 15. Horonjeff R, McKelvey F, Sproule W, Young S. *Planning and Design of Airports*. Fifth Edition 5th Edition, McGraw-Hill Education. New York; 2010. [cited 2020 Nov. 20]. Available from: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071446419>.
 16. Kleinock L. *Communication Nets: Stochastic Message Flow and Delay*. Dover

- Publication, Inc. Mineola, New York; 2007. [cited 2020 November 21]. Available from: <https://www.amazon.ca/Communication-Nets-Stochastic-Engineering-2007-06-05/dp/B017WQMIFO/>.
17. Newell GF. Airport Capacity and Delays. *Transportation Science*. 1979;13(3):201-241. doi: 10.1287/trsc.13.3.201.
 18. Siddiquee W. Air Route Capacity Models. *Navigation*. 1973;20(4):296-300. [cited 2020 November 21]. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/j.2161-4296.1973.tb01183.x/>.
 19. Kamoun K, Kleinrock L. Stochastic Performance Evaluation of Hierarchical Routing for Large Networks. *Computer Networks* 3. 1979;337-353, North Holland Publishing Company. [cited 2020 Nov. 25]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0376507579900047?via%3Dihub>; [https://doi.org/10.1016/0376-5075\(79\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0376-5075(79)90004-7).
 20. Pióro M, Medhi D. *Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks*. Morgan Kaufmann Publishers. Elsevier. San Francisco. 2004. [cited 2020 November 30]. Available from: <https://www.elsevier.com/books/routing-flow-and-capacity-design-in-communication-and-computer-networks/pioro/978-0-12-557189-0/>.
 21. Dhief I. *Optimization of Aircraft Trajectories over the North Atlantic Airspace*. [PhD Thesis], Optimization and Control: L'Université de Toulouse; Toulouse. 2018. [cited 2020 Dec. 2]. Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01912385/document/>.
 22. Irvine AM, Shine KP, Stringer AM. What Are the Implications of Climate Change for Trans-Atlantic Aircraft Routing and Flight time? *Transportation Research Part D*. 2016;47:44-53. [cited 2020 Dec. 4]. Available from: <https://www.journals.elsevier.com/transportation-research-part-d-transport-and-environment/>.
 23. Ng HK, Sridhar B, Chen YN, Li J. Three-dimensional Trajectory Design for Reducing Climate Impact of Trans-Atlantic Flights. In: 14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. 2014; doi: 10.2514/6.2014-2289.
 24. Rodionova O, Sbihi M, Delahaye D, Mongeau M. North Atlantic Aircraft Trajectory Optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014;15(5):2202-2212. doi: 10.1109/TITS.2014.2312315
 25. Rodionova O, Sridhar B, Ng HK. Conflict Resolution for Wind-optimal Aircraft Trajectories in North Atlantic Oceanic Airspace with Wind Uncertainties. IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Sacramento CA. 2016. [cited 2020 Dec. 5]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7778010/>.
 26. Graver B, Rutherford D. Transatlantic Airline Fuel Efficiency Ranking 2017. White Paper. ICCT (International Council of Clean Transportation). Washington D. C. [cited 2020 Dec. 6]. Available from: www.theicct.org/.2018.
 27. EU/NAT. NAT Traffic and Fleet Forecast: NAT Traffic Demand Forecast Methodology and Projection 2017-2037; 2018. European and North Atlantic (EUR/NAT) Office. Neuilly-sur-Seine. Cedex. France. NATSPG/54-14. [cited 2020 Dec. 8]. Available from: [https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/NAT%20Documents/NAT%20SPG%20Reports/NAT%20SPG_54%20\(2018\)%20Report.pdf/](https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/NAT%20Documents/NAT%20SPG%20Reports/NAT%20SPG_54%20(2018)%20Report.pdf/).
 28. The Race to Space: How Satellite-based Air Traffic Surveillance is Poised to Transform How We Fly [Internet]. Washington D.C.: Federal Aviation Administration [cited 2020 Oct. 14]. Available at: <https://www.nats.aero/static/the-race-to-space/>.
 29. Welch DJ. En Route Sector Capacity Model. MIT Lincoln Laboratory. Massachusetts

- Institute of Technology. Lexington; 2015. Final Report No. ATC-426, MA. [cited 2020 Oct. 15]. Available from: https://archive.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Welch_2015_ATC-426.pdf/.
30. Kijima M. On the Relaxation Time for Single Server Queues. *Journal of the Operations Research Society of Japan*. 1989;32(1):103-111. [cited 2020 Oct. 10]. Available from: https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jorsj/32/1/_contents/-char/en/.
 31. Newell GF. *Applications of Queuing Theory*. 2nd Edition, Monographs on Statistics and Applied Probability. Chapman and Hall. London. 1982. [cited 2020 Sept. 25]. Available from: <https://www.amazon.com/Applications-queueing-Monographs-probability-statistics/dp/0412107708/>.
 32. Manheim LM. *Fundamentals of Transportation Systems Analysis - Volume 1: Basic Concepts*. The MIT Press. Cambridge. Massachusetts. 1980. [cited 2020 Dec. 12]. Available from: <https://mitpress.mit.edu/books/fundamentals-transportation-systems-analysis-volume-1/>.
 33. Database Name: Air Carrier Statistics (Form 41 Traffic) - All Carriers. [Internet]. Washington DC. Bureau of Transport Statistics [cited 2020 Dec. 15]. Available at: <https://www.transtats.bts.gov/Tables.asp/>.
 34. *Reported Operating Cost and Utilization of Turboprops and Regional Jets Turboprop/Regional Jet Costs and Operations - 12 Months Ended September 2016* [cited 2020 Dec. 15]. Available at: <https://www.planestats.com/bhsw2017mar/>.
 35. NASEM. *Passenger Value of Time, Benefit-cost Analysis and Airport Capital Investment Decisions. Volume 2*. National Academies of Sciences. Engineering, and Medicine. The National Academies Press. Washington D.C. 2015. *Final Report*. doi: 10.17226/22161
 36. USDT. Revised 26 Departmental Guidance on Valuation of Travel Time in Economic Analysis. U.S. Department of Transportation. Office of the Secretary of Transportation. Washington D.C. 2016. [cited 2020 Dec. 16]. Available from: <https://www.transportation.gov/resources/revised-departmental-guidance-valuation-travel-time-economic-analysis/>.
 37. Park Y, O'Kelly EM. Fuel Burn Rates of Commercial Passenger Aircraft: Variations by Seat Configuration and Stage Distance. *Journal of Transport Geography*. 2014;(41):137-147. [cited 2020 Dec. 18]. Available from: <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-transport-geography/>.
 38. Team CW, Pachauri RK, Meyer LA, editors. *Climate Change, 2014. Synthesis Report - Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC*. Geneva. 2014. [cited 2002 Nov. 9]. Available from: https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC_Synthesis_Report.pdf/.
 39. IWG. Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis under Executive order 12866 (September 2016 Revision). Interagency Working Group on the Social Cost of Greenhouse Gases. Washington D.C. 2018. [cited 2020 Dec. 20]. Available from: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf/.
 40. ICAO. North Atlantic Operations and Airspace Manual, V.2020-1 (Applicable from January 2020). International Civil Aviation Organization; European and North Atlantic (EUR/NAT) Office. Villa Emile Bergerat. 2020. [cited 2002 Nov. 6]. Available from: <https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/NAT%20>

- Documents/NAT%20Documents/NAT%20Doc%20007/NAT%20Doc%20007%20%20(EN)%20-%20Edition%20V.2020-2.1_eff%20from%20Jul%202020.pdf/.
41. NATS. Trial Implementation of 25 Nautical Mile Lateral Separation Minimum in the ICAO North Atlantic Region. *Aeronautical Information Circular Y 065/2015*. NATS Services. UK Aeronautical Information Services. Cranford. UK. 2015. [cited 2020 Oct. 20]. Available from: <https://ops.group/blog/wp-content/uploads/2017/11/UK-AIC-Y-0872017.pdf/>.
 42. USDD. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. 4th Edition. United States Department of Defence. Washington D.C. 2008. [cited 2020 Oct. 18]. Available from: https://www.navcen.uscg.gov/pdf/gps/geninfo/2008_SPSPerformanceStandardFINAL.pdf/.
 43. Fly UK. IFR North Atlantic Oceanic Flight and ATC Communication. Version 1.0. 2019; [cited 2020 Oct. 14]. Available from: <https://flyuk.org/reports/>. https://flyuk.org/assets/downloads/resources/documents/online_flying/UKV_TRD_4.8_OCEANIC_FLYING_ATC_COMMUNICATION_V1_0.pdf/.
 44. ICAO Long-Term Traffic Forecasts: Passenger and Cargo. International Civil Aviation Organization, Montreal. 2018. [cited 2020 Dec. 15]. Available from: <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/the-world-of-air-transport-in-2018.aspx/>.
 45. Sridhar B, Ng KH, Linke F, Chen YN. Impact of Airspace Charges on Transatlantic Aircraft Trajectories. *15th AIAA Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference*. June 22-26. Dallas. TX. 2015. [cited 2020 Dec. 20]. Available from: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2015-2596/>.
 46. EEC/FAA. Comparison of Air Traffic Management-Related Operational Performance: U.S./Europe (2017). U.S. FAA (Federal Aviation Association. Air Traffic Organization System Operations Services. Washington. D.C.; EUROCONTROL. European Organisation for the Safety of Air Navigation. Brussels. 2019. [cited 2020 Dec. 19]. Available from: <https://www.eurocontrol.int/publication/useurope-comparison-air-traffic-management-related-operational-performance-2017/>.
 47. EEC. COVID 19 Impact on European Air Traffic, EUROCONTROL Comprehensive Assessment. EUROCONTROL. European Organisation for the Safety of Air Navigation. Brussels. 2020. [cited 2020 Dec. 12]. Available from: <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-comprehensive-assessment-covid-19s-impact-european-air-traffic/>.
 48. Daily Traffic Variation – States [Internet]. Brussels. EUROCONTROL [cited 2020 December 13]. Available at: www.eurocontrol.int/Economics/DailyTrafficVariation/.
 49. Connecting Operational Stakeholders to the EUROCONTROL Network Manager Operations Centre [Internet]. Brussels. EUROCONTROL. Network Operations Portal [cited 2020 Oct. 12]. Available at: <https://www.eurocontrol.int/portal/network-operations-portal/>.
 50. Why Transatlantic Return Matters so Much to Airlines [Internet]. [cited]. Available at: <https://www.flightglobal.com/networks/why-transatlantic-return-matters-so-much-to-airlines/140071.article?adredir=1/>.
 50. IATA. WATS-World Air Transport Statistics 2019. Montreal: International Air Transport Association [cited 2020 Dec. 15]. Available from: <https://www.iata.org/en/publications/store/world-air-transport-statistics/>.
 51. Air Traffic Statistics. Montreal: International Air Transport Association [Internet].

- [cited 2020 Dec. 16]. Available from: <https://www.iata.org/en/>.
52. Number of Atlantic air traffic passengers traveling to or from the United States from 2006 to 2020 (in million passengers) [Internet]. [cited 2020 Dec. 15] Available at: <https://www.statista.com/statistics/193551/atlantic-air-traffic-passengers-travelling-to-or-from-the-us/>.
 53. Recovery Delayed as International Travel Remains Locked Down [Internet]. Madrid: International Air Transport Association [Internet]. [cited 2020 Dec. 22]. Available at: <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2020-07-28-02/>.
 54. Longitudinal Airspace Separations Reduced Over North Atlantic [Internet]. [cited]. Available at: <http://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2011-05-09/longitudinal-airspace-separations-reduced-over-north-atlantic/>.
 55. Transatlantic flight [Internet]. [cited 2020 Nov. 12]. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Transatlantic_flight/.
 56. EEC. Aircraft Performance Summary Tables for the Base of Aircraft Data (BADA). EUROCONTROL Experimental Centre Brétigny-sur-Orge, CEDEX. Revision 3.3, EEC Note No. 18/00, 2000. [cited 2020 Dec. 18]. Available from: <https://www.eurocontrol.int/node/10065/>.

Information about the authors:

Janić Milan, PhD, Senior Adviser
ORCID: 0000-0001-5050-7019
E-mail: milanjanic3@gmail.com

To cite this article:

Janić M. Analysing and Modeling Performances of a Long-haul Air Route Network. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):5-36. doi: 10.17816/transsyst2021715-36.

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов

УДК 624.87

DOI 10.17816/transsyst20217137-45

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

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

ПОНТОННЫЕ (НАПЛАВНЫЕ) МОСТЫ ИЗ НЕКОНДИЦИОННЫХ ТРУБ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Аннотация. Объектом исследования является понтонное звено, где роль несущей конструкции выполняют некондиционные трубы. Строительство наплавных мостов является разновидностью в мостостроении и является важнейшей составной частью развития транспортной инфраструктуры нашей страны и за рубежом. В случае, когда нет возможности строительства капитальных или низководных мостов используются наплавные мосты или паромные переправы. Наплавные мосты очень удобно применять при возведении капитальных, при перекрытии основного хода трассы вместо временных стационарных мостов. Для сравнительного анализа применения разработанного решения был произведен примерный расчет стоимости понтона. Анализ стоимостей на рынке аналогов показал что стоимость только несущей конструкции понтона аналогичной грузоподъемности на основе пластиковых труб, будет значительно больше стоимости понтона из некондиционных. В ходе исследования был проведен анализ возможности применения некондиционных труб для сооружения наплавных мостов. Некондиционные трубы являются перспективным материалом для строительства наплавных мостов в силу обеспечения плавучести, низкой стоимости, такие трубы являются легкодоступным сырьем.

Ключевые слова: наплавной мост, понтон, наплавные мосты, некондиционные трубы, водопропускные сооружения, искусственные сооружения, инженерные сооружения.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Design and construction of roads, subways

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

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

PONTON (FLOW) BRIDGES FROM METAL POLYETHYLENE PIPES

Annotation. The object of the study is a pontoon link, where the role of the bearing structure is performed by non-standard pipes. Construction of surface bridges is widely used

in bridge construction and is an essential part of the development of transport infrastructure of our country and abroad. In the case where it is not possible to build capital or low-water bridges, surface bridges or ferry crossings are used. Built-up bridges are very convenient to use in the construction of capital bridges, when the main course of the route is blocked instead of temporary stationary bridges. In order to compare the application of the developed solution, an approximate calculation of the cost of the pontoon was made. Analysis of costs in the market of analogues showed that the cost of only the bearing structure of a pontoon of similar load capacity based on plastic pipes, will be much higher than the cost of pontone out of non-standard. The study examined the possibility of using non-standard pipes for the construction of weld bridges. Non-standard pipes are a promising material for construction of weld bridges due to buoyancy, low cost, such pipes are easily available raw materials.

Key words: floating bridge, pontoon, floating bridges, substandard pipes, culverts, artificial structures, engineering structures.

ВВЕДЕНИЕ

Наплавной мост – мост на плавучих опорах, представляющий собой искусственное сооружение, предназначенное для движения транспортных средств и пешеходов в местах пересечения автомобильными дорогами водных преград. Главной проблемой наплавных мостов является перевозка к месту переправы и небольшое количество рыночных предложений. Всё это делает сооружение наплавных мостов дорогим. Транспортировка на дальние расстояния может занимать до 10 % от стоимости самого моста [1].

Нами было решено использовать некондиционные ПНД трубы в качестве основы понтонного моста, так как аналогичные исследования еще никем не проводились [2].

Целью исследования было определить возможность строительства понтонного моста из некондиционных труб, проанализировать его прочностные характеристики, и сравнить стоимость с понтоном, изготовленным из фабричных пластиковых частей.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕКОНДИЦИОННЫХ ТРУБ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОНТОННОГО МОСТА

В последние годы на внутреннем рынке возрастает спрос на потребление некондиционного материала. Некондиционные изделия – это изделия, которые подверглись некоторым (как правило, незначительным) изменениям или обладающие небольшим дефектом. В то же время они вполне пригодны для многих эксплуатационных нужд [3]. К числу некондиционных товарных позиций в сегменте труб и традиционно относят товары, бывшие в эксплуатации; лежалые трубы и трубы, при

изготовлении которых не выдержаны общепринятые нормативы и стандарты качества.

Некондиционные трубы могут иметь следующие дефекты:

- сколы по краям труб;
- различную толщину стенок;
- различные механические повреждения (вмятины, подрезы, трещины) [4].

Основным преимуществом некондиционных материалов является их низкая стоимость по сравнению с качественной продукцией. Так же трубы могут иметь любой отличный от ГОСТ признак, что делает его некондиционным. Экономия на некондиционных трубах – один из оптимальных методов экономии при строительных работах. Данные материалы в основном не имеют никакого дальнейшего применения, и применение в мостах дает им вторую жизнь, и сокращает затраты на покупку новых материалов.

Первое наше исследование мы провели в феврале 2020 года. Исследование было экспериментальное. Цель заключалась в проверке устойчивости понтона из ПНД труб к отрицательной температуре. Мы закупили на «Ижорском трубном заводе» полиэтиленовые трубы; крепления для их соединения, и необходимые расходные материалы.

Понтон монтировался непосредственно у озера «Орлинское». Испытание, которое понтон прошёл успешно, это: перенес вмерзание в лед в зимний период, тем самым зарекомендовал себя как вполне надежная конструкция. Так же понтон может служить для размещения насосов, как в промышленных целях, так и для служебного пользования [5].

Результаты, которые были получены:

1. Понтон не разрушился при замерзании воды в ПНД трубах. Внутри труб попала вода, тем самым, при отрицательной температуре она замерзла и превратилась в комок льда. Труба не лопнула и не разорвалась.
2. Простота и легкость проведения сварочных конструкций.
3. Так же при монтаже понтона, было установлено, что трубы из ПНД устойчивы к ударам металлических изделий.
4. Экологическая безопасность.

НЕДОСТАТКИ В ХОДЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ НЕКОНДИЦИОННЫХ ТРУБ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Недостаток, который удалось выявить в процессе монтирования, это наличие сварных швов на поплавах. Торцевание труб производилось с помощью ПНД листа методом экструзионной сварки [6]. Сырье, из которого производились труба, лист и сварочный пруток, не всегда было идентичны друг другу по составу. Так же был обнаружен и недостаток в

виде сильного ветра, который отрицательно влияет на устойчивость данного понтона. Так же существует проблема пропуска судов при наличии понтонной переправы через водоём, но для понтонного моста эту проблему можно решить достаточно легко, с помощью вывода нескольких звеньев переправы на время пропуска судов.

Было запланировано еще несколько исследований, но в связи с эпидемиологической обстановкой в мире, они были отменены.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕКОНДИЦИОННЫХ ТРУБ

Для сравнительного анализа применения разработанного решения был произведен примерный расчет стоимости понтона, в котором средняя рыночная цена некондиционной трубы составляет 15–20 тыс. руб./т. Для сооружения одного понтона стоимость труб в среднем будет составлять 400 тыс. руб. Анализ стоимостей на рынке аналогов показал стоимость только несущей конструкции понтона аналогичной грузоподъемности на основе пластиковых частей, взятого в качестве прототипа, составит 1,2 млн. руб. [7].

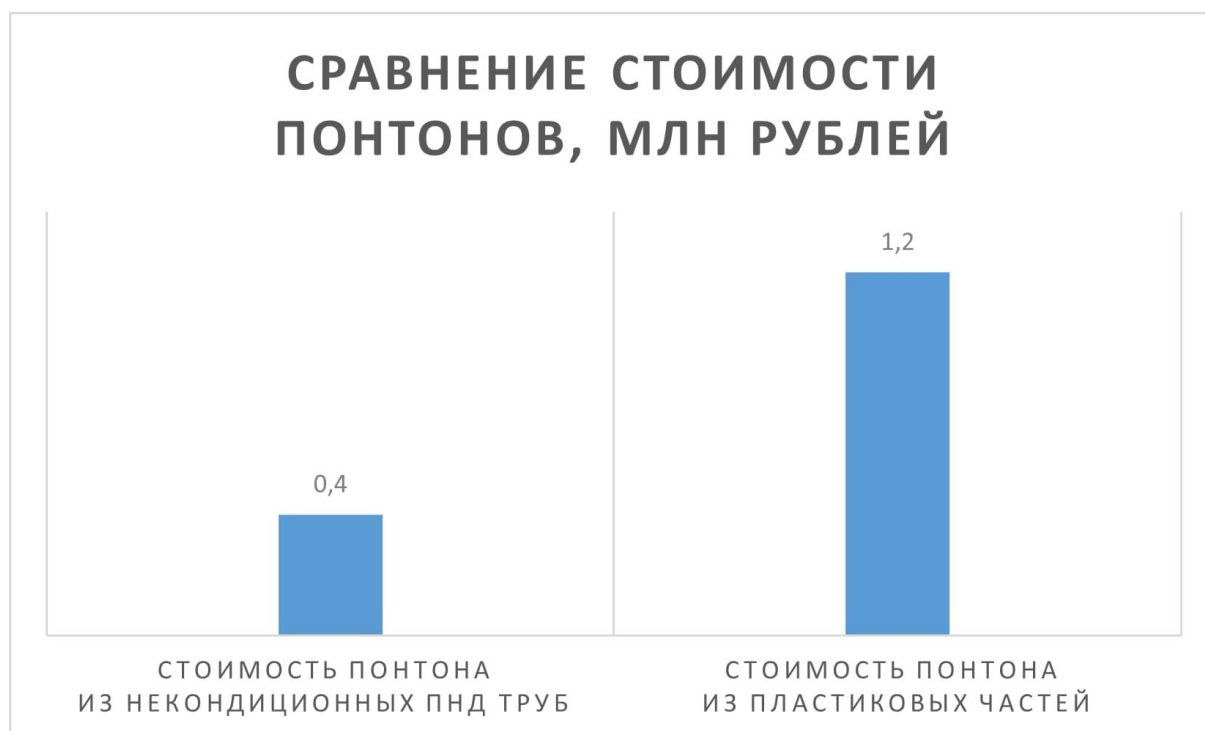


Рис. 1. Диаграмма «Сравнение стоимости понтонов»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования было выявлено, что в качестве основной конструкции понтона, обеспечивающей плавучесть, можно

использовать трубы больших диаметров или большее количество труб, но с меньшим наполнителем внутри [8].

Согласно ГОСТ 18599-2001 ПНД трубы имеют следующие характеристики:

Таблица 1. Характеристики труб применяемые в строительстве

Материал труб	Наружный диаметр, мм	Толщина стенок, мм	SDR, величина соотношения диаметра к толщине стенок	PN, рабочее (номинальное) давление, бар
ПЭ 32	10–160	2–20,8	21; 13,6; 9 и 6	2,5; 4; 6 и 10
ПЭ 63	40 – 2 000	2–108,9	21; 17,6; 13,6 и 11	5; 6; 8 и 10
ПЭ 80	10 – 2 000	2–108,9	26; 21; 17,6; 17; 13,6; 11; 9; 7,4	5; 6,3; 7,5; 8; 10; 12,5; 16; 20
ПЭ 100	16 – 1 200	2–108,9	33; 26; 21; 17,6; 17; 13,6; 11; 9 и 7,4	5; 6,3; 8; 9,5; 10; 12,5; 16; 20 и 25

Для проверки, какое может выдержать давление ПНД труба, у нас не было необходимого оборудования [9]. Но нам удалось проверить ударную прочность с помощью кувалды. Мы наносили удары восьмикилограммовой кувалдой в одну точку несколько раз подряд, целостность трубы не была нарушена [10].

При сборке понтона, было решено расположить трубы перпендикулярно оси мостового перехода, как показано на Рис. 2.

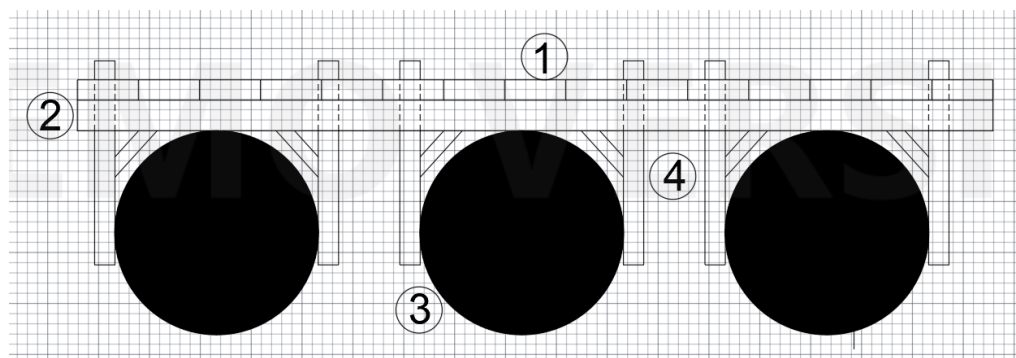


Рис. 2. Поперечный разрез понтонного звена

- 1- Поперечный настил;
- 2- Продольный настил;
- 3- ПНД труба;
- 4- Крепление труб

Также, после сравнительного анализа стоимости понтонного моста, выявлено, что некондиционные и лежалые трубы являются самым

дешевым трубопрокатом, что делает стоимость сооружения понтона весьма малой, при этом по техническим характеристикам трубы вполне пригодны для сооружения понтонов [11].

Понтон из труб имеет широкое применение в различных областях, главным из которых является сооружение моста-ленты и в качестве паромной переправы [12]. Но также может служить причалом или плавучей опорой для постройки. Понтонное звено, несущей частью которого являются 3 ПНД трубы, легко выдерживает двух человек (160 кг), и груз 100 кг.

В ходе проведенного исследования по понтонным (наплавным) мостам из ПНД некондиционных труб было установлено, что главное достоинство этих мостов заключается в дешевизне [13]. В текущее время сложно найти большое количество средств на какую-либо постройку [14].

Когда нет возможности строительства капитальных или низководных мостов используются наплавные мосты или паромные переправы. Наплавные мосты очень удобно применять при возведении капитальных, при перекрытии основного хода трассы вместо временных стационарных мостов. Для сравнительного анализа применения разработанного решения был произведен примерный расчет стоимости понтона, и можно с точностью сказать, что постройка из некондиционных ПНД труб будет значительно дешевле, чем на основе пластиковых труб [15]. Особенно в связи с нынешней экономической ситуацией в стране и мире. Некондиционные трубы являются легкодоступным сырьем, обладают низкой стоимостью, как было сказано ранее. Вполне подходят в качестве строительного сырья для понтонного мостостроения.

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. Ермошин Н.А., Лазарев Ю.Г., Егосин А.М., Змеев А.Т. Планирование развития дорожной сети с учетом принципов многокритериальной оптимизации // Путь навигатор. – 2019. – № 38(64). – С. 24-31. [Ermoshin NA, Lazarev YuG, Egoshin AM, Zmeev AT. Planirovanie razvitiya dorozhnoi seti s uchetom printsipov mnogokriterial'noi optimizatsii. Putevoi navigator. 2019;(38(64)):24-31. (In Russ.)].
2. Аверченко Г.А., Огурцов Г.Л. Перспективы использования композитного материала в мостостроении // IV Международная научно-практическая конференция: «Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития»; Апрель 3, 2019; Петрозаводск. [Averchenko GA, Ogurtsov GL. Composite material in bridge construction the way to perfection. (Conference proceedigs) IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya:

- «Fundamental'naya i prikladnaya nauka: sostoyanie i tendentsii razvitiya»; 2019 Apr 3; Petrozavodsk (In Russ.)). Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41475166>. Ссылка активна на 23.12.2020.
3. Яковлев Ю.М., Горячев М.Г. Строительство водопропускных труб на автомобильных дорогах: учебное пособие. – М.: МАДИ, 2011. – 160 с. [Yakovlev YuM, Goryachev MG. Construction of culverts on highways: schoolbook. Moscow: MADI, 2011. 160 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19645534>. Ссылка активна на 23.12.2020.
 4. Лисов В.М. Водопропускные трубы под. – Воронеж.: ВГАСА, 1996. – 123 с. [Lisov VM. Vodopropusknye truby pod nasypami. Voronezh: VGASA, 1996. 123 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001749438>. Ссылка активна на 23.12.2020.
 5. Подвальный Р.Е., Потапов А.С., Янковский О.А. Технология строительства металлических гофрированных водопропускных труб. – М.: Транспорт, 1978. – 78 с. [Podval'nyj RE, Potapov AS, Yankovskij OA. Tekhnologiya stroitel'stva metallicheskih gofrirovannyh vodopropusknyh trub. Moscow: Transport; 1978. 78 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007791101>. Ссылка активна на 23.12.2020.
 6. ОДМ 218.2.001-2009. Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон) [ODM 218.2.001-2009. Rekomendatsii po proektirovaniyu i stroitel'stvu vodopropusknykh sooruzhenii iz metallicheskih gofrirovannykh struktur na avtomobil'nykh dorogakh obshchego pol'zovaniya s uchetom regional'nykh uslovii (dorozhno-klimaticheskikh zon) (In Russ.)]. Доступно по: <http://docs.cntd.ru/document/1200074825>. Ссылка активна на 23.12.2020.
 7. ГОСТ 32871-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Трубы дорожные водопропускные. Технические требования (Переиздание) [GOST 32871-2014 Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Truby dorozhnye vodopropusknye. Tekhnicheskie trebovaniya (Pereizdanie) (In Russ.)]. Доступно по: <http://docs.cntd.ru/document/1200119826>. Ссылка активна на 23.12.2020.
 8. ГОСТ 18599-2001 Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия (с Поправкой, с Изменениями N 1, 2). [GOST 18599-2001 pressure Pipes made of polyethylene. Technical specifications (as Amended, with Changes N 1, 2) (In Russ.)]. Доступно по: <http://docs.cntd.ru/document/1200029492>. Ссылка активна на 23.12.2020.
 9. ГОСТ 22689-2014 Трубы и фасонные части из полиэтилена для систем внутренней канализации. Технические условия. [GOST 22689-2014 pipes and fittings made of polyethylene for internal Sewerage systems. technical specifications. (In Russ.)]. Доступно по: <http://docs.cntd.ru/document/1200114241>. Ссылка активна на 23.12.2020.
 10. ГОСТ 32415-2013 Трубы напорные из термопластов и соединительные детали к ним для систем водоснабжения и отопления. Общие технические условия. [GOST 32415-2013 pressure Pipes made of thermoplastics and connecting parts to them for water supply and heating systems. General technical conditions. (In Russ.)]. Доступно по: <http://docs.cntd.ru/document/1200108752>. Ссылка активна на 23.12.2020.
 11. Алексеев С.В., Трепалин В.А., Шевченко С.М., Трифонова А.А. Современные

- методы совершенствования конструкций деформационных швов автодорожных мостов // Путь навигатор. – 2020. – № 43(69). – С. 3. [Alekseev SV, Trepalin VA, Shevchenko SM, Trifonova AA. Sovremennye metody sovershenstvovaniya konstruktsii deformatsionnykh shvov avtodorozhnykh mostov. Putevoi navigator. 2020;(43(69)):3. (In Russ.)].
12. Копыленко В.А. Малые водопропускные сооружения на дорогах России: учеб. пособие. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 444 с. [Kopylenko VA. Small culverts on the roads of Russia: 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 23.12.2020.
 13. Бельшева В.С., Костылева В.В., Карабанов П.С. и др. Техническое регулирование: базовая основа качества материалов, товаров и услуг – 2019. [Belysheva VS, Kostyleva VV, Karabanov PS, et al. Technical regulation: the basic basis for the quality of materials, goods and services. 2019. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41371647>. Ссылка активна на 23.12.2020.
 14. Ярцев В.П., Долженкова М.В. Прогнозирование долговечности кровельных битумно полимерных материалов. // Вестник Тамбовского государственного технического университета – 2012. – № 4. – С. 1042–1050. [Yartsev VP, Dolzhenkova MV. Forecasting the durability of roofing bitumen-polymer materials. Bulletin of the Tambov state technical University. 2012;(4);1042-1050. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18610059>. Ссылка активна на 23.12.2020.
 15. Адамов. А.А., Лаптев М.Ю. Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов – 2012. – № 3. – С. 72–77. [Adamov AA, Laptev MYu. Analysis of the domestic and foreign regulatory framework for mechanical testing of polymer composite materials. Constructions of composite materials. 2012;(3);72-77. (In Russ.)]. Доступно по <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17904736>. Ссылка активна на 23.12.2020.

Сведения об авторах:

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

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

Information about the authors:**Kirill A. Vasilev**, student;

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

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

Vyacheslav A. Borisov, student;

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

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

Gleb A. Averchenko, assistant;

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

E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Цитировать:

Васильев К.А., Борисов В.А., Аверченко Г.А. Понтонные (наплавные) мосты из некондиционных труб полиэтилена низкого давления // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 37–45. doi: 10.17816/transsyst20217137-45

To cite this article:

Vasiliev KA, Borisov VA, Averchenko GA. Ponton (flow) bridges from metal polyethylene pipes. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):37-45. doi: 10.17816/transsyst20217137-45

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Математическое моделирование

УДК 519.873

DOI 10.17816/transsyst20217146-58

© В. А. Смагин¹, В. П. Бубнов², Ш. Х. Султонов²

¹Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

²Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИМАЛЬНОГО КВАНТОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. Рассматриваются различные дополнительные математические аспекты, связанные с решением проблемы оптимального в смысле заполнения квантования информации, такие как контроль элементов кванта, учёт ошибок элементов кванта, определение количества информации при квантовании, определение численных значений фракталов распределений, представленных в виде последовательного фрактального распределения. Целью статьи является рассмотрение дополнительных вопросов на основе конкретного «тяжелого» распределения вероятностей – нормального распределения. Рассмотренные вопросы выполнены с целью облегчить решение прикладных задач исследователям, занимающимся проблемой квантования информации.

Ключевые слова: оптимальное квантование информации, квант, ошибка элемента кванта, вероятность, контроль, распределение нормальное и гипердельтное, фрактал.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Math modeling

© Vladimir A. Smagin¹, Vladimir P. Bubnov², Shokhrukh Kh. Sultonov²

¹A.F. Mozhaysky Military Space Academy

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(St. Petersburg, Russia)

MATHEMATICAL MODELS FOR CALCULATING THE QUANTITATIVE CHARACTERISTICS OF THE OPTIMAL QUANTIZATION OF INFORMATION

Abstract: Various additional mathematical aspects related to solving the problem of optimal information quantization in the sense of filling are considered, such as control of quantum elements, accounting for errors of quantum elements, determining the amount of

information during quantization, and determining the numerical values of fractals of distributions represented as a sequential fractal distribution. The purpose of the article is to consider additional questions based on a specific "heavy" probability distribution – the normal distribution. The considered questions are made in order to facilitate the solution of applied problems for researchers dealing with the problem of information quantization.

Keywords: optimum quantization of the information, quantum, an error of an element of quantum, probability, control, distribution normal and hiperdelta, a fractal.

ВВЕДЕНИЕ

Часть (порция) информации называется квантом. Процесс представления определённого количества информации в виде совокупности квантов называется квантованием информации. Информационные процессы могут сопровождаться своими издержками. Например, при звуковой трансляции текстов, музыки по радио, телевидению временные издержки связаны с необходимостью введения пауз, позволяющих воспринимать их на слух. Письменное представление содержания книги связано с неизбежными издержками на размер шрифта, интервалы между словами, строками. За введение любых издержек, позволяющих улучшить качество восприятия, передачи, хранения информации приходится платить. Минимизировать величину издержек и их стоимость необходимо и в теории информации, особенно в условиях современного информационного бума. По мере увеличения объемов информации, участвующих в процессе хранения, обработки и передачи, растет значимость проблемы оптимального квантования информации.

Первые основополагающие результаты решения класса задач оптимального квантования случайной величины были получены в [1, 2]. В процессе решения практических задач, в которых применяется оптимальное в смысле заполнения квантование информации, разработчику математических моделей систем необходимо рассматривать специфические прикладные вопросы, дополняющие и расширяющие количественные характеристики предложенной математической модели [1]. К таким вопросам можно отнести, например, влияние ошибок на операцию квантования, определение количества используемой информации, учёт контроля элементов квантов, приближённое решение интегрального уравнения, определения плотности вероятности и распределения величины оптимального кванта, нахождение численных значений фракталов распределения. Могут также ставиться и решаться и другие вопросы, не предусмотренные в данной статье [3-8].

ОСНОВНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО КВАНТОВАНИЯ

В данной статье используется модель Андропова А.М., Бокоева Т.Н. [1]. Она представляется в следующем виде:

$$\Psi(x) = (x+c) \int_0^{\infty} (E(z/x)+1) dF(z) \quad (1)$$

где $\Psi(x)$ – математическое ожидание квантуемой величины распределения $F(x)$, x – величина кванта, c – величина пробела между квантами, E – наибольшая целая часть числа, заключённого в скобках. Авторы [1] применяют обозначение $M(x) = \Psi(x)$. Целью статьи является рассмотрение дополнительных вопросов на основе конкретного распределения вероятностей – нормального распределения. В качестве примера берётся нормальное распределение со следующими значениями параметров $m=120h$, $\sigma=20h$, $f(x) = dnorm(x, m, \sigma)$ – плотность вероятности, где h является условной единицей времени. Решение (1) представлено в виде графика на Рис. 1. Оптимальная величина кванта, при которой минимальное значение квантованной величины равно $M(31) = 134,139h$.

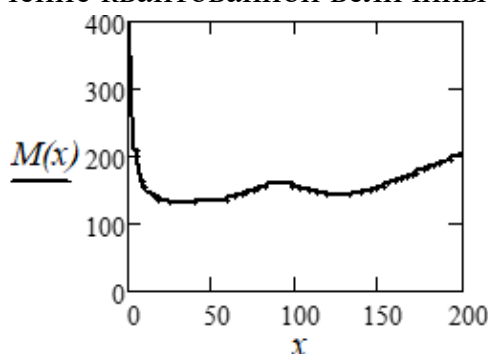


Рис. 1. Зависимость математического ожидания от величины кванта

Рассмотрим указанные во введении вопросы при следующих исходных данных:

нормальное распределение и величина пробела между квантами $m=120h$, $\sigma=20h$, $f(x) = dnorm(x, m, \sigma)$; $c=5h$ вероятность сохранения элемента кванта исправным, $p=0,95$ затраты времени на восстановление неисправного элемента кванта $\tau=2,5h$.

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ЭЛЕМЕНТОВ КВАНТА НА ОПЕРАЦИЮ КВАНТОВАНИЯ

1. Предположим, что средняя величина времени на исправление всех ошибок в кванте равна $\tau \cdot x(1-p^x)$. Тогда выражение для определения величины оптимального кванта и связанных с новым значением пробела $c + \tau \cdot x(1-p^x)$ информационных затрат на квантование будет определяться из выражения:

$$M1(x) = \left[x + c + \tau \cdot x(1 - p^x) \right] \cdot \int_0^{\infty} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{x}\right) + 1 \right) \cdot f(z) dz. \quad (2)$$

2. Предположим, что $\tau_1 = 5h$ а среднее время на исправление ошибок кванта, определённое при условии применения биномиального распределения ошибок кванта будет определяться по формуле (3).

$$b(x) = \tau_1 \cdot \sum_{k=0}^x \left[\frac{x!}{(k-1)! (x-k)!} \cdot (1-p)^k \cdot p^{x-k} \right]. \quad (3)$$

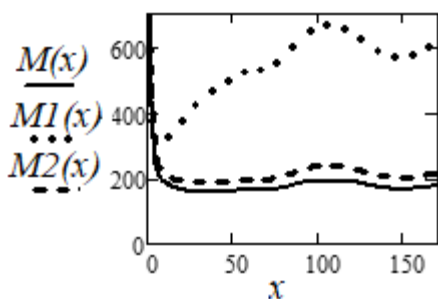


Рис. 2. Математические ожидания рассчитанных квантованных функций

На Рис. 2 представлены для сравнения математические ожидания трёх рассчитанных квантованных функций $M(x)$, $M1(x)$, $M2(x)$.

Оптимальные значения квантов и математические ожидания квантованных величин равны:

$$M(31) = 157,032, M1(31) = 426,155, \\ M2(31) = 191,223.$$

Следует отметить, что оптимальная величина кванта сохраняется постоянной, равной $x_0 = 31$ во всех трёх случаях, а затраты квантования изменяются, что указывается в правых частях трёх равенств. Величина пробелов зависит от величины тактического значения c и величины времени для исправления ошибок квант, которая добавляется к c . Средняя величина времени для исправления ошибок зависит от вида распределения ошибок в кванте, вероятности ошибки элемента кванта и затрат на исправление одиночной ошибки в нём. На Рис. 3 и 4 показаны уточнение Рис. 2 и затраты на исправление (восстановление) в рассмотренных двух примерах $d(x) = \left[\tau \cdot x \cdot (1 - p^x) \right]$ и $b(x)$, определяемого формулой (3).

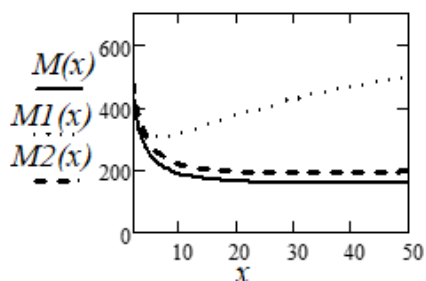


Рис. 3. Математические ожидания рассчитанных квантованных функций с учетом затраты на восстановление

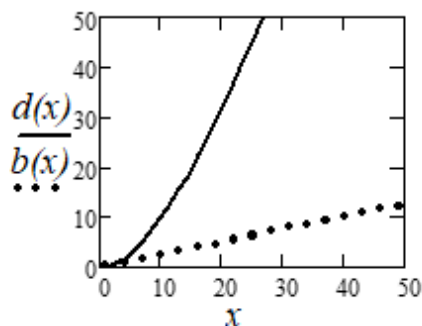


Рис. 4. Зависимость затрат на исправление ошибок

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ И ЕЁ МАКСИМУМА ПРИ КВАНТОВАНИИ

1. Предположим, что за единицу времени (скорость) передаётся $I=10\text{ед./}h$ информации. Тогда математическое ожидание количества информации определяется выражением:

$$M3(x) = (x \cdot I + c) \cdot \int_0^{\infty} (\text{trunc}(\frac{z}{x}) + 1) \cdot f(z) dz. \quad (4)$$

2. При условии 1, но с учётом задержки на восстановление ошибок в кванте

$$b(x) = \tau_1 \cdot \sum_{k=0}^x \left[\frac{x!}{(k-1)! \cdot (x-k)!} \cdot (1-p)^k \cdot p^{x-k} \right]. \quad (5)$$

$$M4(x) = (x \cdot I + c + b(x)) \cdot \int_0^{\infty} (\text{trunc}(\frac{z}{x}) + 1) \cdot f(z) dz. \quad (6)$$

На Рис. 5 представлены графики для выражений (4) и (6).

Из Рис. 5 следуют оптимальные величины квантов равны $x_{30} = 31h$, $x_{40} = 110h$ и значения количеств информации при них соответственно $1,374 \times 10^3$ ед., $1,916 \times 10^3$ ед.

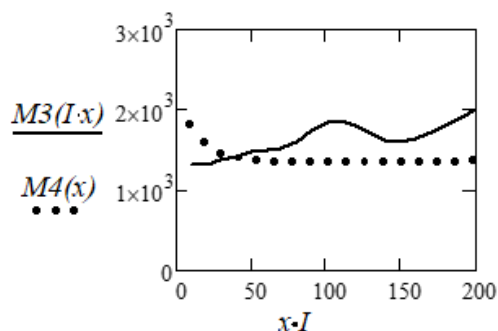


Рис. 5. Зависимость математического ожидания количество информации от величины кванта и задержек на восстановление

КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ КВАНТА В ПРОЦЕССЕ КВАНТОВАНИЯ

Исходные данные:

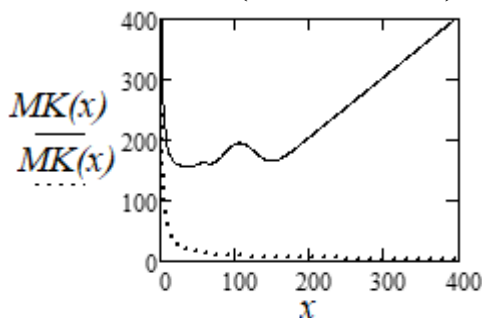
$$m = 120h, \sigma = 20h, f(x) = \text{dnorm}(x, m, \sigma), q = 1, c = 5h, q_1 = 0,5.$$

где q, q_1 – вероятности ошибок элементов кванта.

На Рис. 6 и 7 представлены следующие значения математических ожиданий квантованного распределения:

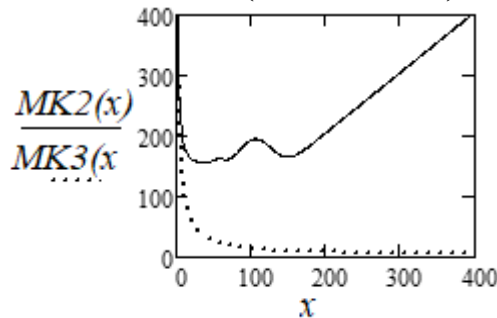
$$MK(x) = (x \cdot q^x + c) \cdot \int_0^{\infty} \left(\text{trunc} \left(\frac{z}{x} \right) + 1 \right) \cdot f(z) dz, \quad MK1(x) := (x \cdot q1^x + c) \cdot \int_0^{\infty} \left(\text{trunc} \left(\frac{z}{x} \right) + 1 \right) \cdot f(z) dz,$$

$$MK2(x) = (x \cdot q^x + c) \cdot \int_0^{\infty} \left(\text{trunc} \left(\frac{z}{x \cdot q^x} \right) + 1 \right) \cdot f(z) dz, \quad MK3(x) := (x \cdot q1^x + c) \cdot \int_0^{\infty} \left(\text{trunc} \left(\frac{z}{x \cdot q1} \right) + 1 \right) \cdot f(z) dz.$$



$$MK(200) = 205,002, \quad MK1(200) = 205,002$$

Рис. 6. Математические ожидания квантованного распределения с учетом ошибок с вероятностью q



$$MK2(200) = 205,002, \quad MK3(200) = 9,207$$

Рис. 7. Математические ожидания квантованного распределения с учетом ошибок с вероятностью $q1$

Из графиков кривых на рисунках следует, что увеличение вероятности ошибки элементов оптимального (и любого) кванта увеличиваются итоговые показатели квантованного с пробелами распределения вероятностей (в данном случае с 5 единиц до 9,207 единиц).

ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВАНИЯ ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ФРАКТАЛОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Для примера принимаются следующие исходные данные: $x = 0, 1..200$, $m = 120h$, $\sigma = 20h$, $f(x) = \text{dnorm}(x, m, \sigma)$.

В рассматриваемом примере применим для ограничения числа определяемых фракталов распределения гипердельтную аппроксимацию [9-10] нормального распределения и ограничимся двумя начальными моментами. Тогда плотность вероятности представится в виде:

$$f(x) \approx \frac{1}{2} \cdot (\Delta(x - m + \sigma) + \Delta(x - m - \sigma)), \quad (7)$$

где $\Delta(x)$ – дельта-функция Дирака, равная $\Delta(x) = \frac{d}{dx} \Phi(x)$.

В нашем случае $f(x) \approx \frac{1}{2} \cdot (\Delta(x - 120 + 20) + \Delta(x - 120 - 20))$.

$$\int_0^{\infty} E\left(\frac{z}{x}\right) \cdot f(z) dz - 1 = 0. \quad (8)$$

Выполним приближённое решение данного интегрального уравнения с помощью гипердельтной аппроксимации. Для примера рассмотрим определение двух начальных момента уравнения (8). Оно иллюстрируется следующими выражениями:

математического ожидания

$$MM(x) = (x+c) \cdot \int_0^{\infty} \left(trunc\left(\frac{z}{x}\right) + 1 \right) \cdot \left[\frac{1}{2} (\Delta(z-m+\sigma)) + \Delta(z-m-\sigma) \right] dz, \quad (9)$$

которое приводится к виду:

$$MM(x) = \frac{1}{2} \cdot (x+c) \cdot \left(trunc\left(\frac{m-\sigma}{x}\right) + 1 \right) + \left(trunc\left(\frac{m+\sigma}{x}\right) + 1 \right); \quad (10)$$

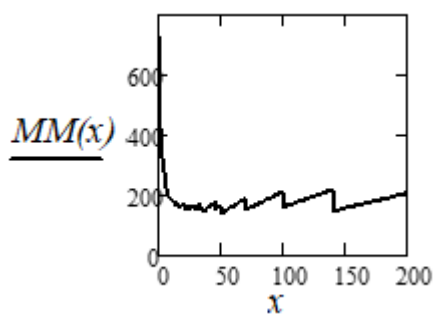
второго начального момента

$$MB(x) = \frac{1}{2} \cdot (x+c)^2 \cdot \left(trunc\left(\frac{m-\sigma}{x}\right) + 1 \right)^2 + \left(trunc\left(\frac{m+\sigma}{x}\right) + 1 \right)^2; \quad (11)$$

среднее квадратическое отклонение определяется по выражениям (10) и (11)

$$\sigma\sigma(x) = \sqrt{MB(x) - MM(x)^2}. \quad (12)$$

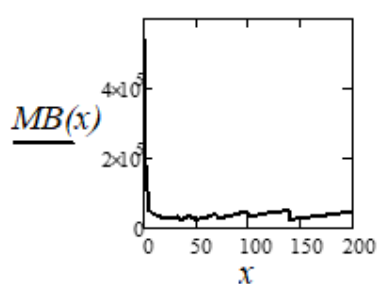
На Рис. 8-10 представлены графики функций 10, 11, 12.



$$M(31) = 157,032$$

$$M(30) = 157,5$$

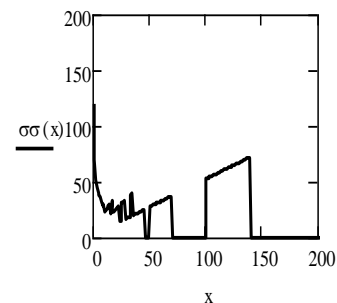
Рис. 8. Математическое ожидание с учетом гипердельтной аппроксимации



$$M(31) = 2,657 \times 10^4$$

$$M(30)^2 = 2,481 \times 10^4$$

Рис. 9. Второй начальной момент



$$\sigma\sigma(31) = 18$$

Рис. 10. Среднее квадратическое отклонение

В частности, коэффициент корреляции определяется с помощью выражений

$$\eta\eta(x) = \frac{\sigma\sigma(x)}{MM(x)}, \quad \eta\eta(31) = 0,111, \quad \frac{20}{120} = 0,167, \quad \frac{18}{157,032} = 0,115.$$

Плотность вероятности и функция распределения оптимального кванта определяются из выражений: $x_0 = -100, -99..120$, $f(x_0) = dnorm(x_0, 31, 27, 345)$, $ff(x) = dnorm(x, 157,5, 18)$, $F_0(x_0) = \int_{-100}^{x_0} f_0(z_0) dz_0$, $F_0(31) = 0,5$.

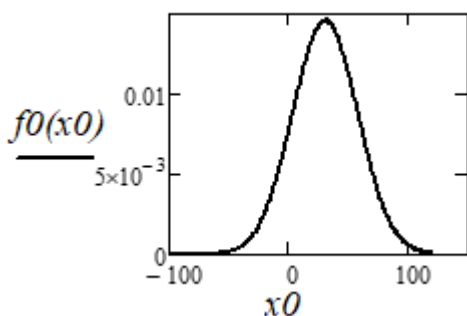


Рис. 11. Плотность вероятности

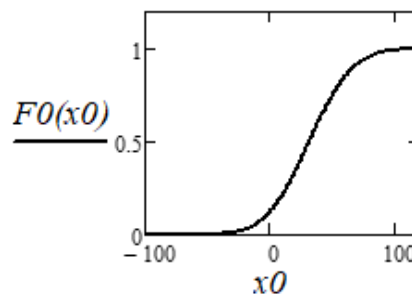


Рис. 12. Функция распределения оптимального кванта

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ФРАКТАЛОВ

Значения фракталов определяются из выражений [11]. Пусть задана плотность вероятности $f(x)$ на полуинтервале $[0, \infty)$, требуется представить её в виде убывающей фрактальной последовательности, составленной базовым, основным фракталом Φ_0 и множеством субфракталов $C\Phi_i$, $i=1, 2, 3...$ Тогда можно принять следующую формулу для производства фрактализации:

$$\int_0^{\infty} E\left(\frac{z}{x}\right) \cdot f(z) dz - 1 = 0, \quad f(x) = \frac{1}{2} \cdot (\Delta(x-m+\sigma) + \Delta(x-m-\sigma)). \quad (13)$$

В нашем случае получаем уравнение

$$\int_0^{\infty} trunc\left(\frac{z}{x}\right) \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (\Delta(z-m+\sigma) + \Delta(z-m-\sigma))\right] dz - 1 = 0 \quad (14)$$

которое приводится к выражению:

$$r(x) = \frac{1}{2} \cdot \left(trunc\left(\frac{m-\sigma}{x}\right) + trunc\left(\frac{m+\sigma}{x}\right) \right) - 1 = 0. \quad (15)$$

Решение $r(x) = 0$ эквивалентно решению уравнения $\int_0^{\infty} E\left(\frac{z}{x}\right) \cdot f(z) dz - 1 = 0$.

Содержательный смысл (13) состоит в том, что математическое ожидание E не должно превышать единичного значения, но и не быть отрицательным. Нужно принять равенство $x = \Phi_0$ и решить полученное нелинейное уравнение относительно неизвестной величины Φ_0 . При этом нужно как можно точнее вычислить эту величину. А затем проверить

правильность достаточно строгого решения уравнения (13). Эта численная величина и будет представлять базовый, основной факториал. Можно убедиться, что точное решение уравнения (13) достигается при $\max \Phi_0$ и оно будет единственным. Оно представлено на Рис. 13, по максимальной величине абсциссы означает, что нулевой фрактал будет равен $\Phi_0 = 100h$.

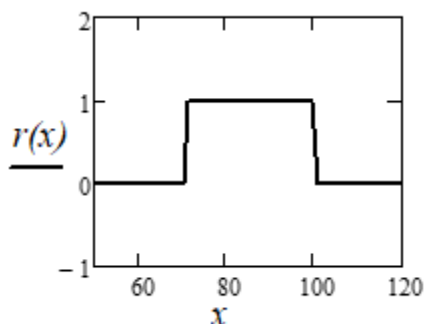


Рис. 13. Определение базового фрактала

Следующим шагом процесса будет вычисление значения величины первого субфрактала Φ_1 . Этот процесс будет аналогичен предыдущему процессу вычисления Φ_0 . Но нелинейное уравнение необходимо изменить таким образом, чтобы оно приняло следующую форму:

$$\frac{1}{\int_0^{\infty} f(u) du} \cdot \int_{\Phi_0}^{\infty} E\left(\frac{z - \Phi_0}{\Phi_1}\right) \cdot f(z) dz - 1 = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) приводится к виду

$$\int_{100}^{\infty} \text{trunc}\left(\frac{u}{\Phi_1}\right) \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (\Delta(x - m + \sigma) + \Delta(x - m - \sigma)) \right] - 1 = 0, \quad (17)$$

а (17) – к виду

$$rr(x) = \frac{1}{2} \cdot \left(\text{trunc}\left(\frac{m - \sigma + 100}{x}\right) + \text{trunc}\left(\frac{m - \sigma - 100}{x}\right) \right) - 1 = 0. \quad (18)$$

Решая (18), получаем максимальное $x_1 = 20h$, для которого $rr(20) = 0$, это означает что $\Phi_1 = 20h$. Максимум нуля наблюдается при $20h$.

Таким образом, первый субфрактал определён. Это соответствует Рис. 14.

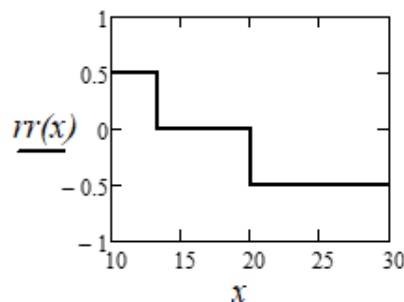


Рис. 14. Определение первого субфрактала

Следующим шагом процесса становится вычисление значения величины второго субфрактала Φ_2 . Для этого необходимо использовать следующее нелинейное интегральное уравнение:

$$\frac{1}{\int_{\Phi_0+\Phi_1}^{\infty} f(u) du} \cdot \int_{\Phi_0+\Phi_1}^{\infty} E\left(\frac{z-\Phi_0-\Phi_1}{x}\right) \cdot f(z) dz - 1 = 0,$$

Исходные данные уравнения для нахождения второго субфрактала представляется в виде:

$$x_0 = \Phi_2 \cdot z = u + 120, f(x) = \frac{1}{2} \cdot (\Delta(x-m+\sigma) + \Delta(x-m-\sigma)), \frac{1}{\int_{120}^{\infty} f(z) dz} = 2,$$

$$\int_{120}^{\infty} \text{trunc} \frac{z-120}{x} \cdot [\Delta(z-m+\sigma) + \Delta(z-m-\sigma)] dz - 1 = 0.$$

$$kk(x) = \left(\text{trunc} \left(\frac{m-\sigma+120}{x} \right) + \text{trunc} \left(\frac{m+\sigma-120}{x} \right) \right) - 1 = 0. \quad (19)$$

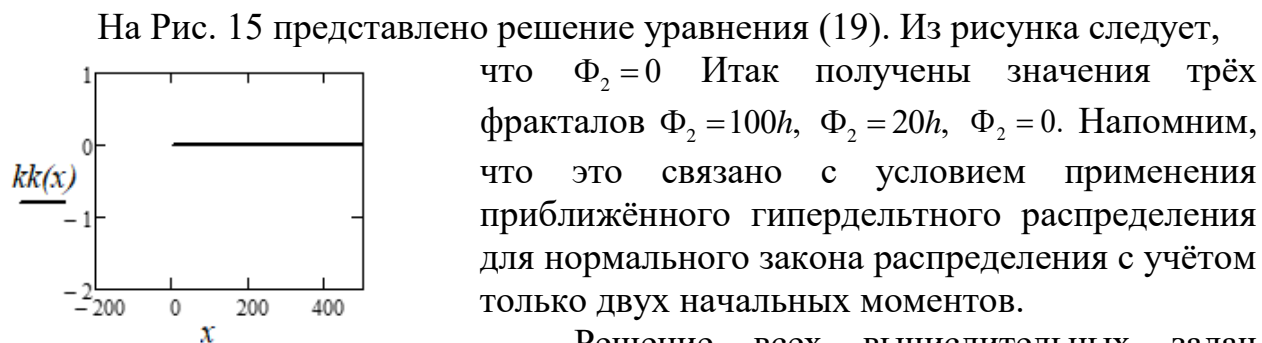


Рис. 15. Определение второго субфрактала

Решение всех вычислительных задач выполнялось с помощью вычислительной среды [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потребности в решении проблемы оптимального квантования информации в процессах хранения, обработки и передачи больших объемов данных постоянно увеличиваются. Специалистам в области Big Data \ Data Science постоянно приходится сталкиваться с данной проблемой [13-15]. Однако инженерных моделей и методов решения подобных задач в зарубежной и отечественной литературе встречается не так много. В процессе решения практических задач, в которых применяется оптимальное в смысле заполнения квантование информации, разработчику математических моделей систем необходимо рассматривать специфические прикладные вопросы, дополняющие и расширяющие количественные характеристики предложенной математической модели [1].

В статье рассмотрены конкретные вспомогательные математические модели для решения прикладных практических задач, связанных с квантованием информации, учитывающие затраты на поиск и устранения ошибок в квантах, а также применения квантования для последовательного определения значений фракталов распределений вероятностей. Использование в математических моделях определения характеристик фракталов распределений вероятностей гипердельтную аппроксимацию значительно упростило получение решений, хотя вносит некоторую погрешность. Устранить этот недостаток можно путем увеличения числа этапов в аппроксимирующем гипердельтном распределении, что требует учета большего числа начальных моментов исходного распределения. Подробно вопросы точности гипердельтной аппроксимации обсуждаются в работе [9]. Программа для расчета параметров аппроксимирующего гипердельтного распределения по методу моментов на языке Java представлена в [10].

Представленные в статье математические модели быть полезны аспирантам, докторантам и исследователям конкретных задач практической направленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Андронов А.М., Бокоев Т.Н. Оптимальное в смысле заполнения квантование информации // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1979. – № 3. – С.154–158. [Andronov AM., Bokoev TN. Quantization of information, optimal in the sense of filling. Izv Academy of Sciences of the USSR. Technical cybernetics. 1979;3:154-158. (In Russ.)].
2. Гришанин Б.А. Учёт ценности информации в теории ценности информации // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1967. – № 2. – С. 76–79. [Grishanin BA. Accounting for the value of information in the theory of the value of information. Izv.

- Academy of Sciences of the USSR. Technical cybernetics*. 1967;2:76-79. (In Russ.).
3. Киселева Т.П. Особенности синхронизации в системах технологии LTE OFDMA / Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». 18–19 марта 2020 года; Москва: ООО "Издательский дом Медиа паблишер", 2020. – С. 160–166. [Kiseleva TP. Features of synchronization in systems of LTE OFDMA technology / Proceedings of the XIV International Industrial Scientific and Technical Conference “Information Society Technologies”. 2020 March 18-19; Moscow: “Publishing House Media Publisher” LLC; 2020. pp. 160 -166. (In Russ.)].
 4. Бочарова Д.В. Возможные пути увеличения динамического диапазона обрабатываемого сигнала в трактах предварительной обработки в многоканальных гидроакустических комплексах / Сборник научных статей III Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». 25–26 февраля 2014 года; Санкт-Петербург. 2014. – С. 53–57. [Bocharova DV. Possible ways to increase the dynamic range of the processed signal in the paths of preprocessing in multichannel hydroacoustic systems / Collection of scientific articles of the III International scientific-technical and scientific-methodical conference “Actual problems of information telecommunications in science and education”. 2014 February 25-26; St. Petersburg. 2014. pp. 53-57. (In Russ.)].
 5. Патент РФ на изобретение № 2005133952/09 Тезин А.В., Шмойлов А.В., Шульгин Р.Н. Способ передачи дополнительной информации при совместном использовании векторного квантования и фрактального кодирования изображений. [Pat. RUS № 2005133952/09 Tezin AV, Shmoilov AV, Shulgin RN. Sposob peredachi dopolnitel'noy informatsii pri sovместnom ispol'zovanii vektornogo kvantovaniya i fraktal'nogo kodirovaniya izobrazheniy. (In Russ.)]. Доступно по: https://patents.s3.yandex.net/RU2313917C2_20071227.pdf. Ссылка активна на: 11.02.2021.
 6. Chen X, Tuncel E. Low-Delay prediction – and transform-based Wyner-Ziv coding. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2011;59(2):653-666. doi: 10.1109/tsp.2010.2090524
 7. Khina A, Khisti A, Hassibi B, Kostina V. Tracking and control of Gauss-Markov processes over packet-drop channels with acknowledgments *IEEE Transactions on Control of Network Systems*. 2019;6(2):549-560. doi: 10.1109/tcns.2018.2850225
 8. Lyandres V. Mobile network synthesis strategy *Information and Control Systems*. 2019;(1):98-101. doi:10.31799/1684-8853-2019-1-98-101
 9. Смагин В.А., Филимоныхин Г.В. О моделировании случайных процессов на основе гипердельтного распределения // АВТ. – 1990. – № 5. – С. 25–31. [Smagin VA, Filimonikhin GV. On modeling of random processes based on hyperdelt distribution. *AUT*. 1990;5:25-31. (In Russ.)].
 10. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 201561737. Сергеев С.А., Бубнов В.П., Бубнов В.В. Программа для расчёта параметров аппроксимирующего гипердельтного распределения по методу моментов. [Certificate of state registration of the computer program №. 201561737. Sergeev SA, Bubnov VP, Bubnov VV. Programma dlya raschota parametrov approksimiruyushchego giperdel'tnogo raspredeleniya po metodu momentov (In Russ.)]. Доступно по: <https://new.fips.ru/Archive/EVM/2015/2015.08.20/DOC/RUNW/000/002/015/617/637/document.pdf>. Ссылка активна на: 11.02.2021.

11. Смагин В.А., Бубнов В.П. Математическая модель детерминированных и случайных процессов в виде последовательного гиперфрактального распределения // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 145–159. [Smagin VA, Bubnov VP. Mathematical model of deterministic and random processes in the form of sequential hyperfractal distribution. *Automation in transport*. 2019; 5(2):145-159. (In Russ.)]. Доступно по: Download (atjournal.ru). Ссылка активна на: 11.02.2021.
12. Кирьянов Д.В. Mathcad 12. Санкт-Петербург, "БХВ-Петербург", 2005. [Kiryanov DV. *Mathcad 12*. St. Petersburg: "BHV-Petersburg; 2005. (In Russ.)].
13. Hering JG. From slide rule to big data: how data science is changing water science and engineering *Journal of Environmental Engineering, ASCE*. 2019. 145(8):02519001. doi 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001578
14. Novikov SV. Data science and big data technologies role in the digital economy *TEM Journal: Technology, Education, Management, Informatics*. 2020. 9(2):756–762. doi. 10.18421/tem92-44
15. An T. Science opportunities and challenges associated with SKA big data *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*. 2019. 62(8):989531. doi: 10.1007/s11433-018-9360-x

Сведения об авторах:

Смагин Владимир Александрович – ЗДНРФ, доктор технических наук, профессор;

e-Library SPIN: 7284-5007; ORCID: 0000-0002-0120-6145;

E-mail: va_smagin@mail.ru

Бубнов Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор;

e-Library SPIN: 3114-6579; ORCID: 0000-0002-6742-3011;

E-mail: bubnov1950@yandex.ru

Султонов Шохрух Холмурзаевич – аспирант;

e-Library SPIN: 7241-7158; ORCID: 0000-0002-0462-8677;

E-mail: sultonovsh@yandex.ru

Information about the authors:

Vladimir A. Smagin – The honoured worker of a science of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor;

e-Library SPIN: 7284-5007; ORCID: 0000-0002-0120-6145;

E-mail: va_smagin@mail.ru

Vladimir P. Bubnov – Doctor of Technical Sciences, Professor;

e-Library SPIN: 3114-6579; ORCID: 0000-0002-6742-3011;

E-mail: bubnov1950@yandex.ru

Shokhrukh Kh. Sultonov – Postgraduate student;

e-Library SPIN: 7241-7158; ORCID: 0000-0002-0462-8677;

E-mail: sultonovsh@yandex.ru

Цитировать:

Смагин В.А., Бубнов В.П., Султонов Ш.Х. Математические модели для расчета количественных характеристик оптимального квантования информации // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 46–58. doi: 10.17816/transsyst20217146-58

To cite this article:

Smagin VA, Bubnov VP, Sultonov ShKh. Mathematical models for calculating the quantitative characteristics of the optimal quantization of information. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):46-58. doi: 10.17816/transsyst20217146-58

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 501

DOI 10.17816/transsyst20217159-70

© В. Н. Таран^{1,2}, М. В. Шевлюгин³, А. В. Шандыбин¹

¹Ростовский государственный университет путей сообщения

²Донской государственный технический университет

(Ростов-на-Дону, Россия)

³Российский университет транспорта (МИИТ)

(Москва, Россия)

ТОЧНОСТЬ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Цель: Оценка точности численного метода относительно аналитического решения.

Методы: В статье производится анализ точности численных вычислений на основе метода конечных элементов. Рассмотрена вариационная схема метода.

Результаты: Получены и проанализированы зависимости погрешностей от количества использованных симплексов. Отмечены пути дальнейшего повышения точности.

Заключение: Даны рекомендации по возможному применению метода конечных элементов при решении задач расчета электромагнитных полей реальных объектов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, численные методы, электрический потенциал, оценка точности.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© V. N. Taran^{1,2}, M. V. Shevlyugin³, A. V. Shandybin¹

¹ Rostov State Transport University

² Don State Technical University

(Rostov-on-Don, Russia)

³ Russian University of Transport

(Moscow, Russia)

THE ACCURACY OF NUMERICAL METHODS FOR THE ANALYSIS OF ELECTROSTATIC FIELDS

Aim: Estimation of the accuracy of the numerical method relative to the analytical solution.

Methods: This article reports on studies of the accuracy of numerical calculations based on the finite element method. The variational scheme of the method is considered.

Results: The dependences of errors on the number of simplexes used are obtained and analyzed. The authors noted ways to further improve accuracy.

Conclusion: The article gives recommendations on the possible application of the finite element method in solving problems of calculating the electromagnetic fields of real objects.

Keywords: finite element method, numerical methods, electric potential, accuracy assessment.

ВВЕДЕНИЕ

Существуют многочисленные методы решения задач оценки. Эти задачи имеют первостепенное значение при решении вопросов защиты, построении экранов, оценки безопасностей уровней электрического поля и других [1–4].

Большинство из этих методов опирается на численные расчеты, поскольку аналитические методы имеют узкую область решений, так как граничные условия для таких задач должны совпадать с координатными плоскостями и уровнями. Как правило, аналитические методы решаются методом разделения переменных. Разумеется, точность таких методов абсолютна. Однако для решения прикладных задач они плохо приспособлены, поскольку реальные задачи имеют сложную геометрию, кусочно-линейное представление параметров среды, в частности электрических и магнитных.

Тем ни менее значения, полученные с помощью численных методов, нуждаются в верификации и проверке на адекватность и точность. Разумеется, это можно сделать, сравнивая с аналитическими решениями, а затем полученные точности пролонгировать на задачи, близкие по метрике.

В данной статье ставится цель оценки численных методов расчета потенциалов, основанных на методе конечных элементов.

ВАРИАЦИОННАЯ СХЕМА МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Вариация. Основная идея метода конечных элементов была предложена Р. Курантом в 1943 г. и основана она на использовании функциональной трактовки законов электростатики. Связывая функционал с дифференциальным уравнением Лапласа можно получить эффективный способ решения задачи о распределении электростатического поля.

Задача определения стационарного электрического поля в общем случае сводится к минимизации функционала вида [5]:

$$\Phi[\varphi(x, y)] = \iint_{\Omega} F[x, y, \varphi, \varphi_x, \varphi_y] dx dy, \quad (1)$$

где $\varphi(x, y)$ – функция потенциала электрического поля;

φ_x, φ_y – частные производные по координатам, соответственно, x и y ;

Подынтегральная функция $F[...]$ имеет непрерывные производные до второго порядка включительно.

Искомая функция φ на границе Γ области Ω должна удовлетворять значениям граничной функции f .

Экстремум такого функционала находится на основе определения функциональной производной в стационарной точке, то есть в такой точке, где функционал достигает своего минимума или максимума. Здесь под точкой понимается такое ее обобщение, при котором для определения этой точки требуется бесконечное количество координат [6], иными словами это просто функция двух переменных в двумерном гильбертовом пространстве H^2 . При этом функция φ определена в области Ω . Графическое представление $\varphi(x, y)$ дано на Рис. 1.

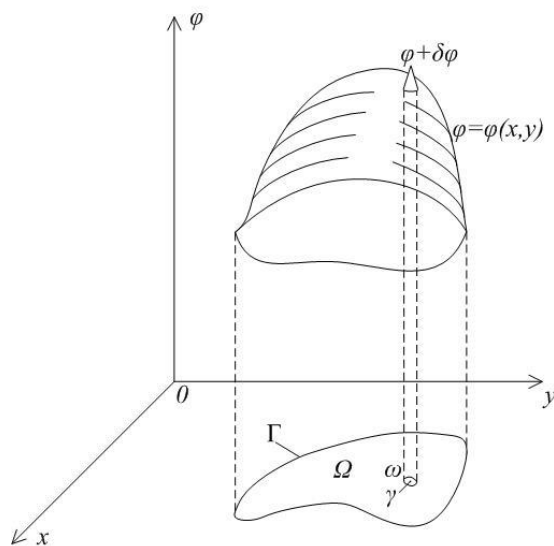


Рис. 1. График функции потенциала электрического поля

Для вычисления функциональной производной воспользуемся ее определением [7, 8]:

$$\lim_{\substack{\text{diam } \omega \rightarrow 0 \\ \max_{\xi, \zeta \in \omega} \delta\varphi \rightarrow 0}} \frac{\Phi[\varphi + \delta\varphi] - \Phi[\varphi]}{\iint_{\Omega} \delta\varphi \cdot dx dy} = \frac{\delta\Phi[\varphi]}{\delta\varphi}. \quad (2)$$

Здесь $\text{diam } \omega$ означает диаметр многообразия ω , определяемый как

$$\text{diam } \omega = \sup_{a, b \in \omega} d(a, b), \quad (3)$$

где d – квадратичная метрика.

Вариация $\delta\varphi$ имеет игольчатый характер, представленный на Рис. 1 элементом $(\varphi + \delta\varphi)$.

Применение операции (2) для вычисления экстремального значения функционала (1) составляет суть теоремы Остроградского-Эйлера.

Воспользовавшись результатом этой теоремы, можем записать соответствующее уравнение Остроградского-Эйлера:

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial \varphi_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial \varphi_y} \right) = 0. \quad (4)$$

В частном случае, когда подынтегральная функция имеет следующий вид:

$$F = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (5)$$

уравнение Остроградского-Эйлера становится эквивалентным уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (6)$$

с граничным условием

$$\varphi|_{\Gamma} = f. \quad (7)$$

Конечные элементы. Предположим, что носитель функции φ имеет вид треугольного симплекса в двумерном пространстве (плоскость xOy на Рис. 2).

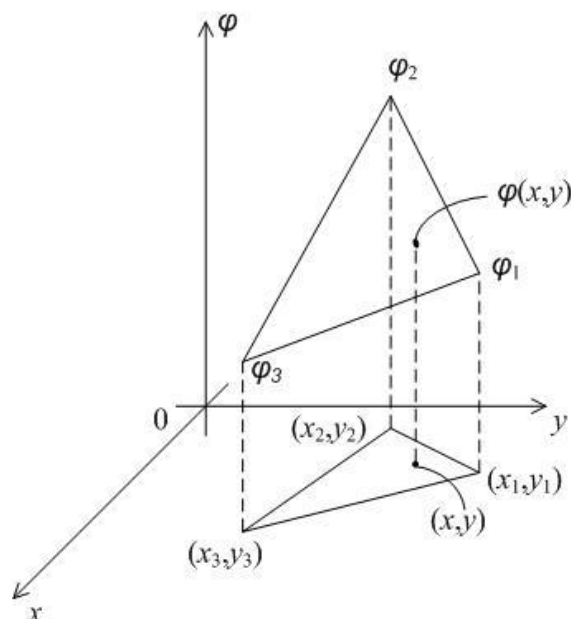


Рис. 2. Линейная потенциальная функция $\varphi(x, y)$

В вершинах симплекса потенциал будем считать на первых порах заданным и равным $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$. Тогда текущее значение потенциала в точках, принадлежащих носителю $(x, y) \in \Delta$, определим линейной формой

$$\varphi = a + bx + cy. \quad (8)$$

Для определения коэффициентов a, b и c линейной формы (8) необходимо составить систему уравнений для угловых точек симплекса и разрешить ее относительно неизвестных коэффициентов [5].

Затем произведя покрытие всей области Ω треугольными элементами (Рис. 1), с учетом равенства потенциалов на границах смежных элементов получаем два множества точек. В точках, которые лежат на границе Γ , потенциалы заданы и определяются функцией (7), а потенциалы внутри области Ω неизвестны и находятся исходя из минимума функционала (1).

Отметим, что подстановка линейных функций φ в функционал (1) превращает его в функцию $N=n+m$ переменных, где N – количество узловых точек конечных элементов, n – неизвестные потенциалы, m – известные. В частном случае вида (5) эта функция является положительно определенной квадратичной формой, относительно потенциалов φ . Матрица, определяющая эту форму, получила название матрицы Дирихле. Поэтому в этом случае операция определения экстремума функционала превращается в обычное дифференцирование по n переменным. Подчеркнем, что дифференцирование осуществляется только по неизвестным потенциалам. Таким образом, схема метода конечных элементов заключается в последовательном выполнении следующих операций:

- разбиение области на треугольные элементы;
- определение матрицы Дирихле для каждого элемента и объединение ее на всей области;
- разделение потенциалов на известные и искомые;
- определение производной функционала и приравнивание ее к нулю;
- решение системы линейных уравнений и определение неизвестных потенциалов в узлах симплексов.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ

Абсолютную точность, как указывалось ранее, дают аналитические решения, однако, в большинстве практических случаев получить эти решения не представляется возможным. Тем ни менее во многих практических приложениях используются конструкции, позволяющие найти эти аналитические решения. Например, коаксиальные кабели, волноводы, установки по созданию сверхмощного импульса тока РС-20, электростатические фильтры для отчистки технических жидкостей и газов [9, 10] и другие устройства.

Одновременно такого рода задачи, имеющие аналитические решения, можно использовать в качестве эталонных для определения точности численных алгоритмов [11].

Выберем следующую задачу [12, 13]: задан коаксиал с радиусом внутреннего проводника $r_1 = 1$ мм, внутренним радиусом внешнего

трубчатого проводника $r_2 = 4$ мм. Потенциал внутреннего проводника $\varphi|_{r_1} = 400$ В, а трубчатый проводник заземлен ($\varphi|_{r_2} = 0$ В).

В цилиндрической системе координат уравнение Лапласа для данной задачи имеет известный вид [13]. Решением данного уравнения является распределение потенциала φ внутри коаксиала. Аналитическое представление потенциала выглядит:

$$\varphi = C_1 \ln r + C_2, \quad (9)$$

где C_1 и C_2 – константы, определяемые из граничных условий.

Для простоты рассмотрения и учитывая осесимметричность ограничимся четвертью коаксиальной области.

Для оценки точности численного решения будем разбивать область между проводниками на различное количество симплексов. Для примера рассмотрим два варианта, представленные на Рис. 3.

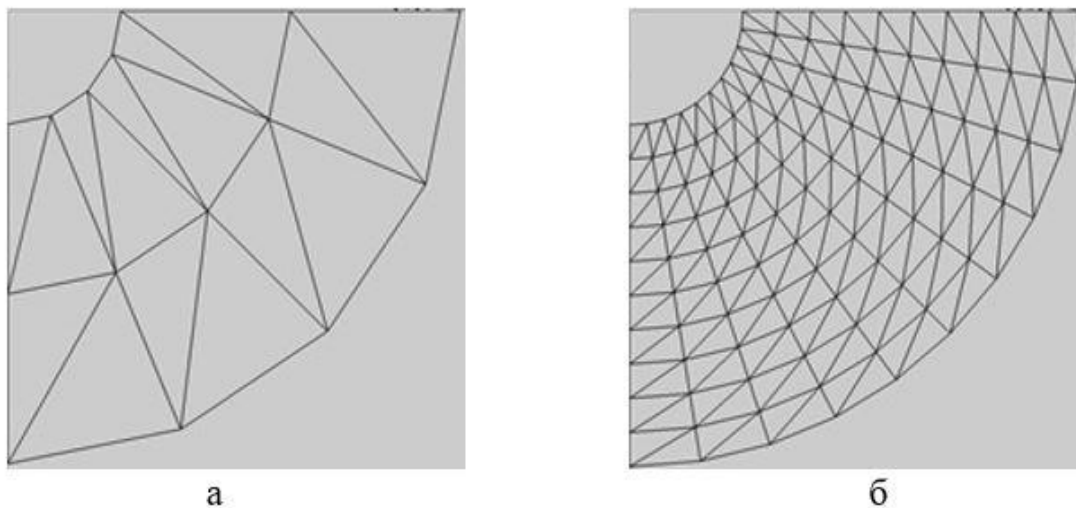


Рис. 3. Варианты разбиения на конечные элементы:
а – 16 элементов, б – 200 элементов

Матрица Дирихле каждого элемента легко вычисляется [5], поскольку производные в (5) от линейной функции (8) являются константами, хотя выкладки носят громоздкий характер. Для примера приведен элемент этой матрицы:

$$S_{12}^{(e)} = \frac{1}{4A} \{(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)\}, \quad (10)$$

где A – площадь треугольного элемента.

Остальные восемь получаются путем циклической перестановки индексов координат. Энергия одного элемента определяется на основании формул (1) и (5):

$$\Phi[\varphi] = \frac{1}{2} \varphi^T S^{(e)} \varphi, \quad (11)$$

где T – символ транспонирования вектора потенциалов $\varphi^T = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]$.

На примере (11) видно, что функционал для данного элемента имеет квадратичную форму трех переменных. Поэтому определение экстремума функционала по всей области Ω сводится к дифференцированию энергии по свободным потенциалам и приравниванию результата к нулю. Полученная система линейных уравнений имеет симметричную ненулевую матрицу и потому имеет решение.

Проведем исследования погрешности вычислений в зависимости от количества конечных элементов, покрывающих область Ω . Будем использовать энергетическую метрику для оценки погрешности расчетов потенциалов

$$\varepsilon = \sqrt{\iint_{\Omega} |\varphi_a(x, y) - \varphi_d(x, y)|^2 dx \cdot dy}, \quad (12)$$

где φ_a – аналитическое решение (9);

φ_d – численное решение.

При этом погрешность вычисления энергии составляет

$$\xi = |\Phi(\varphi_a) - \Phi(\varphi_d)|. \quad (13)$$

Для удобства интерпретации погрешности выражены в относительных единицах в %. В качестве базовых значений для вычисления относительных погрешностей взята норма аналитического потенциала $\|\varphi_a\|$ и соответствующая энергия.

Данные расчёты представлены на Рис. 4.

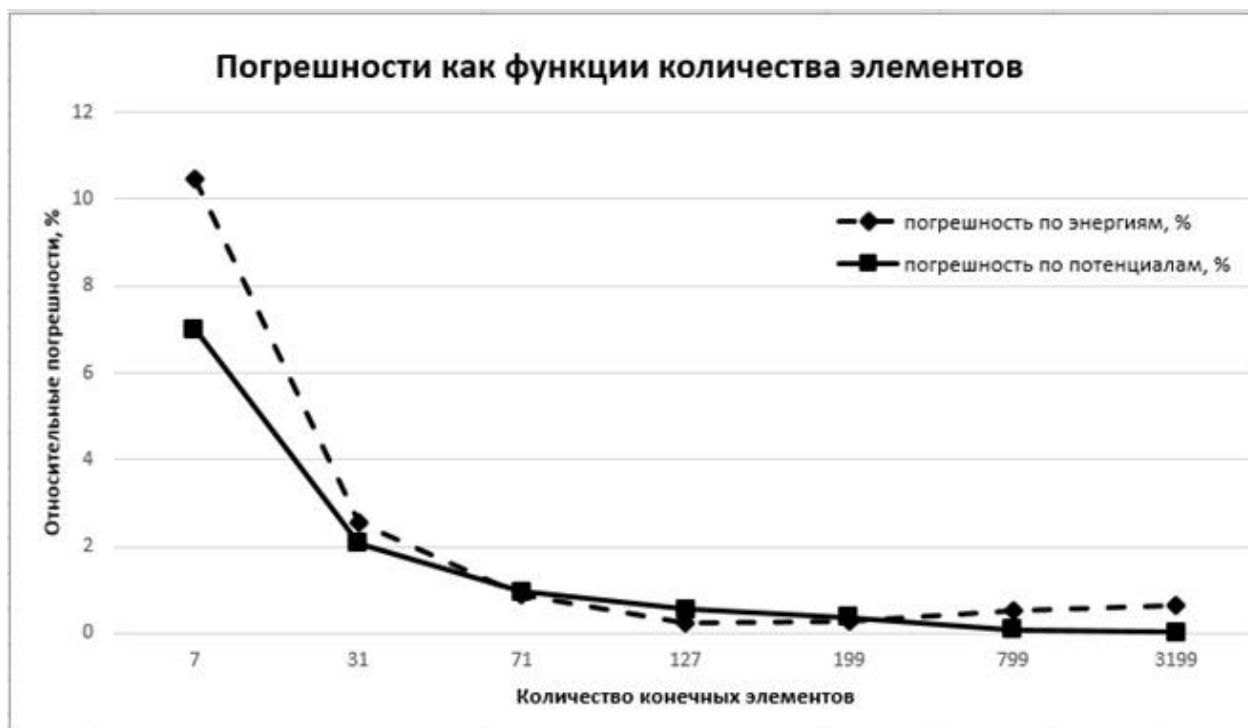


Рис. 4. Результат вычисления относительных погрешностей

Произведем анализ результатов расчетов. Представим, что неточность вычислений потенциалов есть функция $h(x, y)$, норма которой $\|h\|$ меньше некоторой положительной малой величины. Причем функция $h|_{\Gamma}$ на границе области Ω имеет значение равное нулю в силу того, что в этих точках потенциалы заданы и не вычисляются.

Рассмотрим изменение энергии, вызванное неточностью вычислений

$$\Phi(\varphi + \theta h) = \Phi(\varphi) + \theta \iint_{\Omega} (\nabla\varphi)(\nabla h) dx dy + \frac{1}{2} \theta^2 \iint_{\Omega} (\nabla h)^2 dx dy, \quad (14)$$

где θ – малая положительная величина;

∇ – градиент.

Используя теорему Грина данное выражение можно привести к виду [5]:

$$\Phi(\varphi + \theta h) = \Phi(\varphi) + \theta^2 \Phi(h). \quad (15)$$

Анализ формулы (15) показывает, что теоретически ошибка в вычислении потенциала пропорциональна θ . При этом ошибка в определении энергии пропорциональна θ^2 . Однако, проведенный вычислительный эксперимент, показывает, что для данной задачи это выполняется в диапазоне от 72 до 200 элементов. При дальнейшем увеличении теория предсказывает, что ошибка по энергии должна уменьшаться существенно быстрее, чем ошибка по потенциалам, однако в действительности происходит все ровно наоборот. Причина такого поведения погрешностей может быть объяснена наличием вычислительных погрешностей, связанных с ограничением разрядности. Эти ограничения имеют случайный характер и поэтому проявляется неустойчивость ввиду уменьшения размеров конечных элементов. Отсюда следует вывод о том, что для дальнейшего уменьшения ошибки необходимо использовать на конечных элементах нелинейные поверхности более высоких порядков.

Величины погрешностей, при незначительном увеличении количества симплексов, лежат в пределах допустимых величин, характерных для метода конечных элементов [14].

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Рассмотренный метод может быть использован для анализа внешних воздействий при решении задач электромагнитной совместимости. Множество подобных проблем существует в электротехническом комплексе железнодорожного транспорта [15]. Например, известна проблема электротермической деградации волоконно-оптических кабелей, подвешенных на опорах контактной сети. Одной из причин этого явления является образование на оболочке кабеля электропроводящей пленки из частиц пыли. В середине пролета между опорами потенциал поля

максимальный, а крепления кабеля на опорах заземлены и имеют минимальный потенциал, это притягивает заряженные частицы к креплению и в итоге они оседают на оболочке кабеля вблизи опоры. Далее наводимый в этих пленках ток разогревает оболочку и способствует ее ускоренной деградации. Знание распределения электрического поля в данной задаче позволит усовершенствовать методы защиты волоконно-оптического кабеля, тем самым снизив число аварий в системах обеспечения безопасности движения поездов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение численных методов позволяет решать сложные задачи даже в случае отсутствия аналитического решения [1, 14, 16]. Наряду с этим применение метода конечных элементов дает дополнительные преимущества. К ним относится возможность расчета конструкций, либо задач с граничными условиями произвольной формы, например, как при расчете электромагнитных полей реальных объектов. Кроме того, простота перехода к неравномерным покрытиям расчетной области и высокая технологичность, масштабируемость и т.д., особенно проявляющиеся при алгоритмизации и программировании задач.

Помимо этого, метод конечных элементов позволяет смягчить требования к дифференцируемости функции – она должна быть дифференцируема минимум один раз. Следовательно, ниже требования к вычислительным мощностям при сохранении достаточной точности.

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. Терзян А.А., Сукиасян Г.С. О численных методах решения задач электромагнитного поля // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 6. – С. 3–14. [Terzyan AA, Sukiasyan GS. On Numerical Methods of Solution of Electromagnetic Field Problems. *Scientific and Technical Journal Russian Electromechanics*. 2010;(4):3-14. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15557735_84379861.pdf. Ссылка активна на: 01.02.2021.
2. Шайдунов В.В. Многосеточные методы конечных элементов. – М.: Наука, 1989. – 288 с. [Shajdurov VV. *Mnogosetochnye metody konechnyh jelementov*. Moscow: Nauka; 1989. 288 p. (In Russ.)].
3. Ковалев О.Ф., Краснов Е.Н., Лобов Б.Н. Расчет нестационарного температурного поля электромагнитных захватов методом конечных

- элементов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1995. – № 1–2. – С. 24–28. [Kovalev OF, Krasnov EN, Lobov BN. Raschet nestacionarnogo temperaturnogo polja jelektromagnitnyh zahvatov metodom konechnykh jelementov. *Scientific and Technical Journal Russian. Electromechanics*. 1995;(1-2):24-28. (In Russ.)].
4. Салтыков В.М., Безменова Н.В., Копичникова И.В. Выбор металлических экранов для обеспечения электромагнитной совместимости по магнитным полям промышленной частоты // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 57–59. [Saltykov VM, Bezmenova NV, Kopicznikova IV. Vybor metallicheskih jekranov dlja obespechenija jelektromagnitnoj sovmestivosti po magnitnym poljam promyshlennoj chastoty. *Scientific and Technical Journal Russian Electromechanics*. 2011;(3):57-59. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16457982_72855203.pdf. Ссылка активна на: 01.02.2021.
 5. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с. [Sil'vester P, Ferrari R. *Metod konechnykh jelementov dlja radioinzhenеров i inzhenerov-jelektrikov*. Moscow: Mir; 1986. 229 p. (In Russ.)].
 6. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ, издание второе. – М.: Наука, 1977. – 744 с. [Kantorovich LV, Akilov GP. *Funkcional'nyj analiz, izdanie второе*. Moscow: Nauka; 1977. 744 p. (In Russ.)].
 7. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия: Методы и приложения. – М.: Наука, 1979. – 760 с. [Dubrovin BA, Novikov SP, Fomenko AT. *Sovremennaja geometrija: Metody i prilozhenija*. Moscow: Nauka; 1979. 760 p. (In Russ.)].
 8. Таран В.Н. Функциональное уравнение длинной линии // Радиотехника и электроника. – 1991. – Т. 36 – С. 1497. [Taran VN. Funkcional'noe uravnenie dlinnoj linii. *Radiotekhnika i jelektronika*, 1991;36:1497. (In Russ.)].
 9. Патент РФ на изобретение № 166933/ 28.03.2016. Бюл. № 35. Банкул Н.В., Бодров А.И., Стельмакова Н.О., Вохмянин С.М., Мокиевец К.В., Габдуллин П.Г., Кизеветтер Д.В. Устройство для электростатической очистки технического масла. [Pat. RUS № 166933/ 28.03.2016. Byul. № 35. Bankul NV, Bodrov AI, Stel'makova NO, Vokhmyanin SM, Mokiyevec KV, Gabdullin PG, Kizevetter DV. *Ustroystvo dlya elektrostaticheskoy ochistki tekhnicheskogo masla*. (In Russ.)]. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=166933&TypeFile=html. Дата обращения: 01.02.2021.
 10. Патент РФ на изобретение № 173515/ 08.11.2016. Бюл. № 25. Штукарин Н.Г. Электросорбционный генератор водорода. [Pat. RUS № 173515/ 08.11.2016. Byul. № 25. Shturin NG. *Electrosorption hydrogen generator*. (In Russ.)]. Дата обращения: 01.02.2021. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=173515&TypeFile=html.
 11. Бадёр М.П., Сачкова Е.В. Адаптация системы тягового электроснабжения постоянного тока для высокоскоростного движения // Электротехника. – 2017. – №. 9. – С. 19–25. [Badjor MP, Sachkova EV. Adaptacija sistemy tjugovogo jelektrosnabzhenija postojannogo toka dlja vysokoskorostnogo dvizhenija. *Jelektrotehnika*; 2017;(9):19-25 (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29913188_78195931.pdf. Ссылка активна на: 01.02.2021.

12. Говорков В.А., Купалян С.Д. Теория электромагнитного поля в упражнениях и задачах – М.: Высшая школа, 1963 – 371 с. [Govorkov VA, Kupaljan SD. *Teorija jelektromagnitnogo polja v uprazhnenijah i zadachah*. Moscow: Vysshaja shkola; 1963. 371 p. (In Russ.)].
13. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М.: Связьиздат, 1951. – 341 с. [Govorkov VA. *Jelektricheskie i magnitnye polja*. Moscow: Svjaz'izdat; 1951. 341 p. (In Russ.)].
14. Емельянов И.Г., Кузнецов А.В. Определение напряженного состояния тонкостенных конструкций с использованием методов теории оболочек // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 64–78. [Emel'yanov IG, Kuznetsov AV. Determination of the stressed state of thin-construction structures using the methods of the theory of shells. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(3):64-78 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20173364-78
15. Аполлонский С.М. Проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетической железнодорожной системе // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 110–126. [Apollonskiy SM. Problems of electromagnetic compatibility in electricity of rail system. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):110-126 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst201512110-126
16. Баранов Л.А. Гречишников В.А., Шевлюгин М.В., Данг В.Ф. Оценка гармонических составляющих тягового тока в Московском метрополитене на основе экспериментальных замеров // Наука и техника транспорта. – 2016. – №. 2. – С. 8–13. [Baranov LA, Grechishnikov VA, Shevlyugin MV, Dang VF. Ocenka garmonicheskikh sostavljajushhih t'jagovogo toka v Moskovskom metropolitene na osnove jeksperimental'nyh zamerov. *Nauka i tehnika transporta*. 2016;(2):8-13 (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26144787_44412972.pdf Ссылка активна на: 01.02.2021.

Сведения об авторах:

Таран Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 7763-2292; ORCID: 0000-0002-1308-3883; Scopus ID: 57205870949;
E-mail: vladitaran@rambler.ru

Шевлюгин Максим Валерьевич, доктор технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 4123-6584; ORCID: 0000-0003-3300-5193; Scopus ID: 24922001300;
E-mail: mx_sh@mail.ru

Шандыбин Алексей Викторович; каф. «Связь на ж.д.т.»;
eLibrary SPIN: 4444-3213; Scopus ID: 57205099726;
E-mail: shav850@mail.ru

Information about the authors:

Vladimir N. Taran, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 7763-2292; ORCID: 0000-0002-1308-3883; Scopus ID: 57205870949;
E-mail: vladitaran@rambler.ru

Maxim V. Shevlyugin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 4123-6584; ORCID: 0000-0003-3300-5193; Scopus ID: 24922001300;
E-mail: mx_sh@mail.ru

Aleksey V. Shandybin; dept. "Communication on the railway";
eLibrary SPIN: 4444-3213; Scopus ID: 57205099726;
E-mail: shav850@mail.ru

Цитировать:

Таран В.Н., Шевлюгин М.В., Шандыбин А.В. Точность численных методов оценки внешних электрических воздействий // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 59–70. doi: 10.17816/transsyst20217159-70

To cite this article:

Taran VN, Shevlyugin MV, Shandybin AV. The Accuracy of Numerical Methods for Assessing External Electrical Influences. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):59-70. doi: 10.17816/transsyst20217159-70

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.3.019.3

DOI 10.17816/transsyst20217171-84

© Р. С. Литвиненко, А. Э. Аухадеев, К. Т. Ле, Г. Р. Ахсаниев

Казанский государственный энергетический университет

(Казань, Россия)

ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

При задании требований по надежности на стадии разработки сложных технических систем, если они являются восстанавливаемыми, а также для них определены требования к долговечности и сохраняемости, общее количество, задаваемых в соответствии с нормативными документами, единичных и комплексных показателей надежности находится в пределах 5–7 единиц, что определяет сложность процедуры их проверки, подтверждения и оценки.

Цель: Формирование единого (интегрального) показателя надежности, который характеризовал бы всю совокупность основных свойств надежности тягового электрооборудования, как сложной технической системы, при условии соответствия отдельных показателей требованиям, указанным в техническом задании.

Методы: Предлагается использовать метод анализа иерархий, разработанного Т. Саати и широко применяемого при решении различных многокритериальных задач.

Заключение: Использование для определения уровня надежности интегрального показателя позволяет получить формализованный результат, выражаемый через соответствующее значение вектора глобальных приоритетов и дающий возможность количественной оценки превосходства в плане надежности одного альтернативного варианта тягового электрооборудования над другим.

Ключевые слова: городской электротранспорт, надежность, интегральный показатель, метод анализа иерархий, уровень, матрица, тяговое электрооборудование.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© R. S. Litvinenko, A. E. Auhadeev, K. T. Le, G. R. Akhsaniev

Kazan State Power Engineering University

(Kazan, Russia)

CALCULATION INTEGRAL RELIABILITY INDICATOR OF THE URBAN ELECTRIC TRANSPORT TRACTION ELECTRICAL EQUIPMENT

When reliability requirements at the stage of developing complex technical systems are setting, the total number of individual and complex reliability indicators set in accordance

with regulatory documents is within 5-7 units. This is done provided that they are recoverable, and also for them the requirements for durability and preservation are determined. All this determines the complexity of the procedure for their verification, confirmation and evaluation.

Aim: Formation of a common (integral) indicator of reliability, which can characterize the basic reliability properties multitude of traction electrical equipment, as a complex technical system, subject to the compliance of individual indicators with the requirements specified in the terms of reference.

Methods: It is proposed to use of T. Saati's hierarchy analysis method, which is widely used in solving various multicriteria problems.

Conclusion: Using an integral indicator to determine the level of reliability allows getting a formalized result, expressed through the vectors of global priorities corresponding value, which makes it possible to get a quantitative assessment of the superiority for one of alternative traction electrical equipment.

Key words: urban electric transport, reliability, integral indicator, hierarchies analysis method, level, matrix, traction electrical equipment.

ВВЕДЕНИЕ

Современный городской электрический транспорт (ГЭТ) является сложной производственно-технической системой, основным назначением которой является удовлетворение населения в безопасных и стабильных перевозках. В связи с этим, вопросы обеспечения заданных параметров надежности системы ГЭТ как на этапе проектирования, так и в эксплуатации является очень актуальными.

Наиболее высокие требования по надежности предъявляются именно к техническим объектам данной системы, а, в частности, к тяговому электрооборудованию электроподвижного состава. Именно на тяговое электрооборудование приходится наибольшее число отказов и неисправностей, что объясняется такими объективными причинами как: высокая сложность технического устройства; экстремальность условий эксплуатации (высокие скорости, влажность, вибрация, перепад температур и т. д.) и интенсивность режимов работы (высокие температуры, частоты вращения, плотности тока и т. д.). Все это определяет необходимость развития и совершенствования методов определения надежности тягового электрооборудования, являющегося неотъемлемой составной частью сложного электротехнического комплекса, обеспечивающего преобразование, передачу и использование электрической для организации перевозочного процесса ГЭТ, обусловленную высокой экономической и технической ценой отказа.

Основные требования по надежности тягового электрооборудования формируются на этапе разработки технического задания. При этом устанавливается номенклатура и значения показателей надежности (ПН),

состав которых регламентируется ГОСТ 27.002-2015 [1] и положениями ГОСТ 27.003-2016 [2].

Для снижения затрат на проверку, подтверждение и оценку заданных ПН на этапе производства и в эксплуатации их число целесообразно выбирать минимальным, при условии возможности в полной мере характеризовать надежность тягового электрооборудования на всех этапах жизненного цикла. При этом, как правило, формируется определенный набор единичных показателей безотказности и ремонтпригодности, а также их комбинации, а также, возможно, применение комплексных ПН, что наиболее характерно для тягового электрооборудования, как сложной технической системы.

Для определения численных значений ПН разрабатываемой технической системы используются расчетные, экспериментальные или расчетно-экспериментальные методы с использованием справочных статистических данных о надежности аналогов (прототипов). Также могут быть использованы результаты опыта эксплуатации или испытаний, предоставляемых поставщиками компонентов. При этом считается, что только при условии соответствия установленным требованиям всех ПН, разрабатываемый технический объект соответствует требованиям по надежности [3].

Для восстанавливаемых сложных технических систем, такими как тяговое электрооборудование ГЭТ, с установленными требованиями к долговечности и сохраняемости, общее количество задаваемых единичных и комплексных ПН, согласно ГОСТ 27.003-2016 [2], находится в пределах 5–7 показателей.

Аналогично требованиям по надежности, согласно ГОСТ 15.016-2016 [4], в техническом задании могут быть указаны требования, характеристики, нормы, показатели и другие параметры, определяющие назначение и эксплуатационные характеристики разрабатываемых технических объектов. В связи с этим выбор варианта технической системы, удовлетворяющего всем техническим требованиям (требованиям к эксплуатации, стойкости, электромагнитной совместимости и т.д.), в том числе требованиям по надежности, указанным в задании, является важнейшей задачей, стоящей перед разработчиком. На практике различные схемно-конструктивные варианты технической системы имеют разные по величине количественные ПН, что не позволяет однозначно отдать предпочтение тому или иному техническому решению. При этом превосходство одного варианта технического решения над другим возможно только в отдельных показателях из заданных в требованиях по надежности, а разница между ПН может быть от незначительной до существенной.

Таким образом, идентификация показателя, позволяющего характеризовать совокупность основных свойств надежности тягового электрооборудования ГЭТ при условии соответствия требованиям по надежности всех заданных в техническом задании отдельных показателей, является важнейшей проблемой, определяющей актуальность проведенного исследования. Для решения этой проблемы авторы вводят понятие «интегральный показатель надежности» (ИПН), а также предлагают методику определения обобщенных показателей для нескольких схемно-конструктивных вариантов тягового электрооборудования, синтезирующих отдельные ПН в единый. Это позволит на этапе оценки технического уровня альтернативных вариантов разрабатываемой системы перейти от набора единичных и комплексных ПН к ИПН, характеризующем надежность тягового электрооборудования ГЭТ с учетом всех требований указанных в техническом задании.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

В общем случае метод аналитических иерархических процессов или метод анализа иерархий (МАИ) представляет собой математический аппарат системного подхода к технологии принятия решений на основе расчетов и использования метода попарных сравнений, позволяющего найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом соответствует сути поставленной проблемы и требованиям к ее решению. Метод был разработан американским ученым Томасом Саати в 1970 году и активно используется при решении различных многокритериальных задач (анализ возможных вариантов развития событий, составления рейтинга, распределение ресурсов, управление рисками и др.). Также МАИ получил широкое распространение при практическом решении задач сравнительного анализа технического уровня альтернативных вариантов разрабатываемых технических объектов [5–7].

Подробное описание содержания этапов МАИ широко представлено в различных источниках [8–10].

В связи с тем обстоятельством, что МАИ обладает возможностью присвоения альтернативным вариантам рангов (цифровых показателей отображающих значимость или важность объекта), предлагается использовать эти характеристики для формирования количественного значения ИПН альтернативных вариантов тягового электрооборудования, где в качестве критериев будут выступать соответствующие им ПН [11]. В качестве ИПН предлагается применить вычисленные значения глобальных (составных) приоритетов. Обращаем внимание, что определение ИПН осуществляется для конкретных структурно-схематических вариантов

построения тягового электрооборудования и соответствующих ему количественных значений ИПН. Изменение какого либо из этих положений приведет к повторному определению ИПН.

В качестве недостатка МАИ можно отметить:

- количество показателей не должно превышать 7 ± 2 , так как человеческое сознание не способно к одновременному восприятию и переработке более указанного числа блоков информации [12, 13];
- метод позволяет найти ранги выбранных альтернатив, но не имеет внутренних средств интерпретации этих рангов;
- несмотря на проверку согласованности суждений экспертов, экспертные оценки носят субъективный характер.

Проверку работоспособности и адекватности предложенного подхода к решению задачи определения ИПН методом анализа иерархий для последующей оценки технического уровня структурно-схематических вариантов тягового электрооборудования ГЭТ проведем на конкретном примере.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для разрабатываемого многодвигательного электропривода (МЭП) применяемого на электрическом транспорте заказчик в техническом задании установил следующие требования по надежности:

- гамма-процентная наработка до отказа (GPTF) – не менее 7500 ч;
- средняя наработка на отказ (MTBF) – не менее 12000 часов;
- средний срок службы до капитального ремонта (AOL) не менее 5 лет;
- коэффициент готовности (AF) – не менее 0,99;
- средний срок службы до списания (MLTD) – не менее 20 лет.

Разработчиком предложено три возможных варианта МЭП с предварительно рассчитанными значениями показателей, приведенными в Табл.1.

Используя МАИ, требуется рассчитать ИПН R_1, R_2 и R_3 альтернативных вариантов МЭП, для последующего комплексного анализа соответствия всех технических требований к разрабатываемой системе.

Таблица 1. Показатели надежности вариантов МЭП

Многодвигательный электропривод	Показатели надежности				
	GPTF, ч	MTBF, тыс.ч	AOL, лет	AF	MLTD, лет
Вариант №1	7,6	12,5	7	0,998	22
Вариант №2	8	13,5	6,5	0,999	24
Вариант №3	5,2	14	5	0,994	25

Декомпозиция задачи в иерархию. Декомпозиция задачи вычисления ИПН представлена на Рис.



Рис. Декомпозиция задачи вычисления ИПН вариантов МЭП

В наиболее элементарном виде иерархия состоит из вершины (условно здесь находится общая цель – формирование ИПН), от которой идут промежуточные уровни, состоящие из пяти критериев (показателей надежности), уточняющих цель, к нижнему уровню, состоящему из 3 альтернативных вариантов МЭП.

Построение матриц попарных суждений. При использовании МАИ решаемая задача была представлена иерархически, поэтому матрица сравнения важности ПН второго уровня составляется относительно общей цели (1-го уровня). Подобные матрицы также строятся для парных сравнений каждого альтернативного варианта МЭП по отношению к элементам 2-го уровня. Для проведения субъективных парных сравнений автором Т.Саати была разработана численная шкала относительной важности [9,13], в соответствии с которой экспертами определяется вес функций (показателей), характеризующих разрабатываемую систему.

Для построения матрицы попарных суждений для 2-го уровня A_1 размерностью $k \times k$, где $k = 5$ – количество заданных ПН составляется таблица в k строк и столбцов, в которой в заголовках граф и строк записываются применяемые при формировании ИПН и заданные в техническом задании показатели. Действия начинают с показателя, расположенного в заголовке 1-й строки, при этом задаются вопросом, насколько этот показатель важнее показателей, указанных в заголовке графы, и далее остальные показатели. При сравнении показателя с самим собой отношение равно единице. Если сравниваемый показатель важнее, чем ПН из заголовка графы, то используется целое число из шкалы

относительной важности [14], в противном случае - обратная величина. Таким образом, поочередно производится сравнение важности всех ПН между собой и определяются все элементы матрицы A_1 попарных сравнений для 2-го уровня (уровня ПН) (Табл. 2).

Таблица 2. Матрица A_1 попарных сравнений для второго уровня

Показатели	GPTF, $j = 1$	MTBF, $j = 2$	AOL, $j = 3$	AF, $j = 4$	MLTD, $j = 5$
GPTF	1	3	4	1	5
MTBF	1/3	1	4	2	3
AOL	1/4	1/4	1	1/5	3
AF	1	1/2	5	1	6
MLTD	1/5	1/3	1/3	1/6	1

Составление матриц A_{2j} , ($j = \overline{1, k}$) для 3-го уровня (уровня альтернативных вариантов) существенно упрощается, так как значения ПН выражены количественно, а не качественно. Элементы матриц A_{2j} формируются делением значений ПН соответствующих альтернативных вариантов МЭП применительно к каждому показателю $j = \overline{1, k}$ (матрицы $A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{24}$ и A_{25}). Матрицы A_{2j} попарных сравнений для третьего уровня представлены в Табл. 3.

Таблица 3. Матрицы попарных сравнений для уровня альтернативных вариантов МЭП

Матрица A_{21} попарных сравнений для показателя GPTF, $j = 1$			
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Вариант №1	1	7,6/8=0,95	7,6/8,2=0,9268
Вариант №2	8/7,6=1,0526	1	8/8,2=0,9756
Вариант №3	8,2/7,6=1,0789	8,2/8=1,025	1
Матрица A_{22} попарных сравнений для показателя MTBF, $j = 2$			
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Вариант №1	1	12,5/13,5=0,9259	12,5/14=0,8929
Вариант №2	13,5/12,5=1,08	1	13,5/14=0,9643
Вариант №3	14/12,5=1,12	14/13,5=1,037	1
Матрица A_{23} попарных сравнений показателя AOL, $j = 3$			
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Вариант №1	1	7/6,5=1,0769	7/5=1,4
Вариант №2	6,5/7=0,9586	1	6,5/5=1,3
Вариант №3	5/7=0,7143	5/6,5=0,7692	1
Матрица A_{24} попарных сравнений показателя AF, $j = 4$			
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Вариант №1	1	0,998/0,999=0,999	0,998/0,994=1,004
Вариант №2	0,999/0,998=1,001	1	0,999/0,994=1,005
Вариант №3	0,994/0,998=0,996	0,994/0,999=0,995	1
Матрица A_{25} попарных сравнений показателя MLTD, $j = 5$			
	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
Вариант №1	1	22/24=0,999	22/25=1,004

Вариант №2	24/22=1,001	1	24/25=1,005
Вариант №3	25/22=0,996	25/24=0,995	1

Таким образом, результатом действий на этом этапе является матрица A_1 попарных сравнений для уровня ПН и матрицы $A_{21} \dots A_{25}$ для уровня альтернативных вариантов МЭП.

Определение локальных приоритетов и согласованности мнений экспертов для второго уровня. Для матрицы A_1 попарных сравнений уровня показателей определяется набор локальных приоритетов, которые выражают относительное влияние множества верхних элементов на нижний элемент иерархии. При этом устанавливается вес каждого отдельного компонента матрицы. С этой целью необходимо вычислить собственный вектор $\bar{A} = [x_1 \dots x_k]^T$ матрицы A_1 , составляющими которого являются оценки вектора приоритетов по строкам матрицы x_i , определяемые по формуле:

$$x_i = \frac{\bar{a}_i}{\sum_{i=1}^k \bar{a}_i}, \quad (1)$$

где $\bar{a}_i = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k a_i}$ – среднее геометрическое элементов i -ой строки матрицы $A_1, i = \overline{1, k}$;

В условиях решения нашей задачи собственный вектор \bar{A} матрицы A_1 в соответствии с формулой (1) получил следующие значения

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3573 \\ 0,2388 \\ 0,0817 \\ 0,2708 \\ 0,0514 \end{bmatrix},$$

где x_1 - оценка приоритета показателя $T_{\gamma=95}$;

x_2 - оценка приоритета показателя T_0 ;

x_3 - оценка приоритета показателя $T_{\text{сл.ср.к.р.}}$;

x_4 - оценка приоритета показателя K_r ;

x_5 - оценка приоритета показателя $T_{\text{сл.ср.сп.}}$.

Вычисление вектора локальных приоритетов (собственных векторов матрицы A_1) $\lambda_{\max} = [\lambda_{\max 1} \dots \lambda_{\max k}]$ производится путем приведения величины x_i к нормализованному виду по следующей формуле:

$$\lambda_{\max i} = x_i \cdot \sum_{j=1}^k a_{ij}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\max i}$ - собственные значения вектора Перрона [13, с.15].

a_{ij} - значение элемента матрицы A_1 в i -ой строке j -ом столбце, $j = \overline{1, k}$.

Используя формулу (2), определим локальные приоритеты $\lambda_{\max i}$ для второго уровня (уровня показателей). В условиях решения задачи

формирования ИПН альтернативных вариантов МЭП вектор локальных приоритетов представлен следующими значениями

$$\lambda_{max} = \begin{bmatrix} 0,9945 \\ 1,2139 \\ 1,171 \\ 1,1825 \\ 0,9252 \end{bmatrix}.$$

Сумма всех элементов полученного вектора локальных приоритетов λ_{max} равна 5,4871, называется Перроново собственное значение, обозначим ее буквой Λ [13, с.16]. При абсолютной согласованности матрицы соблюдается условие $\Lambda = k$.

После определения локальных приоритетов λ_{maxi} и величины Λ следует процедура оценки согласованности мнений экспертов при формировании матрицы попарных сравнений A_1 для второго уровня, поскольку обобщенное мнение группы экспертов не лишено субъективности, так как использовалась качественная шкала оценок. Для этого МАИ предусматривает применение индекса согласованности (μ), который дает информацию о степени нарушения численной и порядковой согласованности.

Вычисляем индекс согласованности:

$$\mu = \frac{\Lambda - k}{k - 1} = \frac{5,4871 - 5}{4} = 0,1218. \quad (3)$$

Сравним величину μ с величиной случайной согласованности (μ_{rand}), которая получилась бы при случайном наборе количественных суждений из шкалы $\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \dots, 1, 2, \dots, 9$, но при условии создания обратно симметричной матрицы. В источнике [7] приводится таблица, позволяющая определить среднюю согласованность μ_{rand} для случайных матриц различного порядка. В условиях решения нашей задачи для $k=5$ величина $\mu_{rand} = 1,12$. Для сравнения величин μ и μ_{rand} найдем отношение согласованности (анг. *consistency ratio* - CR):

$$CR = \frac{\mu}{\mu_{rand}} \cdot 100 \% = 10,9 \%. \quad (4)$$

Величина CR должна составить 10 % или менее, чтобы быть приемлемой. В некоторых случаях можно допустить 20 %, но не более. Если величина ОС превышает 20 %, необходимо провести второй тур экспертизы и уточнить элементы матрицы попарных сравнений A_1 для 2-го уровня [13, 15]. Так как $CR = 10,9 \%$, можно сделать вывод о допустимой согласованности матрицы попарных сравнений A_1 для 2-го уровня задачи формирования ИПН для альтернативных вариантов МЭП.

Определение локальных приоритетов для третьего уровня.

Далее аналогичным образом определяются локальные приоритеты для 3-го уровня (уровня вариантов МЭП), результаты вычислений представлены в Табл. 3. Следует отметить, что если показатели

альтернативных вариантов заданы в виде численных значений, то определять μ не нужно, так как $\mu = 0$, а следовательно $\mu_{rand} = 0$. Поэтому определение μ_{rand} для 3-го уровня не производилось.

Определение глобальных приоритетов. Для формирования ИПН альтернатив приоритеты синтезируются, начиная с уровня показателей. Локальные приоритеты перемножаются на приоритет соответствующего ПН на вышестоящем уровне и суммируются по каждому элементу в соответствии с критерием, на который воздействует этот элемент (каждый элемент второго уровня умножается на единицу, т.е. на вес единственной цели самого верхнего уровня). Это дает составной, или глобальный приоритет того элемента, который затем используется как критерий для взвешивания локальных приоритетов элементов, расположенных уровнем ниже. Как было сказано выше, величину глобального приоритета предлагается принять в качестве ИПН альтернативных вариантов.

Таблица 4. Определение локальных приоритетов для третьего уровня (уровня альтернативных вариантов)

Варианты МЭП	№1	№2	№3	Оценка вектора приоритетов x_i	Вектор локальных приоритетов λ_{maxi}
<i>Для установленной безотказной наработки GPTF</i>					
№1	1	0,95	0,9268	0,3193	0,9999
№2	1,0526	1	0,9756	0,3361	0,9999
№3	1,0789	1,025	1	0,3445	0,9999
Определение Λ_1					3
<i>Для средней наработки на отказ MTBF</i>					
№1	1	0,9259	0,8929	0,3337	1,001
№2	1,08	1	0,9643	0,334	1
№3	1,12	1,037	1	0,3323	0,9999
Определение Λ_2					3
<i>Для установленного срока службы до капитального ремонта AOL</i>					
№1	1	1,0769	1,4	0,3784	1,0001
№2	0,9586	1	1,3	0,3514	1,0001
№3	0,7143	0,7692	1	0,2703	1,0001
Определение Λ_3					3,0003
<i>Для коэффициента готовности AF</i>					
№1	1	0,999	1,004	0,3125	1
№2	1,001	1	1,005	0,3375	1
№3	0,996	0,995	1	0,35	1
Определение Λ_4					3
<i>Для назначенного срока службы MLTD</i>					
№1	1	0,999	1,004	0,3099	1,0001
№2	1,001	1	1,005	0,338	0,9999
№3	0,996	0,995	1	0,3521	1
Определение Λ_5					3

Полученные в Табл. 4 результаты представим в виде матрицы A_3 размером 5×3 , где столбцы будут соответствовать оценкам вектора приоритетов ПН второго уровня, а строки – альтернативным вариантам МЭП. Таким образом, матрица A_3 приоритетов по каждому показателю примет следующий вид:

$$A_3 = \begin{bmatrix} x_1^{(GPTF)} & x_1^{(MTBF)} & x_1^{(AOL)} & x_1^{(AF)} & x_1^{(MLTD)} \\ x_2^{(GPTF)} & x_2^{(MTBF)} & x_2^{(AOL)} & x_2^{(AF)} & x_2^{(MLTD)} \\ x_3^{(GPTF)} & x_3^{(MTBF)} & x_3^{(AOL)} & x_3^{(AF)} & x_3^{(MLTD)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3193 & 0,3337 & 0,3784 & 0,3125 & 0,3099 \\ 0,3361 & 0,334 & 0,3514 & 0,3375 & 0,338 \\ 0,3445 & 0,3323 & 0,2703 & 0,35 & 0,3521 \end{bmatrix}.$$

Для определения вектора глобальных приоритетов воспользуемся формулой:

$$\bar{W} = A_3 \cdot \bar{A} = \begin{bmatrix} x_1^{(GPTF)} & x_1^{(MTBF)} & x_1^{(AOL)} & x_1^{(AF)} & x_1^{(MLTD)} \\ x_2^{(GPTF)} & x_2^{(MTBF)} & x_2^{(AOL)} & x_2^{(AF)} & x_2^{(MLTD)} \\ x_3^{(GPTF)} & x_3^{(MTBF)} & x_3^{(AOL)} & x_3^{(AF)} & x_3^{(MLTD)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где W_1, W_2, W_3 - глобальные приоритеты соответствующих альтернативных вариантов МЭП.

Подставив полученные для A_3 и \bar{A} числовые значения в формулу (5), получим следующие оценки глобальных (собственных) приоритетов:

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} 0,3193 & 0,3337 & 0,3784 & 0,3125 & 0,3099 \\ 0,3361 & 0,334 & 0,3514 & 0,3375 & 0,338 \\ 0,3445 & 0,3323 & 0,2703 & 0,35 & 0,3521 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,3573 \\ 0,2388 \\ 0,0817 \\ 0,2708 \\ 0,0514 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3268 \\ 0,3372 \\ 0,3363 \end{bmatrix}.$$

Сумма глобальных приоритетов должна быть равна 1.

Приравнявая вычисленные значения глобальных приоритетов W_1, W_2, W_3 показателям R_1, R_2, R_3 , получим численные значения ИПН соответствующих вариантов МЭП, характеризующие набор единичных и комплексного ПН. В результате решения нашей задачи наибольший ИПН соответствует второму варианту МЭП, т.к. $R_2 = 0,3372 > R_3 > R_1$. В дальнейшем эти показатели, представляющие собой обобщенный (единый) ПН, могут быть использованы наряду с другими технико-экономическими требованиями к МЭП для последующего выбора наиболее предпочтительного схемно-конструктивного варианта разрабатываемого многодвигательного электропривода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, подход к определению ИПН на этапе разработки, синтезирующих до 5–7 отдельных показателей, характеризующих

различные свойства надежности, позволяет дать комплексную оценку и на ее основе ранжировать варианты схемно-конструктивные решений тягового электрооборудования ГЭТ. Предложенный механизм определения ИПН вариантов тягового электрооборудования является удобным инструментом научных исследований на стадии формирования исходных технических требований и разработки технического задания. Применение в этих целях МАИ позволяет выполнить глубокий анализ большого объема экспертной и статистической информации о заданных критериях надежности с учетом весовых характеристик анализируемых показателей. Использование для определения уровня надежности интегрального показателя позволяет получить формализованный результат, выражаемый через соответствующее значение вектора глобальных приоритетов и дающий возможность количественной оценки превосходства одного альтернативного варианта над другим.

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. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с. [GOST 27.002-2015 Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya. Moscow: Standartinform; 2016. 24 p. (In Russ.)].
2. ГОСТ 27.003-2016 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Стандартинформ, 2018. – 19 с. [GOST 27.003-2016 Nadezhnost' v tekhnike. Sostav i obshchie pravila zadaniya trebovanij po nadezhnosti. Moscow: Standartinform; 2018. 19 p. (In Russ.)].
3. Георгиевская Е.В. Методические принципы оценки надежности оборудования на ранних стадиях проектирования // Новое в Российской электроэнергетике. – 2018. – №11. – С.25-36. [Georgievskaya EV. Metodicheskie printsipy otsenki nadezhnosti oborudovaniya na rannikh stadiyakh proektirovaniya . *Novoe v Rossiiskoi elektroenergetike*. 2018; 11: 25-36. (In Russ.)].
4. ГОСТ 15.016-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. – М.: Стандартинформ, 2017. – 27 с. [GOST 15.016-2016 Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Tekhnicheskoe zadanie. Trebovaniya k soderzhaniyu i oformleniyu. Moscow: Standartinform; 2017. 27 p. (In Russ.)].
5. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Гуреев В.М., Мисбахов Р.Ш. Оценка технического уровня сложных систем на этапе разработки // Вестник машиностроения. – 2015. – № 6. – С. 35–39. [Litvinenko RS, Pavlov PP, Gureev VM, Misbakhov RSh. Assessment of technical level of complicated engineering systems on the stage of their design. *Russian Engineering Research*. 2015;6:35-39. (In Russ.)]. Доступно по: Оценка технического уровня сложных систем на этапе разработки (elibrary.ru). Ссылка активна на: 10.03.2021.

6. Li J, Yang Y, Saaty TL, et al. Cultural ranking of countries using the analytic hierarchy process methodology. *Advances in intelligent systems and computing*. 2020;1074:949-963. doi: 10.1007/978-3-030-32456-8_102
7. Saaty TL. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. *International series in operations research and management science*. 2016;233:363-419. doi: 10.1007/0-387-23081-5_9
8. Saaty TL. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy. *RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)*. 2008;102(2):251-318. doi: 10.1007/bf03191825
9. Быкова Т.В. Метод анализа иерархий, как инструмент решения практических задач многокритериальной оптимизации // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2019. – №1. – С.48-62. [Bykova TV. Metod analiza ierarkhii, kak instrument resheniya prakticheskikh zadach mnogokriterial'noi optimizatsii. *Matematicheskoe modelirovanie, komp'yuternyi i naturnyi eksperiment v estestvennykh naukakh*. 2019;1:48-62. (In Russ.)]. Доступно по: Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" [http://mathmod\(esrae.ru\)](http://mathmod(esrae.ru)). Ссылка активна на: 10.03.2021.
10. Гривачев А.В., Авдеев В.О., Варганов В.В., и др. Модифицированный метод анализа иерархий для оценки наземных робототехнических комплексов // Экстремальная робототехника. – 2018. – № 1. – С. 409–416. [Grivachev AV, Avdeev VO, Varganov VV, et al. The Modified Method of Hierarchical Analysis of for the Selection of Mobile Robotechnical Complexes. *Extreme Robotics*. 2018; 1:409-416. (In Russ., Engl.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36392881>. Ссылка активна на: 10.03.2021.
11. Воронков И.Е. Вектор глобальных приоритетов метода анализа иерархий как относительный показатель уровня надежности потенциальных участников инвестиционно-строительных проектов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 11. – С. 137–145. [Voronkov IE. Vektor global'nykh prioritetov metoda analiza ierarkhii kak odnositel'nyi pokazatel' urovnya nadezhnosti potentsial'nykh uchastnikov investitsionno-stroitel'nykh proektov. *Vestnik BGTU im.V.G.Shukhova*. 2018;11:137-145. (In Russ.)]. doi: 10.12737/article_5bf7e35fd74483.00537194.
12. Saaty TL. Seven is the magic number in nature. *Proceedings of the American philosophical society*. 2016;160(4):335-360.
13. Саати Т.Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений // Cloud of science. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 5–39. [Saati TL. On the measurement of intangibles.a principal eigenvector approach to relative measurement derived from paired comparisons. *Cloud of science*. 2015;2(1):5-39. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23174572>. Ссылка активна на: 10.03.2021.
14. Славнов К.В. Особенности модификации метода анализа иерархий Т.Саати для оценки систем контроля конфиденциальной информации // Охрана, безопасность, связь. – 2017. – №1–2. – С.119–125. [Slavnov KV. Modification of the method of analysis hierarchies t. Saati to assess the control systems of confidential information. *Okhrana, bezopasnost', svyaz'*. 2017;1-2:119-125. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28920566>. Ссылка активна на: 10.03.2021.
15. Финогенко И.А., Дьякович М.П. Метод анализа иерархий и построение интегральных показателей сложных систем // Вестник Тамбовского университета.

Серия: естественные и технические науки. – 2017. – Т. 22. – № 6–1. – С. 1335–1340. [Finogenko IA, D'yakovich MP. Method of analysis of hierarchies and construction integrated parameters for multiple systems. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2017;22(6-1):1335-1340. (In Russ.)]. doi: 10.20310/1810-0198-2017-22-6-1335-1340

Сведения об авторах:

Литвиненко Руслан Сергеевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 4741-7348; ORCID: 0000-0002-8017-5868;
E-mail: litrus277@yandex.ru

Аухадеев Авер Эрикович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 2902-4661; ORCID: 0000-0002-7191-4550;
E-mail: auhadееvkgma@rambler.ru

Ли Кхак Тхинь, аспирант;
eLibrary SPIN: 4088-0521; ORCID: 0000-0001-8967-1641;
E-mail: thinhlc@vlute.edu.vn

Ахсаниев Гамаль Рафаэльевич, магистрант;
eLibrary SPIN: 3794-4427; ORCID: 0000-0003-0355-6656;
E-mail: gakhсанiev@gmail.com

Information about the authors:

Ruslan S. Litvinenko, Candidate of Engineering Science, associate professor;
eLibrary SPIN: 4741-7348; ORCID: 0000-0002-8017-5868;
E-mail: litrus277@yandex.ru

Aver E. Auhadeev, Candidate of Engineering Science, associate professor;
eLibrary SPIN: 2902-4661; ORCID: 0000-0002-7191-4550;
E-mail: auhadееvkgma@rambler.ru

Khak Thin Le, graduate student;
eLibrary SPIN: 4088-0521; ORCID: 0000-0001-8967-1641;
E-mail: thinhlc@vlute.edu.vn

Gamal R. Akhsaniev, undergraduate;
eLibrary SPIN: 3794-4427; ORCID: 0000-0003-0355-6656;
E-mail: gakhсанiev@gmail.com

Цитировать:

Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Ле К.Т., Ахсаниев Г.Р. Вычисление интегрального показателя надежности тягового электрооборудования городского электротранспорта // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 71–84. doi: 10.17816/transsyst20217171-84

To cite this article:

Litvinenko RS, Aukhadееv AE, Le KT, Akhsaniev GR. Calculation Integral Reliability Indicator of the Urban Electric Transport Traction Electrical Equipment. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):71-84. doi: 10.17816/transsyst20217171-84

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.313.336

DOI: 10.17816/transsyst20217185-98

© В. А. Соломин, А. В. Соломин, Н. А. Трубицина, Л. Л. Замшина
Ростовский государственный университет путей сообщения
(Ростов-на-Дону, Россия)

ШАГОВЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Цель: представление нового асинхронного принципа действия шаговых двигателей, основанного на использовании встречно вращающихся (или бегущих) магнитных полей.

Метод: изменение степени симметрии одного из этих магнитных полей приводит к тому, что якорь (ротор или вторичный элемент) совершает точное дискретное перемещение.

Результат: усилие, перемещающее якорь шагового асинхронного двигателя, создается в результате взаимодействия вихревых токов в якоре с вращающимся или бегущим магнитным полем. Шаговые асинхронные двигатели могут обеспечивать поворот ротора на некоторый угол и дискретное перемещение плоских или цилиндрических электропроводящих якорей, которые могут быть гладкими и немагнитными. Отдельную группу двигателей для дискретного электропривода составляют двухкоординатные линейные шаговые асинхронные машины, также работающие с использованием одинаковых встречно бегущих как в продольном, так и в поперечном направлениях магнитных полей.

Заключение: представлены особенности конструктивного выполнения таких электрических машин, определены значения магнитной индукции в различных зонах двухкоординатного шагового двигателя, приводятся соотношения для расчета шагов якоря, как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Ключевые слова: шаговый двигатель встречно вращающиеся (бегущие) магнитные поля, шаговый асинхронный двигатель, двухкоординатный шаговый двигатель.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrical Engineering

© V. A. Solomin, A. V. Solomin, N. A. Trubitsina, L. L. Zamshina
Rostov State Transport University
(Rostov-on-Don, Russia)

STEPPER INDUCTION MOTORS FOR ELECTRIC DRIVE

Aim: The goal is to present a new asynchronous principle of operation of stepper motors, based on the use of counter-rotating (or traveling) magnetic fields.

Method: A change in the degree of symmetry of one of these magnetic fields leads to the fact that the armature (rotor or secondary element) makes a precise discrete movement.

Result: The force moving the armature of a stepper induction motor is created as a result of the interaction of eddy currents in the armature with a rotating or traveling magnetic field. Stepper induction motors can rotate the rotor at a certain angle and discretely move flat or cylindrical electrically conductive armatures, which can be smooth and non-magnetic. A separate group of motors for a discrete electric drive is made up of two-coordinate linear stepping asynchronous machines, which also operate using the same counter-running magnetic fields both in the longitudinal and transverse directions.

Conclusion: The features of the design of such electric machines are presented, the values of the magnetic induction in different zones of a two-coordinate stepper motor are determined, the relations for calculating the steps of the armature in both the longitudinal and transverse directions are given.

Key words: stepper motor, counter-rotating (running) magnetic fields, stepper induction motor, two-coordinate stepper motor.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы шаговый электропривод получает все большее распространение в робототехнике, системах автоматики и телемеханики, в вычислительной и других областях техники. Технический прогресс, рост производительности труда повышают требования к точности позиционирования, к качеству и надежности работы шаговых электроприводов. Основную роль в дискретном электроприводе играют шаговые двигатели (ШД), определяющие качество его функционирования, что делает актуальной задачу разработки и создания более совершенных типов данных электрических машин, обладающих новыми свойствами и возможностями. В качестве ШД применяются, как правило, синхронные электрические машины, обязательным условием работы которых является использование роторов из ферромагнитных материалов, содержащих чередующиеся участки с различными значениями магнитной проводимости. Иными словами, роторы синхронных ШД всегда выполняются зубчатыми [1–4]. Синхронные ШД не способны осуществить дискретное перемещение гладких ферромагнитных и, тем более, немагнитных роторов, что является неустранимым недостатком таких электромашин. Этого недостатка не имеет разработанный шаговый двигатель, являющийся фактически асинхронным, новый принцип действия которого основан на использовании магнитных полей, вращающихся (бегущих) навстречу друг другу [5]. Использование в электрической машине двух и более встречно вращающихся (или бегущих) магнитных полей позволяет создать новые конструкции ШД для точного дискретного перемещения, которые для управления не требуют сложных блоков управления [6–14]. В статье приводятся сведения о различных

видах шаговых асинхронных двигателей (ШАД) для дискретных приводов, подробнее рассмотрен двухкоординатный шаговый асинхронный двигатель.

ВИДЫ ШАГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На индукторе ШАД располагаются, по меньшей мере, две обмотки, токи которых создают одинаковые симметричные вращающиеся (или бегущие) навстречу друг другу магнитные поля, пересекающие электропроводящий якорь (ротор или вторичный элемент в линейной машине) и наводящий в нем электродвижущие силы и токи. Взаимодействие вращающихся (или бегущих) магнитных полей с токами, ими индуцированными в якоре, приводит к созданию двух одинаковых механических усилий, действующих навстречу друг другу. Встречные механические усилия взаимно уравниваются и якорь (ротор или вторичный элемент) остается неподвижным. Если одно из встречно вращающихся магнитных полей индуктора сделать несимметричным (эллиптическим), например, путем отключения части катушек трехфазной обмотки индуктора ШАД, то равновесие механических усилий нарушится, и якорь начнет перемещаться и двигаться будет до тех пор, пока встречно направленные усилия снова не станут одинаковыми [5]. Равновесие усилий нарушается из-за того, что усилие, создаваемое в результате взаимодействия токов якоря с эллиптическим магнитным полем будет меньше усилия, возникающего при взаимодействии токов якоря с симметричным (круговым) магнитным полем. Якорь переместится точно на одно зубцовое деление индуктора и будет зафиксирован в новом положении. В этом случае встречно вращающиеся магнитные поля станут снова одинаковыми, но они будут эллиптическими. Для увеличения усилий электромагнитной фиксации якоря ШАД в новом положении коммутирующее устройство переключает катушки обмотки индуктора так, чтобы встречно вращающиеся магнитные поля снова стали симметричными (круговыми).

Новый принцип действия позволил разработать конструкции вращающихся ШАД с дискретными поворотами гладких, в том числе и немагнитных роторов. Перспективны для применения в дискретных приводах линейные асинхронные шаговые двигатели, у которых роль якоря может выполнять деталь (например, электропроводящий лист), подлежащая обработке или точному перемещению в технологическом процессе. При участии авторов созданы новые конструкции линейных ШАД. Линейные шаговые асинхронные двигатели позволяют регулировать в широком диапазоне величину точного дискретного перемещения электропроводящего вторичного элемента, обеспечивают

дополнительно при шаговом движении точную поперечную ориентацию вторичного элемента. Для недопущения поперечного смещения вторичного элемента относительно индуктора линейного шагового асинхронного двигателя применен тот же принцип встречно бегущих магнитных полей. Система катушек обмотки индуктора ШАД при подключении к источнику напряжения создает одинаковые встречно бегущие магнитные поля, как в продольном, так и в поперечном движении вторичного элемента направления. Коммутирующее устройство для совершения шага вторичного элемента изменяет степень симметрии одного из встречно бегущих магнитных полей только в продольном направлении. Симметричность магнитных полей, встречно бегущих в поперечном дискретному перемещению вторичного элемента направлении, реализуется автоматически.

Для ряда электрических приводов требуются цилиндрические шаговые двигатели. С этой целью разработаны цилиндрические шаговые асинхронные двигатели, Дискретное перемещение электропроводящего цилиндрического вторичного элемента, как по окружности, так и в осевом направлении, обеспечивают цилиндрические шаговые асинхронные двигатели, принцип действия которых основан на сочетании встречно вращающихся и встречно бегущих магнитных полей. Катушки трехфазной обмотки цилиндрического ШАД расположены по окружности и образуют ряды в осевом (продольном) направлении. Коммутирующее устройство (блок управления) подключает катушки обмотки ШАД к источнику напряжения таким образом, что создаются одинаковые встречно вращающиеся по окружности и встречно бегущие в осевом направлении магнитные поля. Нарушение симметрии встречно направленных магнитных полей приводит к нарушению равенства усилий, действующих на цилиндрический вторичный элемент. Это приводит к дискретному перемещению вторичного элемента по окружности или в осевом направлении.

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ШАГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Двухкоординатное дискретное перемещение вторичного элемента позволяет расширить функциональные возможности и область применения шагового линейного асинхронного привода. Конструкция двухкоординатного ШАД содержит катушки многофазной обмотки, образующих ряды, как в продольном, так и в поперечном направлениях. Упрощенная конструктивная схема двухкоординатного линейного шагового асинхронного двигателя представлена на Рис. 1.

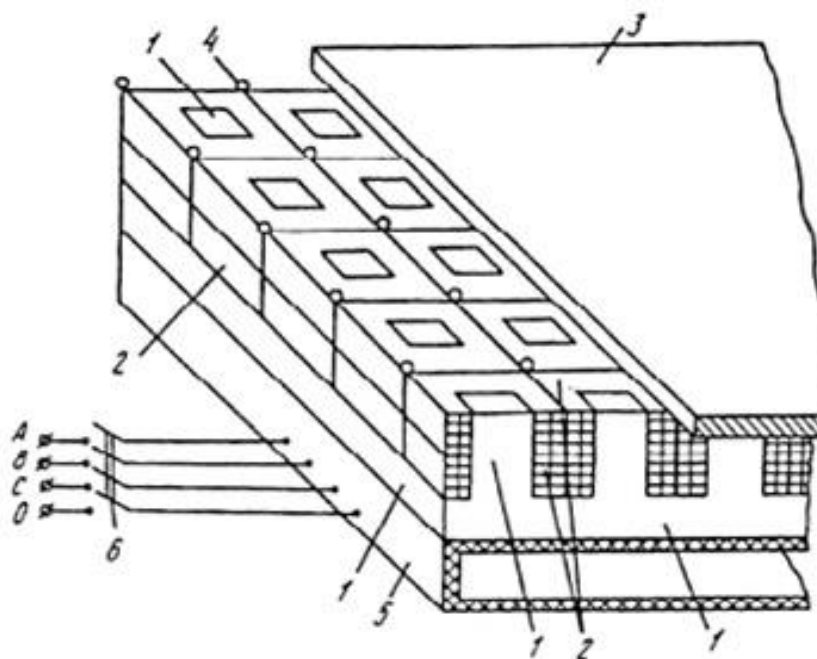


Рис. 1. Двухкоординатный линейный шаговый асинхронный двигатель:

- 1 – сердечник индуктора;
- 2 – катушки обмотки;
- 3 – электропроводящий вторичный элемент;
- 4 – шаровые опоры;
- 5 – коммутирующее устройство;
- 6 – рубильник; 0, A, B, C – обозначения выводов

На зубцах сердечника 1 индуктора двухкоординатного линейного ШАД размещены катушки обмотки 2, образующие ряды в продольном и в поперечном направлениях. Электропроводящий вторичный элемент 3 расположен над индуктором двигателя и лежит на шаровых опорах 4 (Рис. 1). Работой двухкоординатного линейного шагового асинхронного двигателя управляет коммутирующее устройство (блок управления) 5. Один вывод каждой катушки обмотки подключен к нулевому проводу источника напряжения, а второй вывод – при помощи коммутирующего устройства может подключаться к фазам A, B и C для дискретного перемещения вторичного элемента или его электромагнитной фиксации после совершения шага в новом положении. Подключенные коммутирующим устройством катушки обмотки индуктора ШАД образуют ряды как в продольном, так и в поперечном направлениях. Катушки обмотки каждого ряда имеют до середины один порядок следования, а после середины – противоположный порядок следования фаз. Один из вариантов подключения катушек обмотки 2 индуктора двухкоординатного линейного шагового асинхронного двигателя коммутирующим устройством к источнику напряжения изображен на Рис. 2. Вторичный элемент 3 на Рис. 2 обведен жирной линией. На Рис. 2

видно, что катушки обмотки индуктора двухкоординатного линейного шагового асинхронного двигателя выполнены сосредоточенными и охватывают по одному зубцу сердечника индуктора, как в продольном, так и в поперечном направлениях. Подключенные коммутирующим устройством к источнику трехфазного напряжения катушки обмотки образуют ряды в продольном и поперечном направлениях с чередованием фаз A , B и C .

В основе принципа работы двухкоординатного ШАД лежит использование встречно бегущих, как в продольном, так и в поперечном направлениях, магнитных полей. Изменяя программу коммутирующего устройства, можно осуществлять дискретное перемещение вторичного элемента по двум координатам. Предусмотрено и регулирование величины шагов вторичного элемента двигателя.



Рис. 2. Вариант схемы подключения катушки обмотки двухкоординатного ШАД к источнику напряжения:
2 – катушки обмотки; 3 – вторичный элемент

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ШАД

Двухкоординатный ШАД можно считать модификацией традиционного линейного асинхронного двигателя, поэтому электромагнитные и электромеханические процессы в них сходны. Следовательно, принимая традиционные для линейного асинхронного двигателя допущения, а именно: ширина индуктора является бесконечно большой; индуктор имеет шунтирующие концевые участки, длина ℓ

которых бесконечно велика; магнитное поле принимаем плоскопараллельным; магнитная проницаемость стали магнитопровода равна бесконечности $\mu_{ст} = \infty$; магнитная проницаемость равномерного зазора равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, можно использовать одномерную модель двустороннего ШАД, изображенную на Рис. 3. Второй элемент в зазоре отсутствует.

Приведенная расчетная модель при соответствующем подборе величины эквивалентного зазора может быть использована для описания одностороннего ШАД. Зоны 1, 4 и 5 соответствуют участкам индуктора, не содержащим проводники с током. Зоны 2 и 3 – активные. В зоне 2 проводниками с током создается поле, бегущее слева направо, т.е. в положительном направлении координатной оси x . В зоне 3 – поле, бегущее справа налево. Каждая активная зона имеет длину ℓ . Зона 5 имеет длину nt_{z1} , где $n = 0, 1, 2, \dots$. При $n = 0$ зона 5 отсутствует. На Рис. 3 γ – электрическая проводимость среды; δ – величина воздушного зазора; X_0 – координата начала зоны 2, изменяемая дискретно на величину шага, кратную t_{z1} .

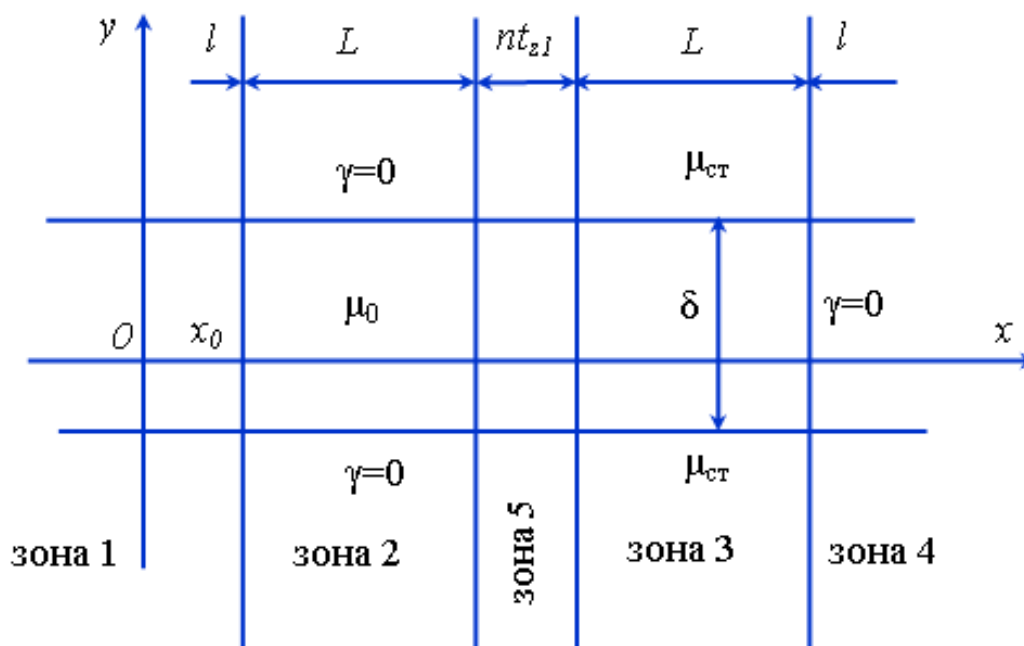


Рис. 3. Расчетная модель ШАД в продольном направлении

На основании данных теоретических исследований линейных асинхронных двигателей, приведенных в [15], используя принцип суперпозиции для первых гармоник магнитных полей, применительно к ШАД распределение магнитного поля по длине индуктора выглядит следующим образом.

Магнитная индукция в зоне 1:

$$B_1 = \left[-B_m \cos \pi \omega t + B_m \cos \left(\omega t - \alpha \frac{L}{2} \right) \right] e^{b(x-x_0)} \\ \pm \left[-B_m \cos(\omega t + \alpha L) + B_m G_\infty \cos \left(\omega t - \alpha \frac{L}{2} \right) \right] e^{b(X-X_0-L-nt_{z1})} \quad (1)$$

Магнитная индукция в зоне 2:

$$B_2 = -B_m \cos \left(\omega t - \alpha (X - X_0) \right) e^{b(x-x_0)} + B_m G_\infty \cos \left(\omega t - \alpha \frac{L}{2} \right) \\ \pm \left[-B_m \cos(\omega t + \alpha L) + B_m G_\infty \cos \left(\omega t - \alpha \frac{L}{2} \right) \right] e^{b(X-X_0-L-nt_{z1})} \quad (2)$$

Магнитная индукция в зоне 3:

$$B_3 = \pm \left[-B_m \cos \left(\omega t + \alpha (X - X_0 - nt_{z1}) \right) + B_m G_\infty \cos \left(\omega t - \alpha \frac{L}{2} \right) \right] \\ + \left[-B_m \cos(\omega t - \alpha L) + B_m G_\infty \cos \left(\omega t - \alpha \frac{L}{2} \right) \right] e^{b(L-X+X_0)} \quad (3)$$

Магнитная индукция в зоне 4:

$$B_4 = \left[-B_m \cos(\omega t - \alpha L) + B_m G_\infty \cos \left(\omega t - \alpha \frac{L}{2} \right) \right] e^{b(L-X+X_0)} \\ \pm \left[-B_m \cos \left(\omega t + 2\alpha L \right) + B_m G_\infty \cos \left(\omega t - \alpha \frac{L}{2} \right) \right] e^{b(X_0+2L+nt_{z1}-X)} \quad (4)$$

Магнитная индукция в зоне 5:

$$B_5 = \left[-B_m \cos(\omega t - \alpha L) + B_m G_\infty \cos \left(\omega t - \alpha \frac{L}{2} \right) \right] e^{b(L-X+X_0)} \\ \pm \left[-B_m \cos(\omega t + \alpha L) + B_m G_\infty \cos \left(\omega t - \alpha \frac{L}{2} \right) \right] e^{b(X-X_0-L-nt_{z1})} \quad (5)$$

В выражениях 1–5 знак «плюс» соответствует чередованию выводов катушек обмотки индуктора в порядке $A, X, B, Y, C, Z, C, Z, B, Y, A, X$; знак «минус» – в порядке $A, X, B, Y, C, Z, Z, C, Y, B, X, A$.

В выражениях 1–5 согласно [15]:

$$G_{\infty} = \frac{\left[\frac{b}{\alpha} \sin \alpha \frac{L}{2} + \cos \alpha \frac{L}{2} \right]}{1 + \frac{bL}{2}}, \quad (6)$$

где

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau}; b = \frac{1}{dk_d}.$$

Для двустороннего ШАД магнитная индукция вычисляется на плоскости симметрии воздушного зазора, для одностороннего – на поверхности индуктора.

Расчетная модель для двухкоординатного ШАД в поперечном направлении будет аналогичной модели, представленной на Рис. 3.

Полученные соотношения для определения магнитной индукции в различных зонах двухкоординатного ШАД в режиме идеального холостого хода (при отсутствии вторичного элемента) могут послужить основой для создания методики проектирования нового типа шаговых двигателей.

РАСЧЕТ ШАГОВ ДВУХКООРДИНАТНОГО ЛИНЕЙНОГО ШАД

Рассмотрим вариант двухкоординатного шагового асинхронного двигателя (Рис. 1). Каждая катушка трехфазной обмотки индуктора охватывает по $P=V \cdot T$ зубцов сердечника, где $V=1, 2, 3, \dots$ – число зубцов на сторону катушки в продольном направлении; $T=1, 2, 3, \dots$ – число зубцов на сторону катушки в поперечном направлении. Катушки обмотки индуктора, подключенные к коммутирующему устройству, образуют прямоугольник, содержащий, по меньшей мере, пять продольных и пять поперечных первоначальных рядов, причем катушка, входящая в любой из продольных рядов, входит в какой-либо из поперечных рядов. Каждая катушка содержит по N секций, а коммутирующее устройство для совершения шага выполнено с возможностью отключения, по меньшей мере, одной секции последней катушки первоначального ряда. В каждом первоначальном ряду возможно расположение подряд двух и более катушек, подключенных к одной фазе, количество которых равно G . Группы из G катушек располагаются на зубцах сердечника индуктора ШАД, отстоящих друг от друга на M зубцовых делений ($M=1, 2, 3, \dots$). Катушки обмотки, подключенные к разным фазам источника напряжения, располагаются на зубцах индуктора, отстоящих друг от друга на K зубцовых делений ($K=1, 2, 3, \dots$).

Для совершения шага вторичного элемента в продольном направлении коммутирующее устройство отключает, по меньшей мере, по одной секции в последних катушках каждого продольного первоначального ряда, а, по большей мере, по $2 \cdot N \cdot (G-1)$. Минимальная величина шага вторичного элемента в зубцовых делениях:

$$S_{min} = \frac{V}{N} \quad (7)$$

Максимальна величина шага при G не равном единице:

$$S_{max} = 2(M-1)(G-1) + V(2G-1) + (K-1) + \frac{V(N-1)}{N}. \quad (8)$$

Если $G = 1$, то:

$$S_{max} = (K-1) + V + \frac{V(N-1)}{N}. \quad (9)$$

В общем случае при отключении от источника напряжения L катушек ($L=0, 1, 2, \dots, 2 \cdot (G-1)$) в конце каждого продольного первоначального ряда и V секций в каждой катушке, предшествующей упомянутым ранее ($V=0, 1, 2, \dots, (N-1)$), величина продольного шага вторичного элемента составит:

$$S = VL + (M-1)(L-1) + V\left(\frac{V}{N}\right) + (K-1) - (M-1). \quad (10)$$

Для устойчивой электромагнитной фиксации вторичного элемента ШАД в новом положении после совершения шага в продольном направлении коммутирующим устройством от источника напряжения отключаются, по меньшей мере, первая катушка первоначального ряда, а, по большей мере, $2(G-1)$ катушка, считая от начала каждого продольного ряда. К источнику напряжения подключаются другие катушки обмотки индуктора таким образом, что создаются новые ряды (продольные и поперечные) по структуре и свойствам аналогичные первоначальным рядам, катушки обмотки каждого из которых образуют до середины ряда прямой, а после середины – противоположный порядок следования фаз. Каждый новый продольный ряд катушек сдвинут относительно соответствующего первоначального ряда на величину совершенного вторичным элементом перемещения, т.е. на целое число зубцовых делений.

Для совершения шага вторичного элемента в поперечном направлении и последующей его электромагнитной фиксации в новом положении последовательность операций с поперечными рядами катушек

полностью аналогична операциям для выполнения шага в продольном направлении.

Минимальное дискретное перемещение вторичного элемента ШАД в поперечном направлении:

$$S_{min} = \frac{T}{N}. \quad (11)$$

Максимальный шаг вторичного элемента в поперечном направлении:

$$S_{max} = 2(M-1)(G-1) + T(2G-1) + (K-1) + \frac{T(N-1)}{N}. \quad (12)$$

Если $G=1$, то

$$S_{max} = (K-1) + T + \frac{T(N-1)}{N}. \quad (13)$$

Общее выражение для расчета дискретного перемещения вторичного элемента ШАД в поперечном направлении:

$$S = TL + (M-1)(L-1) + \frac{TV}{N} + (K-1) - (M-1). \quad (14)$$

Полученные соотношения (7–14) справедливы при выполнении одинаковыми секций катушек обмотки двухкоординатного шагового асинхронного двигателя.

Конструкция двухкоординатного линейного ШАД позволяет реализовать и плавное перемещение вторичного элемента в продольном и поперечном направлениях. Для плавного перемещения вторичного элемента в продольном направлении следует изменять ток в цепях секций катушек обмотки индуктора, образующих продольные ряды. Изменение величины тока должно производиться в $2G$ катушках, считая от конца каждого продольного ряда. Таким образом, можно осуществить перемещение вторичного элемента ШАД в продольном направлении на сколь угодно малую величину. Для плавного перемещения вторичного элемента на сколь угодно малую величину следует регулировать (уменьшать) ток в $2G$ катушках, считая от конца каждого поперечного ряда катушек обмотки индуктора.

Определим величину дискретных перемещений вторичного элемента двухкоординатного линейного шагового асинхронного двигателя в продольном и поперечном направлениях для конкретного случая. Например, катушки трехфазной обмотки индуктора ШАД выполнены так, что $P=V \cdot T=1 \cdot 1=1$; $N=2$; $G=2$, как в продольном, так и в поперечном направлениях; $M=1$ в продольном направлении и $M=2$ в поперечном

направлении; $K=2$ в продольном направлении и $K=1$ в поперечном направлении.

Минимальный шаг вторичного элемента в продольном направлении для данного ШАД в соответствии с формулой (7) $S_{min} = 1/2$ зубцового деления.

Максимальный шаг вторичного элемента в продольном направлении в соответствии с (8) $S_{max}=2\cdot(1-1)\cdot(2-1) + 1\cdot(2\cdot2 - 1) + (2-1) + 1\cdot(2-1)/2 = 4\cdot1/2$ зубцовых делений индуктора ШАД.

В поперечном направлении минимальный шаг вторичного элемента ШАД в соответствии с выражением (11) $S_{min}=1/2$ зубцового деления.

Максимальный размер дискретного перемещения вторичного элемента ШАД в соответствии с соотношением (12) $S_{max}=2\cdot(2-1)\cdot(2-1) + 1\cdot(2\cdot2-1) + (1-1) + 1\cdot(2-1)/2=5\cdot1/2$ зубцовых делений индуктора ШАД.

Изменяя способы переключения катушек обмотки индуктора двухкоординатного шагового линейного двигателя, можно реализовать большое число вариантов дискретного перемещения вторичного элемента как в продольном, так и в поперечном направлениях. Если вторичный элемент выполнен из немагнитного материала, то его перемещение может осуществляться бесконтактно (на магнитном подвесе). Заметим, что левитация (магнитная подвеска) вторичного элемента возможна в собственном магнитном поле индуктора ШАД.

ВЫВОДЫ

1. Использование встречно бегущих магнитных полей позволило создать шаговые асинхронные двигатели с новым принципом действия. Новый тип шаговых асинхронных двигателей позволяет в ряде случаев объединить силовой двигатель с рабочим механизмом.

2. Обеспечена высокая точность дискретного перемещения гладких, в том числе и немагнитных якорей (роторов и вторичных элементов) с надежной электромагнитной фиксацией их в новом положении после совершения шага.

3. Достигнута возможность точного дискретного бесконтактного перемещения электропроводящих листов и деталей по двум координатам, в том числе и на магнитном подвесе в собственном магнитном поле индукторов линейных ШАД.

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. Чиликин М.Г. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с. [Chilikin MG. Discrete electric drive with stepper motors. Moscow: Energiya; 1971. 624 p. (In Russ.)].
2. Осипов О.Ю., Осипов Ю.М., Щербинин С.В. Мультикоординатные электромехатронные системы движения: монография. – Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2010. – 320 с. [Osipov OUu, Osipov UuO, Shcherbinin SV. Multi-coordinate electromechatronic motion systems: monograph. Tomsk: Tomsk state. University of Control Systems and Radioelectronics; 2010. 320 p. (In Russ.)].
3. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с. [Kenio T. Step motors and their microprocessor control systems. Moscow: Energoatomizdat; 1987. 200 p. (In Russ.)].
4. Kenjo T, Sugawara A. Stepping Motors and Their Microprocessor Controls. *Oxford University Press*. 2 ediction, 1994, 279 p.
5. Соломин В.А. Шаговые асинхронные двигатели // Электричество. – 2009. – № 2. – С. 36–40. [Solomin VA. Step induction motors. *Electricity*. 2009;2:36-40 (In Russ.)].
6. Капля В.И., Пан А.Г., Дягилева Т.В. Алгоритм вычисления минимального времени одного такта работы шагового двигателя // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2 [Kaplya VI, Pan AG, Diaghileva TV. Algorithm for calculating the minimum time of one cycle of the stepping motor. *Engineering Bulletin of the Don*. 2015;2. (In Russ.)].
7. Моисеев А.А. Оптимальное управление при дискретных управляющих воздействиях // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 9. – С. 123–132. [Moiseev AA. Optimal control for discrete control actions. *Automation and telemekhanics*. 1991;9:123-132. (In Russ.)].
8. Athani VV. Stepper Motors: Fundamentals Applications and Design. *New Age International*. 1997. 201 p.
9. Красовский А.Б. Способ определения закона управления разомкнутым шаговым электродвигателем // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 3. – С. 320–330. [Krasovsky AB. Method for determining the control law of an open stepping motor. *Science and Education: scientific publication of MSTU im. N.E. Bauman*. 2015;3: 320-330 (In Russ.)].
10. Губанова А.А., Гузаревич А.С., Таридонов Н.Е. Система управления шаговым двигателем // Электроника и электротехника. – 2018. – № 2. – С. 41–47. [Gubanova AA, Guzarevich AS, Taridonov NE. Stepper motor control system. *Electronics and Electrical Engineering*. 2018;2:41-47. doi: 10.7256/2453-8884.2018.2.26014 (In Russ.)].
11. Постников В.А., Семисалов В.В. Исследование динамических режимов шаговых и вентильных двигателей малой мощности на базе моделей обобщенной синхронной машины // Электричество. – 2002. – № 5. – С. 53–60. [Postnikov VA., Semisalov VV. Investigation of dynamic modes of small-power stepping and valve motors on the basis of generalized synchronous machine models. *Electricity*. 2002;5:53-60 (In Russ.)].
12. Постников В.А., Семисалов В.В. Компьютерное моделирование динамических процессов в системах с электрическими шаговыми двигателями // Авиационное и космическое приборостроение. – 2003. – № 4. – С. 2–11. [Postnikov VA, Semisalov VV. Computer modeling of dynamic processes in systems with electric stepping motors. *Aviation and Space Instrumentation*. 2003;4:2-11. (In Russ.)].

13. Постников В.А., Семисалов В.В. Сравнение динамических характеристик малоомощного шагового электропривода при использовании различных моделей и компьютерном моделировании // *Авиационное и космическое приборостроение*. 2004. – № 1. – С. 9–16. [Postnikov VA, Semisalov VV. Comparison of the dynamic characteristics of a low-power step electric drive using various models and computer modeling. *Aviation and Space Instrumentation*. 2004;1:9-16. (In Russ.)].
14. Постников В.А., Семисалов В.В. Исследование устойчивости шагового электропривода на базе системы «Трехфазный транзисторный инвертор напряжения – шаговый двигатель» // *Авиационное и космическое приборостроение*. – 2005. – № 5. – С 40–48. [Postnikov VA, Semisalov VV. Investigation of the stability of a stepping electric drive based on the system "Three-phase transistor voltage inverter - stepping motor". *Aviation and Space Instrumentation*. 2005;5:40-48. (In Russ.)].
15. Партс И.Р. Теоретические и экспериментальные исследования индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом: монография. – Таллин: Валгус, 1972. – 246 с. [Parts IR. *Theoretical and experimental research of induction machines with an open magnetic circuit*. Tallinn: Valgus; 1972. 246 p. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Соломин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор;

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

E-mail: ema@rgups.ru

Соломин Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент;

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

E-mail: vag@rgups.ru

Трубицина Надежда Анатольевна, кандидат технических наук, доцент;

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

E-mail: ema@rgups.ru

Замшина Лариса Леонидовна, кандидат технических наук, доцент;

e-Library SPIN: 8703-1347; ORCID: 0000-0001-5374-9493;

E-mail: ema@rgups.ru

Information about the authors:

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

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

E-mail: ema@rgups.ru

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

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

E-mail: vag@rgups.ru

Nadejda A. Trubitsina Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

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

E-mail: ema@rgups.ru

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

e-Library SPIN: 8703-1347; ORCID: 0000-0001-5374-9493;

E-mail: ema@rgups.ru

Цитировать:

Соломин В.А., Соломин А.В., Трубицина Н.А., Замшина Л.Л. Шаговые асинхронные двигатели для электропривода // *Транспортные системы и технологии*. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 00–00. doi: 10.17816/transsyst20217100-00

To cite this article:

Solomin VA, Solomin AV, Trubitsina NA, Zamshina LL. Stepper induction motors for electric drive. *Transport systems and technologies*. 2021;7(1):00-00. doi: 10.17816/transsyst20217185-98

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление - Транспортные и транспортно-логистические системы

УДК [UDC] 624.014.2: 625.41:656.21

DOI 10.17816/transsyst20217199-123

© Н. А. Сенькин, А. С. Филимонов, И. М. Халимбеков,

А. И. Кравец, Д. Митровска, И. С. Большихшапок

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(Санкт-Петербург, Россия)

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ ЭСТАКАДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МАГИСТРАЛИ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

В рамках студенческих исследований в Санкт-Петербургском архитектурно-строительном университете продолжается разработка альтернативных предложений по созданию окружной высокоскоростной магистрали на границах связи территорий Санкт-Петербурга и Ленинградской области. В статье представлены результаты научно-исследовательских работ по оптимизации схемы прокладки транспортной магистрали, по архитектурной компоновке зданий транспортно-пересадочных узлов, по исследованию влияния предварительно-напряжения затяжек и вант на снижение усилий и деформаций основных элементов магистрали, выполнены расчеты конструкций наиболее высокого и нагруженного морского участка. Схема прокладки высокоскоростной транспортной магистрали модернизирована в связи с ограничениями, связанными с реконструкцией аэропортов «Левашово» и «Пулково», переносом столицы Ленинградской области в Гатчину, привязкой к перспективным станциям метрополитена «Стрельна», «Янино» и «Кудрово». Модернизированная схема магистрали предложена в виде разомкнутого многоугольника с транспортно-пересадочными узлами в углах и основана на несущих эстакадных конструкциях арочно-вантового исполнения, обеспечивающих необходимую функциональность, надежность и безопасность.

Обоснование: в «Концепции развития транспортной системы Санкт-Петербурга» представлен ряд сложных транспортных проблем на границах связи территорий Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а именно: недостаточное развитие метрополитена и скоростного трамвая, отсутствие широкой сети транспортно-пересадочных узлов, наличие многочисленных барьеров (железные дороги, парки, реки и каналы и т.п.), исчерпание пропускной способности входных автомагистралей, наличие высокой плотной застройки. Кроме того, реальное проектирование и строительство автомагистралей в транспортной политике Санкт-Петербурга имеет приоритетное развитие в сравнении с высокоскоростным электротранспортом, что приводит к дополнительным экологическим потерям.

Цель: разработка окружной высокоскоростной транспортной системы на границах связи Санкт-Петербурга и Ленинградской области, построенной на широком применении электротранспорта, с пассажиропотоком, сопоставимым с линией метрополитена.

Материалы и методы: рассчитаны эстакадные конструкции на сочетании действующих нагрузок, сил и воздействий, включая учет динамических аспектов и нелинейности, с использованием программного комплекса "SCAD Office".

Результаты: по результатам вариантного проектирования в качестве несущей конструкции, принят арочно-вантовый вариант с пролетами 180 м и 360 м по критерию металлоемкости, ставший базовым для построения магистрали эстакадного исполнения. Из приближенного расчета следует, что стоимость строительства магистрали на земных участках (двухпутная схема) по сравнению со строительством метрополитена ожидается в 5–6 раз ниже, а на морских участках – в 3–4 раза ниже за счет высоких пилонов и глубоких свайных фундаментов.

Заключение: расчетный объем пассажироперевозок за сутки для двухпутной высокоскоростной и двухпутной скоростной магистралей составит 208 тыс. пассажиров, а в год – 76 млн пассажиров, который вполне сопоставим с данным показателем для линии метрополитена.

Ключевые слова: высокоскоростная транспортная магистраль, эстакада из труб большого диаметра, магнитно-левитационная подушка, пониженное давление в трубах, вантовые и арочные конструкции.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Transport and Transport & Logistics Systems

© N. A. Senkin, A. S. Filimonov, I. M. Khalimbekov, A. I. Kravets,
D. Mitrovskaya, I. S. Bolshikhshapok

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
(St. Petersburg, Russia)

PROPOSALS FOR THE CONSTRUCTION OF OVERPASS STRUCTURES AND TRANSPORT HUBS FOR THE HIGH-SPEED HIGHWAY IN ST. PETERSBURG

Background: As part of student research at St. Petersburg architectural-construction University continues to develop alternative proposals for the creation of a circumferential highway at the boundaries of communication areas of St. Petersburg and Leningrad region. The article presents the results of research works on optimization of routing highways, according to the architectural layout of buildings, transport hubs, to study the effects the pre-tension of the puffs and the guys at the reduction of efforts and deformations of the main elements of the highway, the calculations of the designs of the most high and loaded sea area. The construction of the 8-high-speed transport highway was upgraded due to restrictions related to the reconstruction of Levashovo and Pulkovo airports, the transfer of the capital of the Leningrad region to Gatchina, and linking to the promising metro stations Strelna, Yanino and Kudrovo. The upgraded scheme of the highway is proposed in the form of an open polygon with transport and interchange nodes in the corners and is based on load-bearing trestle structures of arched-cable design that provide the necessary functionality, reliability and safety.

Aim: development of a district high-speed transport system on the borders of St. Petersburg and the Leningrad region, based on the widespread use of electric transport, with passenger traffic comparable to the metro line.

Materials and Methods: trestle structures are designed for combinations of operating loads, forces and impacts, including consideration of dynamic aspects and non-linearity, using the "SCAD Office" software package.

Results: based on the results of variant design, an arch-cable-stayed version with spans of 180 m and 360 m was adopted as a supporting structure according to the metal consumption criterion, which became the basic one for building a highway of overpass design. From an approximate calculation, it follows that the cost of building a highway on land plots (two-track scheme) compared to the construction of the metro, it is expected to be 5-6 times lower, and on the sea sections – 3-4 times lower due to high pylons and deep pile foundations.

Conclusion: the estimated volume of passenger traffic per day for the two-track high-speed and two-track high-speed highways will be 208 thousand passengers, and 76 million passengers per year, which is quite comparable to this indicator for the metro line.

Key words: high-speed transport highway, beam-overpass of large diameter pipes, magnetic levitation cushion, low pressure in the pipes, the trestle structures, cable-stayed and arched structures.

ВВЕДЕНИЕ

Известная транспортная проблема в Санкт-Петербурге – перегруженность автомобилями и пробки, возникающие в напряженных местах, включая зоны входа автомагистралей в мегаполис, а также слабое развитие метрополитена и скоростных видов наземного электрифицированного рельсового транспорта [1]. В настоящее время, к сожалению, проектирование и строительство городских и пригородных автомобильных магистралей в транспортной политике Санкт-Петербурга имеет более приоритетный уровень по сравнению с другими видами. Так построен Западный и проектируется Восточный скоростные автомобильные диаметры, пересекающие городские кварталы, загрязняя городскую атмосферу и приводя к экологическому ущербу [2].

В Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете (СПбГАСУ) в рамках студенческих научных исследований по теме «Инновационные предложения по созданию высокоскоростной транспортной системы Санкт-Петербурга», в частности, выполняются инициативные разработки альтернативных предложений по созданию окружной надземной высокоскоростной транспортной магистрали (ВСТМ) [3]. ВСТМ системы «Роса» проектируется на движение высокоскоростных пассажирских электропоездов с максимальной скоростью 500 км/ч, подлежащих разработке с применением технологий Маглев и ЕТТ (Evacuated Tube Transportation) [4–11]. Так в первой авторской статье под названием «К вопросу создания высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге», опубликованной в электронном журнале «Транспортные системы и технологии» [3], разработана основная концепция ВСТМ «Роса» и представлены результаты научно-исследовательских работ (НИР) за 2017–2019 гг. по вышеуказанной теме (Ч. 1). Были разработаны: окружная

«кольцевая» схема и технологическая система магистрали, жесткая главная балка, представляющая собой составную многотрубную конструкцию с рельсовым путем 1520 мм и пониженным внутренним давлением на скоростных участках в каждой трубе. В области строительных конструкций выполнено вариантное проектирование вантово-стержневых систем с выбором арочно-вантового варианта для эстакадной конструктивной схемы, обеспечивающей жесткую поддержку балки.

В настоящей статье в продолжении данной темы представлены результаты НИР за 2019–2020 гг. (Ч. 2), а именно: модернизация схемы прокладки транспортной магистрали; архитектурная компоновка зданий транспортно-пересадочных узлов (ТПУ); исследование предварительно-напряжения затяжек и вант на снижение основных усилий и деформаций элементов; расчеты конструкций наиболее высокого и нагруженного морского участка.

С целью решения проблем мегаполиса, приводящих к системному градостроительному кризису, угрожающему экологической безопасности, авторы настоящей статьи предлагают максимально отказаться от использования пассажирского автотранспорта, особенно в центральной части Санкт-Петербурга и перейти на экологически чистый городской электрифицированный скоростной транспорт (метро, скоростной трамвай, троллейбус), а также на инновационный высокоскоростной транспорт, допускающий движение пассажирских электропоездов с максимальной скоростью 500 км/ч, преимущественно на технологиях Маглев и ЕТТ (Evacuated Tube Transportation). При этом выход видится в дальнейшем повышении скорости и комфортности общественного транспорта, особенно на электротяге, приближении его остановок к станциям метро, минимизации протяженности внутренних переходов, возведении транспортно-пересадочных узлов и более крупных мультимодальных транспортно-пересадочных комплексов (МТПК). Такие комплексы характеризуются сочетанием транспортных сооружений с объектами социальной, сервисной и торгово-развлекательной инфраструктуры, чем обеспечивается более высокий уровень комфорта и транспортного обслуживания пассажиров.

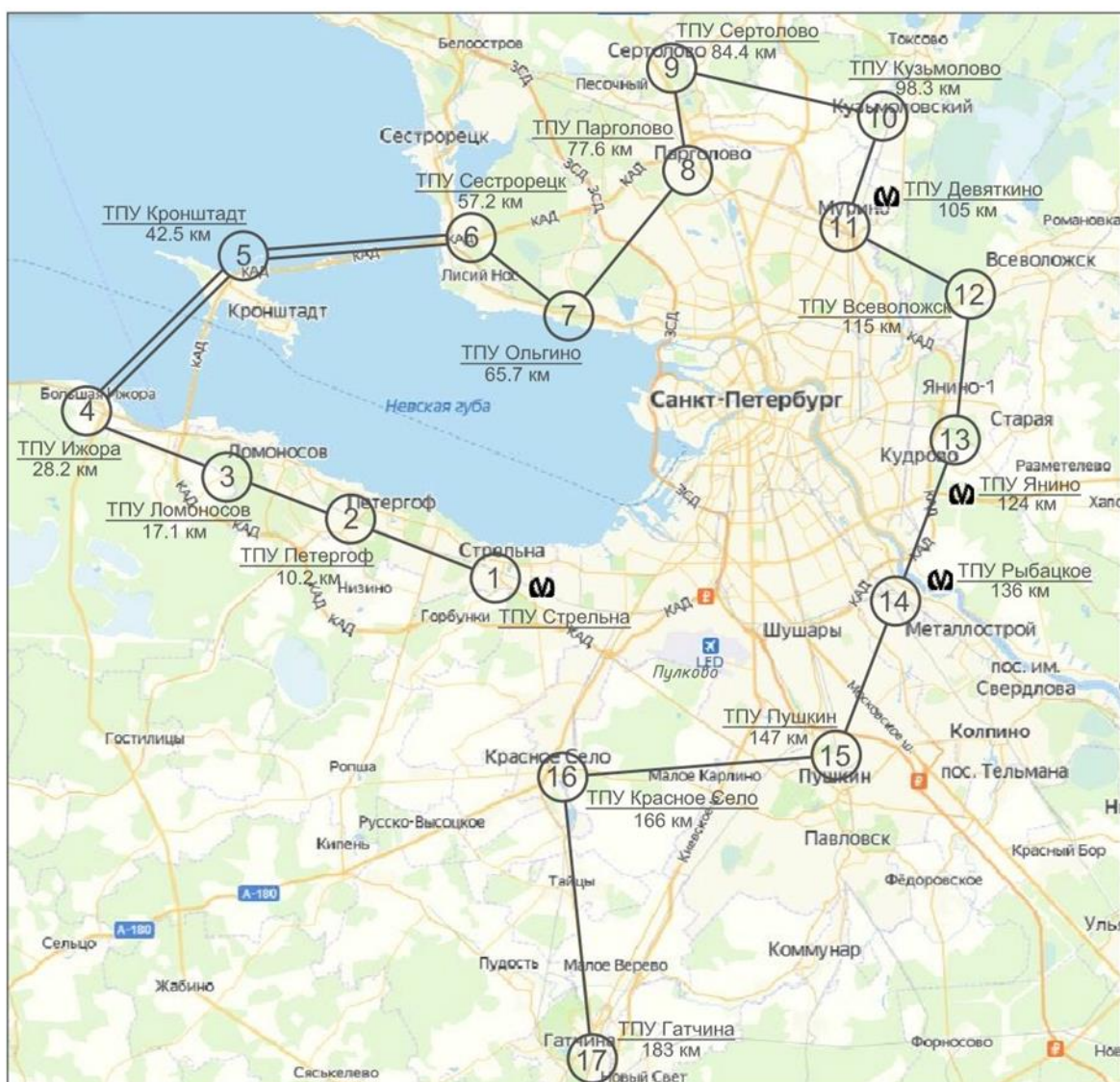
Из многолетнего опыта компании Transrapid по возведению коммерческих пассажирских Маглев-линий известно, что затраты на строительство инфраструктуры могут составить до 60–80 % от общих затрат [12]. Поэтому основным направлением авторских исследований стала разработка схемы ВСТМ, а также технологической и конструктивной основы магистрали, включая ТПУ, в частности высотных и большепролетных несущих конструкций эстакадного исполнения, обеспечивающих функциональность транспортной системы, надежность конструкций, безопасность для человека и экологии мегаполиса.

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ СХЕМА МАГИСТРАЛИ

Первичная «кольцевая» схема прохождения ВСТМ предложена в виде многоугольника с транспортно-пересадочными узлами в углах и основана на несущих эстакадных конструкциях арочно-вантового вида, обеспечивающих размещение стальной главной балки с рельсовыми путями с отметкой +88,00 в Балтийской системе высот [3]. Такое высотное положение балки принято в целях снижения шумового воздействия на мегаполис, преодоления многочисленных искусственных и естественных препятствий, повышения антитеррористической защищенности. При этом обеспечивается необходимый горизонтальный уровень путей посредством несущего конструктива магистрали и архитектурно-конструктивного решения зданий ТПУ со спиральными пандусами, обеспечивающими переходы на другой уровень. Первичная схема прохождения ВСТМ изменена в связи с ограничениями, связанными с реконструкцией аэропортов «Левашово» и «Пулково», переносом столицы Ленинградской области в Гатчину, привязкой к проектируемым станциям метрополитена «Стрельна», «Янино» и «Кудрово» (Рис. 1).

Весьма сложным оказался высотный рельеф на разных участках, особенно на севере и востоке магистрали, что потребовало соответствующих изменений с устройством обходных участков. С учетом Федеральных авиационных правил «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов» неподвижные объекты большой протяженности с истинной высотой над уровнем земли более 50 м, в частности следует обеспечить светоограждением посредством заградительных огней [13].

Вышеуказанные требования наложили дополнительные изменения известной, ранее предложенной, «кольцевой» Схеме [3], которые привели к более «ломанному» характеру и «разрыву» оси новой транспортной магистрали в связи с ограничениями со стороны аэропортов «Левашово» и «Пулково». При этом значительно изменились высоты основного конструктива ВСТМ, которые понизились до 20...50 м на сухопутных участках, обеспечивая значительное сокращение расхода стали и железобетона на конструкции и фундаменты. Горизонтальный уровень рельсового основания балки обеспечен посредством несущего конструктива магистрали и особыми архитектурно-конструктивными решениями зданий ТПУ. При этом благодаря наличию спиральных пандусов ТПУ осуществлен переход рельсового основания на новые отметки и выход в примыкающее здание депо, как правило, размещаемое на отметке земной поверхности.



Условные обозначения:

— Высота балки путепровода до 50.0 м от поверхности земли

== Высота балки путепровода более 50.0 м от поверхности земли

Рис. 1. Новая схема высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге (Схема №1)

Общая схема новой ВСТМ проявилась в виде ломанной незамкнутой линии с прямыми перегонами и ТПУ в углах (Рис. 1). Она стала более протяженной (183,0 км вместо 147,2 км), количество станций ТПУ существенно выросло (17 против 10), длина прямых отрезков – перегонов стала более дифференцированной (от 6,7 до 19 км). Оптимизирована линия прохождения морского фарватера на надводном участке ВСТМ в акватории Финского залива с выходом нижней точки на ТПУ «Ижора» с обходом Кольцевой автомагистрали (КАД) без вхождения в акваторию

Кронштадта. Кроме того, от ТПУ «Кузьмолово» появилась возможность северо-западного ответвления ВСТМ на Выборг и Финляндию (Рис. 1).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАГИСТРАЛИ

Предлагаемая новая ВСТМ обеспечивает удобные, быстрые и безопасные высокоскоростные транспортные связи мегаполиса с пригородами и близлежащими поселениями Ленинградской области. ВСТМ относится к внеуличной сети, так как построена на высотных и большепролетных конструкциях на эстакадной основе, которые обеспечивают оптимальное преодоление естественных и искусственных преград, включая высотную высокоплотную застройку.

На Рис. 2 представлены конструктивно-технологические компоненты ВСТМ, относящиеся к основным функциональным зонам. Посредством указанных компонентов обеспечивается работоспособность функциональных зон ВСТМ, характеризующихся как уровнем давления воздуха во внутренней полости транспортных труб, так и соответствующим скоростным режимом движения составов. Для высокоскоростных поездов «Роса» главная балка выполняется четырехтрубной с рельсовым основанием в каждой трубе, включая обратное направление.

Конструктивно-технологическая схема ВСТМ на прямолинейном участке – перегоне между станциями ТПУ «Стрельна» и ТПУ «Петергоф» общей протяженностью 10,2 км, составлена из большепролетных арочных эстакад пролетами 180 м и 360 м, обеспечивающих надежную и безопасную подвеску главной балки (Рис. 3).

Здесь представлен график скоростного движения состава, иллюстрирующий равноускоренный процесс набора скорости V с ускорением $a=4,63 \text{ м/с}^2$ ($0,47g$) в течение 0,5 мин (30 с) до максимальной скорости $V_{max}=500 \text{ км/ч}$ и аналогично – снижения скорости. При этом протяженность зоны разгона для высокоскоростного варианта составляет 2,1 км и аналогично – зоны торможения, а для скоростного варианта при $V_{max}=100 \text{ км/ч}$ – 0,835 км соответственно.

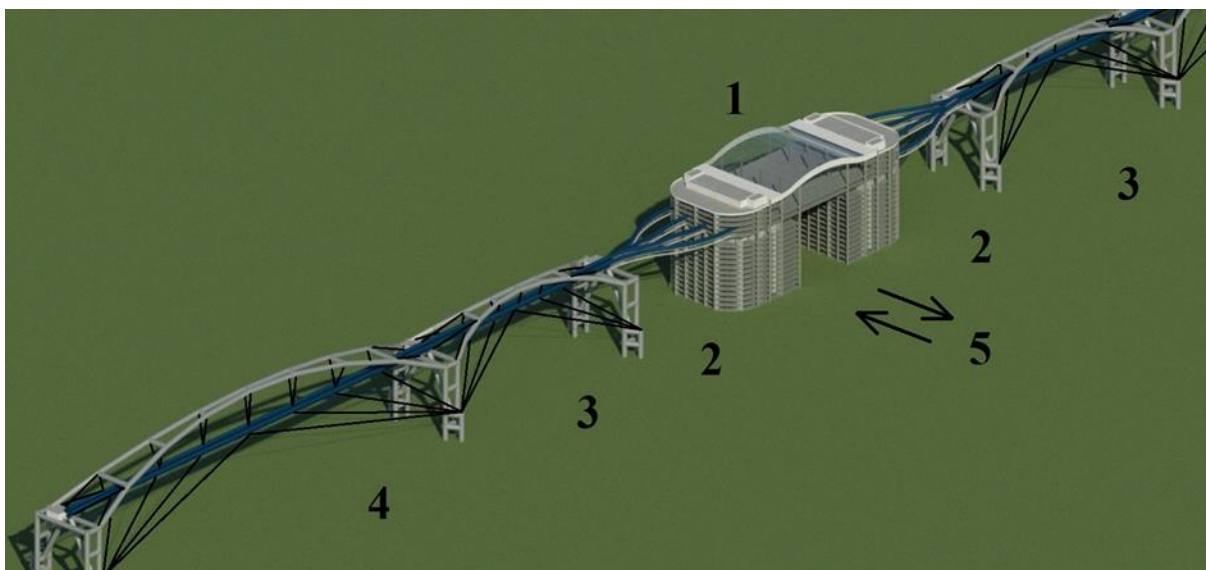


Рис. 2. Основные функциональные зоны высокоскоростной магистрали:
 1 – здание ТПУ с пассажирскими платформами на верхних этажах;
 2 – зона входа-выхода поездов в транспортные трубы главной балки;
 3 – зона остановки составов в транспортных трубах (пролет 180 м);
 4 – зона разгона-торможения состава (пролет 360 м);
 5 – направления движения пассажирского городского транспорта

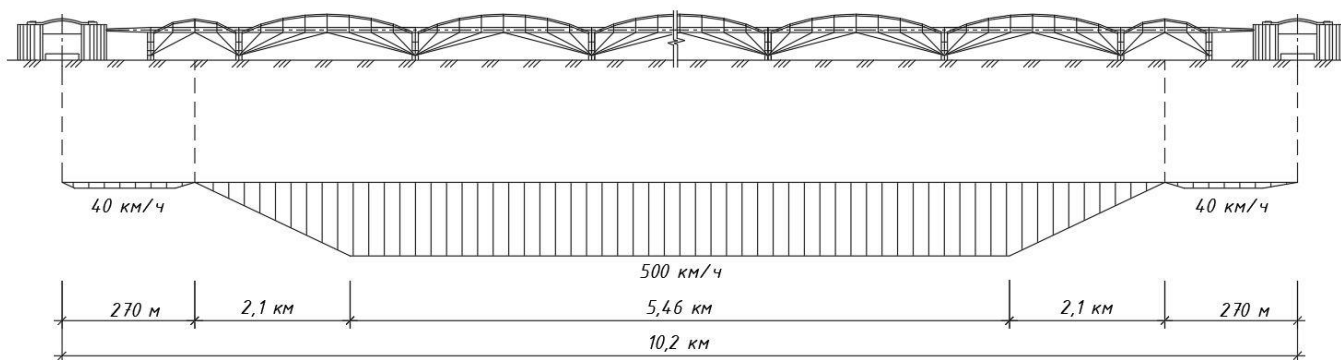


Рис. 3. Конструктивно-технологическая система участка магистрали «ТПУ Стрельна – ТПУ Петергоф» с графиком скоростей

Расчетная продолжительность этапа № 1 (посадка пассажиров в вагоны состава на платформе ТПУ на станции отправления и его перемещение в зону стоянки в транспортной трубе) назначена равной 0,5 мин (30 с), как и продолжительность следующего этапа № 2 (откачка воздуха до требуемого давления в транспортной трубе) – 0,5 мин (30 с) и разгон – 0,5 мин (30 с). Аналогично назначены условия для второго ТПУ (станция прибытия): торможение – 0,5 мин (30 с), восстановление атмосферного давления в трубе – 0,5 мин (30 с), въезд на платформу в ТПУ

и высадка пассажиров – 0,5 мин (30 с). Следовательно, всего по двум этапам на перегон: $T=3$ мин (180 с). Соответствующие условия для скоростного варианта заданы при движении с максимальной скоростью $V_{max}=100$ км/ч; здесь всего на перегон: $T=4$ мин (240 с). В связи со значительным расходом времени на стоянку, разгон и торможение пассажирских составов на коротких участках длиной менее 7 км, доходящего до 95 % от общей продолжительности поездки (табл.1), Схема № 1 была оптимизирована (некоторые ТПУ и самые короткие участки исключены) и преобразована в Схему № 2 (Рис. 4).

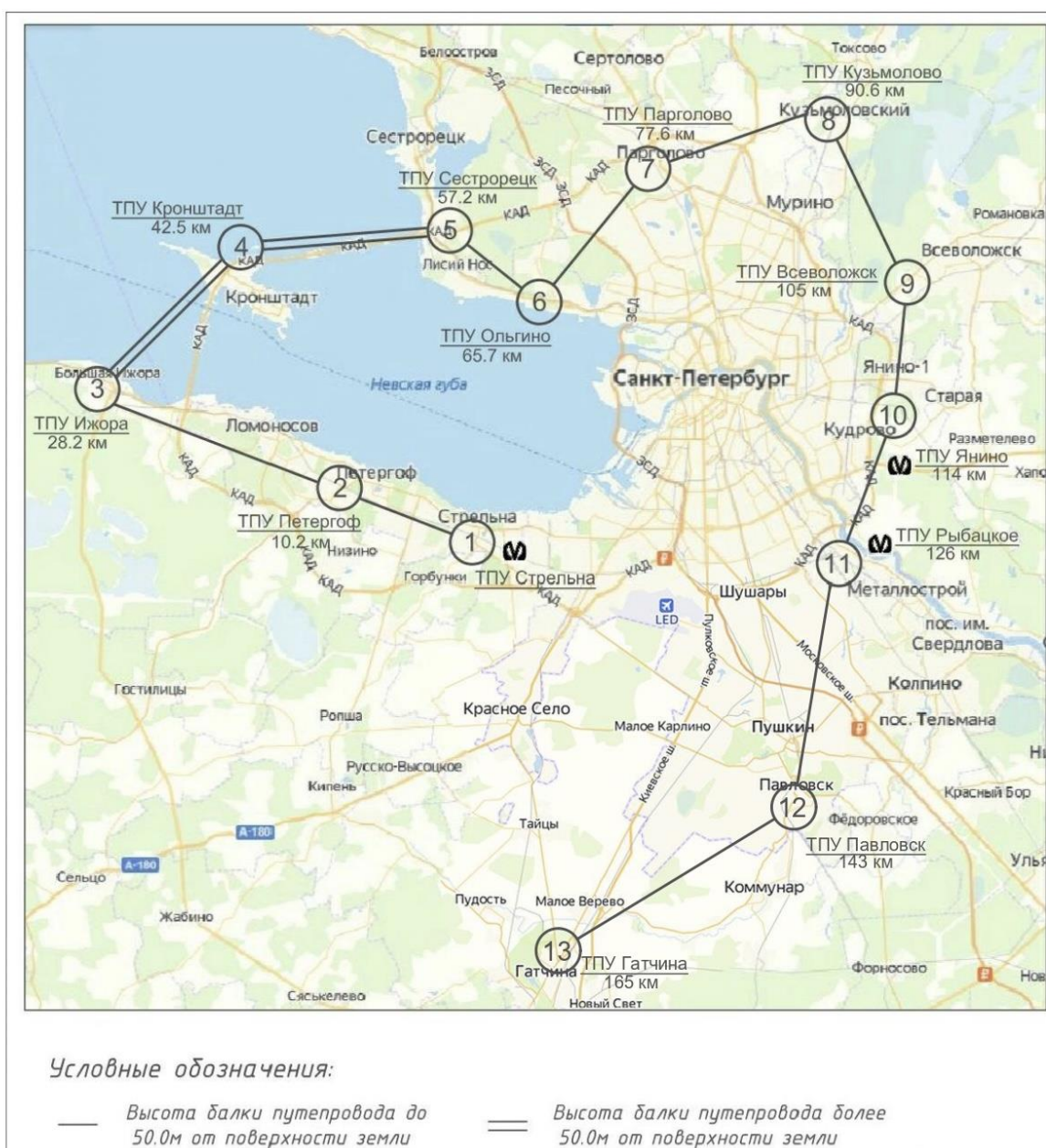


Рис. 4. Улучшенная схема высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге (Схема № 2)

Таблица 1. Продолжительность проезда в ВСТМ для двух вариантов Схем и скорости

N	Название станции (ТПУ)	Расстояние между ТПУ (перегон), км		Время проезда при $V_{\max} = 500$ км/ч, мин		Время проезда при $V_{\max} = 100$ км/ч, мин	
		Схема 1	Схема 2	Схема 1	Схема 2	Схема 1	Схема 2
1	Стрельна						
		10,2	10,2	3,65	3,65	9,12	9,12
2	Петергоф						
		6,9	-	3,25	-	7,14	-
3	Ломоносов						
		11,1	18,0	3,76	4,58	9,66	13,79
4	Ижора						
		14,3	14,3	4,21	4,21	11,58	11,58
5	Кронштадт						
		14,7	14,7	4,19	4,19	11,82	11,82
6	Сестрорецк						
		8,5	8,5	3,44	3,44	8,10	8,10
7	Ольгино						
		11,9	11,9	3,92	3,92	10,14	10,14
8	Паргалово						
		6,8	-	3,14	-	7,08	-
9	Сертолово						
		13,9	13,0	4,09	3,98	11,34	10,80
10	Кузьмолово						
		6,7	-	3,14	-	7,02	-
11	Девяткино						
		10,0	14,4	3,62	4,15	9,00	11,64
12	Всеволожск						
		9,0	9,0	3,59	3,50	8,82	8,40
13	Янино (5-й км)						
		12,0	12,0	3,86	3,86	10,20	10,20
14	Рыбацкое						
		11,0	17,0	3,74	4,46	9,60	13,20
15	Пушкин (Детскосельская)						
		19,0	-	4,70	-	14,40	-
16	Красное Село						
		17,0	-	4,46	-	13,20	-
17	Павловск						
		-	22,0	-	5,14	-	16,21
18	Гатчина (Татьянино)						
		-					
	Всего, мин	183,0	165,0	60,76	49,08	158,22	135,00
	Всего, час			1,01	0,82	2,64	2,25

Схема № 2 отличается сокращенным количеством станций ТПУ (13 вместо 17), сниженной на 18 км общей протяженностью и выросшей на 20 % средней длиной перегона, что существенно повышает эффективность высокоскоростного транспорта и сокращает продолжительность поездок. На основе вышеуказанных условий в Табл. 1 представлены результаты вычислений продолжительности проезда на перегонах магистрали для двух схем (Схема № 1 и Схема № 2) и двух вариантов с разными значениями максимальной скорости V_{max} .

Из Табл. 1 следует, что продолжительность проезда существенно зависит от скорости движения поезда в трубе, так максимальная продолжительность проезда между ТПУ в Схеме №2 не превышает привычных в метрополитене 5 мин для высокоскоростного варианта ($V_{max}=500$ км/ч) и привычных для пригородных электропоездов 15 мин – для скоростного ($V_{max}=100$ км/ч), при этом средняя скорость для высокоскоростного варианта в Схеме № 2 составляет 201,2 км/ч, а для скоростного варианта – 73,3 км/ч.

Здесь предельное значение ускорения (замедления) принято не превышающим 50 % (0,5 g) от ускорения свободного падения g , что является допустимым для пассажирского транспорта. Известно, что автомобили многих европейских брендов имеют модификации с временем разгона не более 6 с до скорости 100 км/ч с ускорением $a=4,63$ м/с².

Несомненно, предлагаемая Схема № 2 представляет предварительный вариант организации высокоскоростного пассажирского сообщения, но тем не менее она позволяет ориентировочно оценить его эффективность. Длина каждой транспортной прямой линии между станциями ВСТМ, размещаемыми в ТПУ, принята в интервале 8,5–22 км, что позволит высокоскоростному поезду «Роса» преодолевать каждый перегон всего за несколько минут. ВСТМ обеспечит высокоскоростное окружное перемещение пассажиров как с севера на юг, так и с запада на восток и обратно, минуя основные транспортные пути мегаполиса и проходя над высотной плотной застройкой. Например, продолжительность переезда от ТПУ «Гатчина» до ТПУ «Рыбацкое» со станцией метро «Рыбацкое», составит не более 10 мин, а от ТПУ «Рыбацкое» до ТПУ «Кронштадт», расположенных на схеме диаметрально, всего 27 мин.

Пассажирский состав назначен общей длиной 88 м из 8 вагонов – модулей с общей вместимостью 64 посадочных места и внешне подобен российскому скоростному «Сапсану», но поперечный размер выполнен более узким почти в 1,5 раза. Здесь обеспечен продольный проход с аварийными выходами в первом и последнем вагонах с двухрядной посадкой пассажиров. Цилиндрический транспортный модуль изготовлен на основе металлической трубы с продольным проходом и дверями «крылья чайки», поднимающиеся вверх при посадке – высадке.

Расчетное максимальное количество составов на каждом перегоне на одном пути назначается равным 4 единицам: 3 – в путепроводе (один – на скоростной части и два – в зонах стоянки) и один состав – на платформе в здании ТПУ. Следовательно, общее количество рабочих составов на одном пути ВСТМ составит 48 единицы, не считая резервные, находящиеся на станциях ТПУ с депо.

Расчетный объем пассажироперевозок за сутки для двухпутной высокоскоростной и двухпутной скоростной магистралей составит 208 тыс. пассажиров, а в год – 76 млн пассажиров, который вполне сопоставим с данным показателем для двухпутной линии петербургского метрополитена.

АРХИТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗДАНИЙ ТПУ

Многоэтажные ТПУ, объединяемые с объектами социальной, сервисной и торгово-развлекательной инфраструктуры, представляют собой архитектурные высотные доминанты в районах мегаполиса как многофункциональные узлы. Такие ТПУ, в частности, рассматриваемые в настоящей статье, по определению следует отнести к транспортно-пересадочным комплексам (ТПК), обеспечивающим более высокий уровень комфорта и транспортного обслуживания пассажиров [14].

Для построения устойчивой функционально-типологической модели многофункционального узла необходимо систематизировать функциональные блоки. Основными функциональными блоками являются станции (остановки), представляющие различные виды транспорта.

С учетом моделирования оптимальных технологических связей выявленные типологические модели транспортного узла с точки зрения функционально-пространственных характеристик включают следующие варианты: ориентированные специализированные модели (например, центрическая), линейные модели, модель моста, комплексно-разделенная модель, открытая модель [15].

Центрическая функционально-типологическая модель транспортного HUB (пространственная и плоскостная), сочетающая разные функции, представляется весьма успешной для построения HUB с подключением станции метрополитена «Стрельна», (например, ТПУ «Стрельна»), которую планируется подвести в 2035 году (Рис. 5).

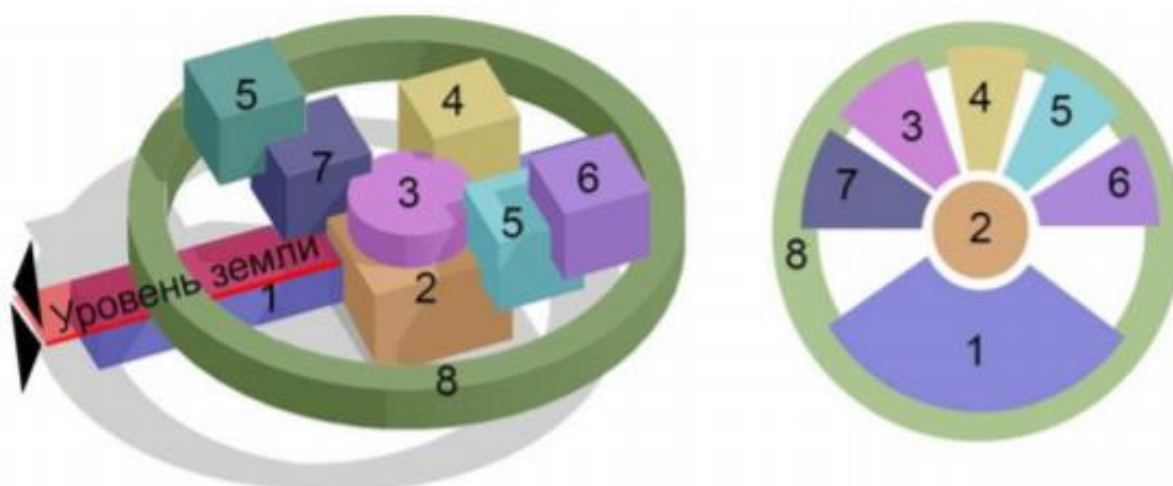


Рис. 5. Центрическая функционально-типологическая модель транспортного HUB (пространственная и плоскостная), сочетающая разные функции под номерами [15]

Центрическая модель интермодального транспортного узла представляется наиболее компактной и приемлемой. Центральное место в ней занимает коммуникативный блок (единица). Пространство атриума выступает в этой схеме прототипом коммуникативной единицы, что позволяет сочетать различные функции не только на одном уровне, но и с вертикальным разделением. Атриум определяет своеобразное ядро этой модели транспортно-пересадочного узла, вокруг которого формируются другие функции. Данная модель обеспечивает связь между собой всех функциональных блоков, которые в представленной модели эквивалентны по типу связи друг с другом. В этой схеме зеленая зона окружает все остальные функциональные блоки, что делает модель экологически чистой и приемлемой для человека. Доступ к зеленой зоне осуществляется таким же образом из всех функциональных блоков.

При анализе территории предполагаемой застройки, определена площадка для размещения ТПУ «Ижора», предполагающая функциональное объединение существующей железнодорожной станции и проектируемого здания. Здание имеет два функциональных блока: транспортно-пересадочный узел и здание депо, а конструктивная система ТПУ проектируется из стальных конструкций каркасно-ствольной с железобетонными поясами жесткости, с рамно-связевой конструктивной схемой (Рис. 6). Объемная модель транспортных путей, которые решают вопрос перемещения поездов с разных отметок, представлена на Рис. 7.

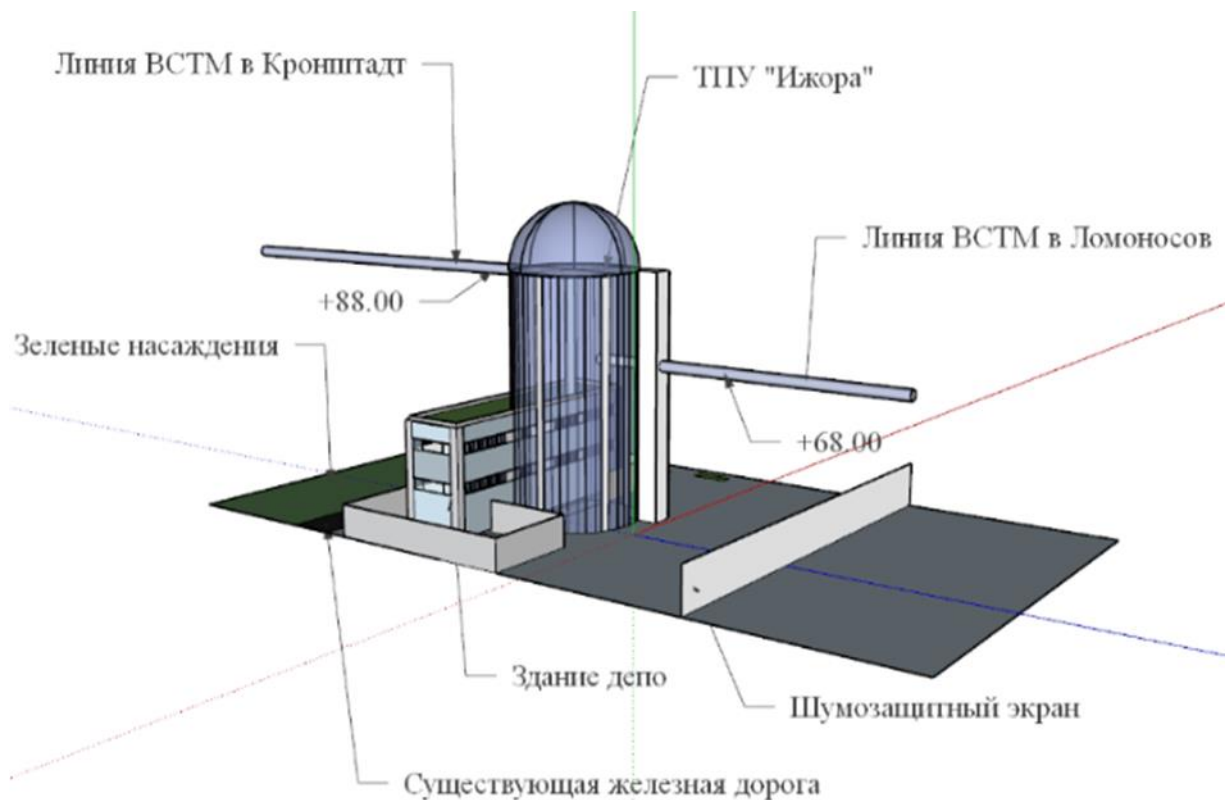


Рис. 6. Конструктивная схема ТПУ «Ижора» с зоной перехода поездов на другие отметки

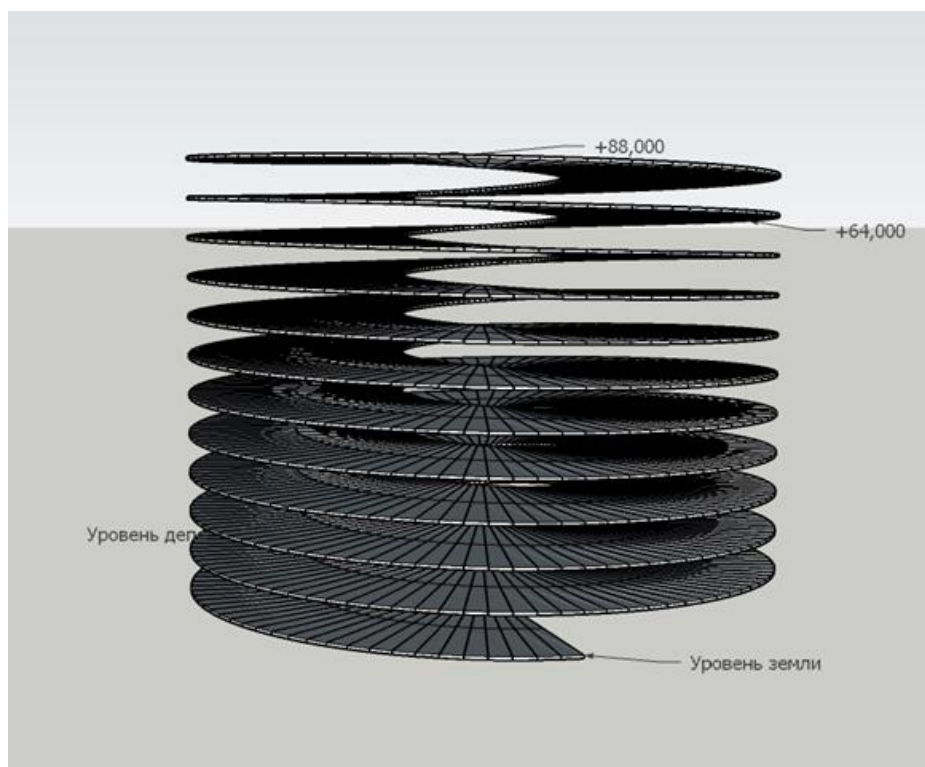


Рис. 7. Спиралевидный пандус ТПУ в зоне перехода поездов на другие отметки

Перемещение транспорта осуществляется посредством наклонных во внутреннюю сторону спиралевидных пандусов с механизмами регулирования движения. Пандусы выполнены из спирально закрученных стальных балок, соединенных площадками (плитами).

В здании ТПУ Ижора предусматривается применение диспетчерской централизации и возможность включения в автоматизированную систему управления высокоскоростным железнодорожным транспортом.

ГЛАВНАЯ БАЛКА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

В царской России первенство в данном исследовании принадлежит профессору Борису Павловичу Вейнбергу, который 31 марта 1914 года в Санкт-Петербурге представил публичный доклад «Движение без трения» по результатам научной работы в Томском университете. На этой основе были сформулированы основные принципы организации движения пассажирского вагона внутри стальной или стеклянной вакуумированной трубы посредством внутреннего и внешнего электромагнитного полей [16]. Из отечественных изобретателей, предложивших наибольшее количество оригинальных технических решений на уровне патентов с вышеуказанными новшествами в начале XXI века, первое место несомненно принадлежит ветерану изобретателю Н.Р. Янсуфину [17]. Однако, наиболее полные и совершенные технические решения, приемлемые для реального технического внедрения, были запатентованы американским изобретателем Daryl G. Oster в 1999 году [18]. В настоящей истории эти предложения составили техническую основу для разработки вакуумной транспортной технологии с линейным электродвигателем в Китае [5] и США [19].

В течение ряда лет в России совместно с исследователями ряда зарубежных стран проводятся исследования по теме высокоскоростного движения и разработке технологии Maglev, которые проводятся учеными ряда научно-исследовательских организаций и высшей школы, прежде всего, в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I под руководством проф. А.А. Зайцева [4]. Большое внимание исследователями уделено разработке отечественной версии транспортной системы Hyperloop [20, 21].

Результаты недавних исследований по разработке отечественной системы Hyperloop, показали, что при такой высокой скорости движения на создание вакуума тратится больше энергии, нежели на преодоление сил аэросопротивления в разреженном воздухе [21].

В настоящей статье предлагается авторское техническое решение, которое характеризуется повышенной изгибной жесткостью главной балки путепровода, которая выполнена из 4-х объединенных стальных труб

большого диаметра 3,0 м с толщиной стенки 16–30 мм в виде ромба с большей диагональю по вертикали. Между трубами в центре сечения по длине балки расположена продольная коробчатая конструкция с проходом для обслуживания коммуникаций связи, управления и электроснабжения, регулировки предварительного напряжения балки (Рис. 7).

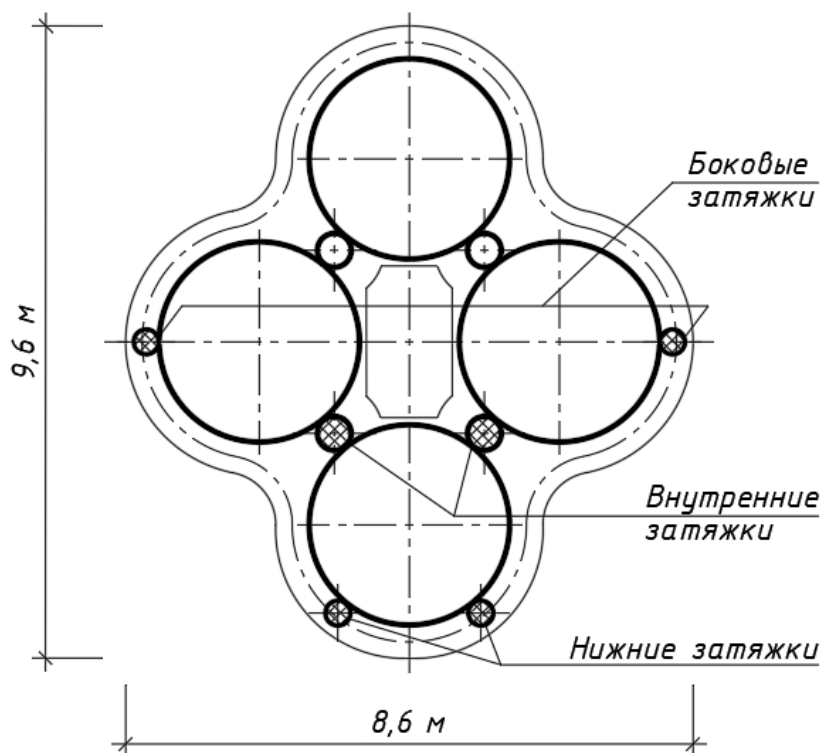


Рис. 8. Поперечное сечение главной балки с предварительно-напряженными элементами

В каждой трубе главной балки устроена рельсовая колея шириной 1520 мм на всём протяжении пути, как на стоянках, в зонах разгона и торможения, так на основных высокоскоростных участках с целью безопасности, например, при отключении электропитания и потере пониженного давления внутри трубы.

С целью снижения усилий в балке путепровода рассмотрены новые возможности применения элементов предварительного напряжения (ПН), размещаемые в главной балке-путепроводе (Рис. 8). Вантовые элементы конструкции разделены на две основные группы, различающиеся внешним и внутренним ПН [22–23].

К внешним элементам отнесены оттяжки и подвески, выполняющие роль стабилизации системы и передачу нагрузок с балки на другие несущие конструкции, а к внутренним – затяжки, регулирующие усилия и деформации и расположенные вдоль балки путепровода (Рис. 8).

Расчёты выполнены для вариантов схемы как без установки затяжек, так и с их установкой внизу балки путепровода (нижние затяжки) с усилиями ПН N_0 от 1 до 5 МН (Табл. 2). При этом рассмотрены комбинации нагрузок от воздействий природного и технологического характера: собственного веса конструкций ($L1$), снегового нагружения ($L2$), ветровой нагрузки ($L3$), воздействий от движения поезда ($L4$), а также воздействия от сил предварительного напряжения затяжек ($L5$).

Таблица 2. Усилия и прогибы посередине балки

№ n/n	Расчётные комбинации нагрузок	Нижние затяжки	Балка-путепровод		
		ПН №, МН	Изгиб. момент M, МН·м	Продол. усилие N, МН	Вертикальное перемещение Z, мм
1	$L5$	-	-50,83	1,97	569,75
2	$L1+L5$		-19,55	0,94	175,69
3	$L1+0,7L2+0,9L3+L4+L5$		91,59	11,68	-235,62
4	$L1+L2+0,7L3+0,9L4+L5$		80,45	10,92	-186,71
5	$L5$	1,0	-53,91	0,52	642,02
6	$L1+L5$		-24,79	-0,52	255,12
7	$L1+0,7L2+0,9L3+L4+L5$		84,58	10,18	-155,58
8	$L1+L2+0,7L3+0,9L4+L5$		73,62	9,43	-106,95
9	$L5$	3,0	-60,11	-2,32	787,04
10	$L1+L5$		-30,84	-3,40	399,54
11	$L1+0,7L2+0,9L3+L4+L5$		78,83	7,18	-12,65
12	$L1+L2+0,7L3+0,9L4+L5$		67,83	6,45	37,04
13	$L5$	5,0	-66,34	-5,11	932,54
14	$L1+L5$		-36,93	-6,23	544,45
15	$L1+0,7L2+0,9L3+L4+L5$		73,02	4,28	131,57
16	$L1+L2+0,7L3+0,9L4+L5$		61,98	3,56	180,63

Полученные результаты для сечения в середине пролета балки путепровода показывают возможность понижения изгибающего момента, продольной силы и перемещений в вертикальной плоскости при создании предварительного напряжения затяжек балки путепровода, что обеспечивает возможность регулирования усилий в основных элементах арочно-вантовой системы в процессе эксплуатации и тем самым существенно снизить металлоемкость проектируемой конструкции.

В связи с отсутствием специальных технических условий на проектирование сооружений для высокоскоростного транспорта предельное значение для прогиба целесообразно назначить равным $1/600$ от главного пролета L , как нормируется в нормах по проектированию

мостов [24], что дает предельную деформацию или прогиб $f_u = 600$ мм при $L = 360$ м для ВСТМ в рабочем состоянии [3].

Таким образом, приемлемым будет создание ПН нижних затяжек с усилием до 5,0 МН на стадиях ($L5$ – главной сборка балки из секций) и ($L1+L5$ – установка балки в рабочее состояние на проектную отметку). В связи с симметричным сечением целесообразно выровнять по модулю численные значения изгибающих моментов для верхней и нижней точек поперечного сечения балки, что почти получилось с усилиями ПН $N_0 = 5$ МН (Табл. 2). При этом, благодаря ПН, максимальный момент 91,59 МНм в балке снизился до 73,02 МНм (на 20,3 %), что подтверждает высокую эффективность ПН. Однако возникает необходимость контроля и регулировки уровня ПН в процессе эксплуатации ВСТМ.

РАСЧЕТЫ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКОГО УЧАСТКА

Для морского участка магистрали, составленного двумя прямыми перегонами между ТПУ «Ижора» – ТПУ «Кронштадт», ТПУ «Кронштадт» – ТПУ «Сестрорецк», характерны максимальные нагрузки, усилия и наибольшие длины колонн на ВСТМ (Рис. 9). Потому, в расчете, помимо типичных нагрузок, учитываемых в наземных частях магистрали, в расчетной схеме будут участвовать ударные нагрузки от навала судов [25], толщи льда и т.д. Предварительно принято решение о прохождении транспортной магистрали над акваторией Финского залива, с длиной участка, кратной пролету 180 м, и спроектировать ВСТМ, чтобы не препятствовать путям прохождения корабельных фарватеров (основной фарватер № 2 на западном участке шириной 156 м и фарватер № 13 на северном шириной 80 м), без «наезда» на дамбу и КАД. Магистраль имеет основной уровень рельсового пути для надземного и надводного опорного базиса, принятый по Балтийской системе высот на отметке +88,00 м. Надземная часть конструкции так же представлена в виде арочно-вантовой многопролетной системы из арок пролетом $L=360$ м и $L=180$ м (в крайних пролетах) и высотой более 100 м, поэтому относится к категории высотных и большепролетных сооружений.

Для определения длин колонн магистрали, расположенных непосредственно в водах залива, использованы карты глубин Финского Залива, по которым построены продольные профили магистрали с учетом рельефа местности (Рис. 9).

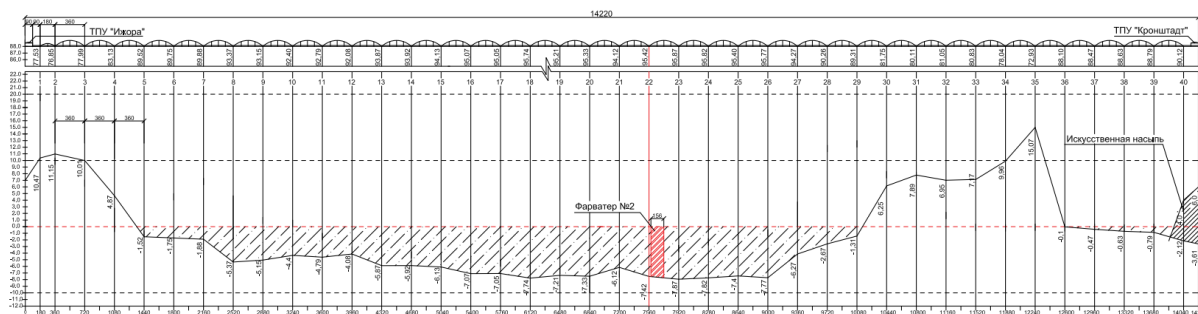


Рис. 9. Продольный профиль магистрали на участке
ТПУ Ижора – ТПУ Кронштадт

Например, колонна, расположенная вблизи прохождения фарватера, будет иметь максимальную длину 96,0 м, включая подводную часть (без учета глубины заложения свайных фундаментов). Для данного пролета с фарватером № 2 выполнен статический расчет и подбор сечений на действующие нагрузки с учётом предварительного натяжения оттяжек и подвесок, а также с учётом максимальных амплитуд резонансных колебаний систем от динамической составляющей ветровой нагрузки, включая учёт нелинейности, что предусмотрено программным пакетом SCAD.

По результатам расчета, были получены численные значения внутренних усилий и перемещений в элементах магистрали (Рис. 10), прежде всего в главной балке (Табл. 3).

Далее, по полученным значениям усилий и прогибов были подобраны сечения элементов конструкции. В результате в качестве основных несущих элементов были приняты стальные трубы большого диаметра из стали С345. Так главная транспортная балка составлена из четырех труб диаметром 3,0 м с толщиной стенки 16 мм. Колонна и ригели, образующие несущую раму выполнены из стальных труб наружным диаметром 3,8 м с толщиной стенки 25 мм, при этом вертикальные элементы выполнены трубобетонными. Элементы арки запроектированы из труб того же диаметра 3,8 м с толщиной стенки 40 мм. Пилоны запроектированы в виде рамной системы, стойки которой представлены трубобетонными элементами, являющимися продолжением свайной подземной части конструкции. Для сопряжения частей и секций применены болтовые соединения на высокопрочных болтах.

Таким образом, разработаны основные несущие строительные конструкции, обеспечивающие функционирование, требуемую надежность и безопасность ВСТМ.

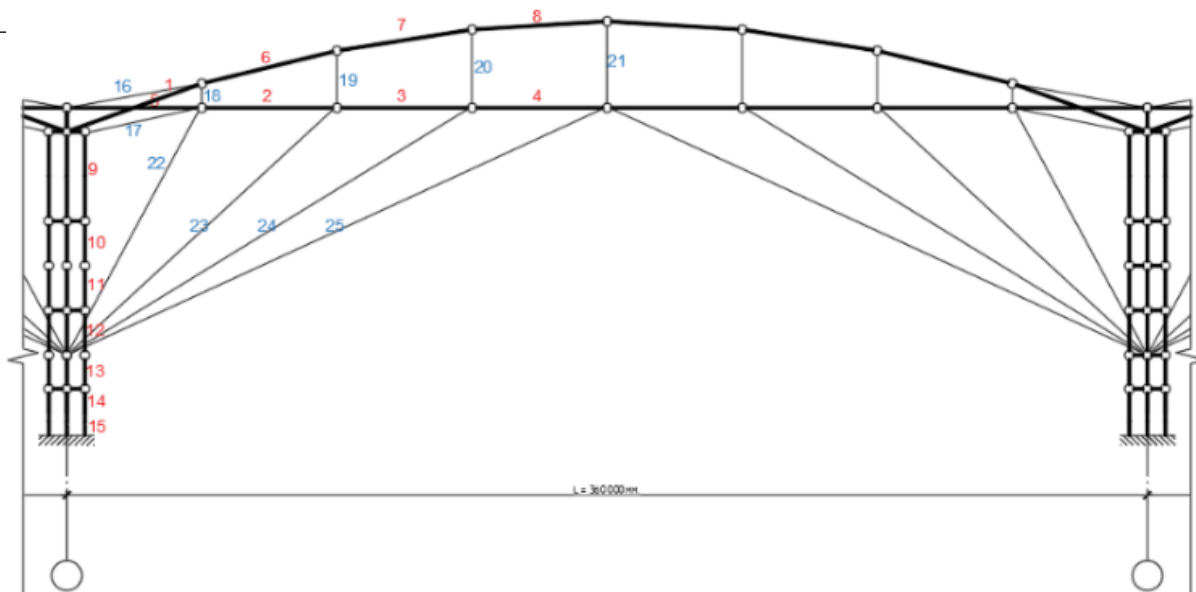


Рис. 10. Номера элементов расчетной схемы

Таблица 3. Расчетные усилия в элементах расчетной схемы

№ эл-та	N_i , кН	M_i , кНм
1	-46905,1	-48510,6
2	6950,118	-81629,2
3	7887,439	102999
4	9994,855	129767,3
5	6550,059	-127337
6	-45659,3	-48551,8
7	-44229,7	30715,04
8	-45821,3	31057,04
9	-20706,8	-9265,37
10	-20557,6	-3235,43
11	-22352,1	-3515,69
12	-22215,4	6652,97
13	-23667,6	-4357,59
14	-23969,2	12849,27
15	-20635,5	13097,92
16	1909,339	-
17	1372,681	-
18	5934,48	-
19	5008,292	-
20	5201,706	-
21	5172,264	-
22	1121,762	-
23	1082,73	-
24	1076,467	-
25	1088,211	-

В качестве вантовых конструкций приняты оцинкованные канаты маркировочной группы 1670 МПа, диаметром 120 мм, выполняющие роль подвесок и поддерживающих главную балку, канаты диаметром 70 мм, для связей и передачи усилий на балку, а также канаты диаметром 60 мм и площадью сечения, выполняющие роль ветровых оттяжек - вант.

Ориентировочный расход на все стальные элементы большого пролета 360 м, включая колонну-пилон, составил 7714,8 т или 21,43 т на пог. м длины магистрали.

На следующем этапе разработок по данной теме планируется выполнить технический проект по следующим участкам ВСТМ: ТПУ «Гатчина» - ТПУ «Рыбацкое» и ТПУ «Стрельна» - ТПУ «Ижора».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлены результаты инициативных студенческих научных разработок СПбГАСУ по теме «Инновационные предложения по созданию высокоскоростной транспортной системы Санкт-Петербурга», а именно: модернизация схемы прокладки транспортной магистрали; архитектурная компоновка зданий транспортно-пересадочных узлов; исследование предварительно-напряжения затяжек и вант на снижение основных усилий и деформаций элементов; расчеты конструкций наиболее высокого и нагруженного морского участка. На данном этапе разработок предложена новая эффективная схема высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге, отличающаяся формой в виде разомкнутого многоугольника с транспортно-пересадочными узлами в углах.

2. Данное предпроектное предложение высокоскоростной транспортной системы, устраиваемой на границах связи Санкт-Петербурга и Ленинградской области, позволит обеспечить эффективную транспортную связь мегаполиса с агломерациями Ленинградской области, обеспечивая для высокоскоростной магистрали расчетный объем пассажироперевозок в сутки, сопоставимым с данным показателем для линии метрополитена.

3. Указанная высокоскоростная транспортная магистраль является весьма актуальным транспортным объектом для Санкт-Петербурга и Ленинградской области; как ожидается, она должна обеспечить высокоскоростное окружное перемещение пассажиров как с севера на юг, так и с запада на восток и обратно, минуя основные транспортные пути мегаполиса, преодолевая естественные и искусственные преграды и проходя над высотной плотной застройкой. Так продолжительность проезда от ТПУ «Рыбацкое» до ТПУ «Кронштадт», расположенных на схеме диаметрально, составит всего полчаса.

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. Комитет по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга. «Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга». [Komitet po razvitiyu transportnoj infrastruktury Sankt-Peterburga. "Konceptsiya razvitiya transportnoj sistemy Sankt-Peterburga" (In Russ)]. Доступно по: <https://krti.gov.spb.ru/dorozhnyj-kompleks/konceptsiya-razvitiya-transportnoj-sistemy-sankt-peterburga/>. Ссылка активна на: 20.07.2019.
2. Город без автомобилей // Наука и жизнь. – 2019. – № 7. – С. 48–49. [Gorod bez avtomobilej. *Nauka i zhizn'*. 2019;(7):48-49. (In Russ.)].
3. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Харитонов К.Е. и др. К вопросу о создании высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 25–47. [Senkin NA, Filimonov AS, Kharitonov KE, et al. On the Creation of a High-Speed Transport Highway in St. Petersburg. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):73-95. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20195425-47.
4. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA *Magnitolevitatsionnaja transportnaja tekhnologija*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. ISBN 978-5-9221-1540-7 (In Russ.)].
5. Зайцев А.А. Инновации как способ решения глобальных задач // РЖД-Партнер. – 2018. – № 13–14. – С. 35. [Zaitsev AA *Innovacii kak sposob reshenia globalnykh zadach* // RZD-PARTNER. 2018;13-14:35. (In Russ.)].
6. Федорова М.В. Скоростной городской транспорт для современной агломерации // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 26–36. [Fedorova MV. Speed urban transport for modern agglomeration. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(1):26-36. (In Russ., in Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20151126-36.
7. Лаппо Г.М. Города России. Взгляд географа. – М.: Новый хронограф, 2012. – 504 с. [Lappo GM. *Goroda Rossii. Vzglyad geografa*. Moscow: Novyj hronograf; 2012. 504 p. (In Russ.)].
8. Меркулова М.В. Многофункциональный транспортно-пересадочный узел, включающий высоко- и сверхскоростные магистрали / Актуальные проблемы строительства. Материалы 70-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2017. – С. 244–248. [Merkulova MV. *Mnogofunkcional'nyj transportno-peresadochnyj uzel, vključayushchij vysoko- i sverhskorostnye magistrali*. In "Aktual'nye problemy stroitel'stva" Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konf. studentov, aspirantov i molodyh učenyh. St. Petersburg: GASU; 2017. pp. 244-248 (In Russ.)].
9. Медведев Н.Е. Варианты конструктивных решений надземных сооружений высоко- и сверхскоростной транспортной систем / Актуальные проблемы строительства. Материалы 70-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд.

- архитектурно-строительного ун-та. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2017. – С. 240–244. [Medvedev NE. Varianty konstruktivnyh reshenij nadzemnyh sooruzhenij vysokoi sverhskorostnoj transportnoj system. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh St-Petersburg: GASU, 2017. pp. 240-244 (In Russ.)].
10. Бондарева Е.О. Городской многофункциональный транспортно-пересадочный узел, включающий высокоскоростную магистраль / Актуальные проблемы строительства. Материалы 70-й Всероссийской научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Санкт-Петербургского госуд. архитектурно-строительного ун-та. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2017.– С. 207-211. [Bondareva EO. Gorodskoj mnogofunktional'nyj transportno-peresadochnyj uzел, vkluychayushchij vysokoskorostnuyu magistral'. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 70-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. St.Petersburg: GASU; 2017. Pp. 207-211 (In Russ.)].
 11. Якуненкова М.С. Транспортный хаб как тип общественного комплекса. Функциональные элементы транспортного хаба / Архитектура – строительство – транспорт: материалы 72-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Ч.1. СПбГАСУ. – СПб, 2019. – С. 185–189. [Yakunenкова MS. Transportnyj hab kak tip obshchestvennogo kompleksa. Funkcional'nye elementy transportnogo haba. In “Aktual'nye problemy stroitel'stva” Materialy 72-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. St. Petersburg: GASU; 2019. pp. 185-189 (In Russ.)].
 12. Талашкин Г.Н. Особенности проектирования и строительства Маглев-дорог для грузовых перевозок // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 2. – С. 53–56. [Talashkin GN. Features of design and construction Maglev-road to freight. *Transportation systems and technology*. 2016;2(2):53-56. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20162253-56
 13. Федеральные авиационные правила «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов». [Federal'nye aviacionnye pravila ot 25 avgusta 2015 goda N 262 “Trebovaniya, prediavlaemye k aerodromam, prednaznachennym dla vzleta, posadki, ruleniya i stoyanki grazdanskikh vozdyshnykh sudov”. (In Russ.)]. Доступно по: <https://standartgost.ru/g/pkey-14293759144>. Ссылка активна на: 13.11.2020.
 14. Вакуленко С.П., Евреенова Н.Ю. Техническое оснащение и технология работы транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта: Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2015. – 195 с. [Vakulenko SP, Evreenova NYu. Tekhnicheskoe osnashchenie i tekhnologiya raboty transportno-peresadochnyh uzlov, formiruemyh s uchastiem zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnoe posobie. Moscow: МИИТ; 2015. 195 p. (In Russ.)].
 15. Безверхая Е.П., Скопинцев А.В. Функционально-типологические модели в архитектуре интермодальных транспортно-пересадочных узлов // Architecture and Modern Information Technologies. – 2019. – №3(48). – С. 135–147. [Bezverkhaya EP, Skopintsev AV. Functional-typological models in the architecture of intermodal transport interchange Hubs. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019;3(48):135-147. (In Russ.)]. Доступно по: https://marhi.ru/АМИТ/2019/PDF/10_bezverkhaya.pdf. Ссылка активна на: 13.11.2020.
 16. Вейнберг Б.П. Движение без трения. [Veinberg BP. *Dvizhenie bez treniya*. (In Russ.)]. Доступно по: http://veinberg.o7.ru/pdf/no_friction_motion.pdf/. Ссылка

- активна на 15.09.2019.
17. Патент РФ на изобретение RU2327586C2 / 27.06.2008. Бюл. №11. Янсуфин Н.Р. Сверхзвуковая транспортная система Янсуфина. [Pat. RUS № 2327586C2 / 27.06.2008. Вул. № 11. Yansufin NR. *Supersonic overland transport system Yansufina*. (In Russ.)]. Доступно по: <http://allpatents.ru/patent/2327586.html>. Ссылка активна на: 15.09.2019.
 18. Oster Daryl, inventor. *Evacuated tube transport*. United States patent US5950543 (A). 1999 Sept. 14. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5950543A/en>.
 19. Musk E. Hyperloop Alpha. Texas: SpaceX [cited 2019 July 28]. Available at: https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf.
 20. Terentyev YuA, Filimonov VV, Malinetskiy GG, et al. Russia Integrated Transit Transport System (ITTS) Basid on Vacuum Magnetic Levitation Transport (VMLT). *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):57-84. doi: 10.17816/transsyst201843s157-84
 21. Kim KK. The Russian Version of the Transport System “Hyperloop”. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):73-91. doi: 10.17816/transsyst20184273-91.
 22. Беленя Е.И., Стрелецкий Н.Н., Ведеников Г.С. и др. Металлические конструкции: Спецкурс. Учеб. пособие для вузов / Под общ. ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1982. – 472 с. [Belenya EI, Streleckij NN, Vedenikov GS, et al. *Metallicheskie konstrukcii: Speckurs. Ucheb. posobie dlya vuzov*. Belenya EI, edd. Moscow: Strojizdat, 1982. 472 p. (In Russ.)].
 23. Корнеев М.М. Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию. – Киев: ВИПОЛ, 2003. – 547 с. [Korneev MM. *Stal'nye mosty. Teoreticheskoe i prakticheskoe posobie po proektirovaniyu*. Kiev: VIPOL, 2003. 547 p. (In Russ.)].
 24. СП 35.13330.2012 Свод правил. Мосты и трубы. [SP 35.13330.2012 Svod pravil. Mosty i truby. (In Russ.)].
 25. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М. О живучести строительных конструкций морского участка высокоскоростной транспортной магистрали от навала судна // Восточно Европейский научный журнал. – Том 11. – № 63. – 2020. – С. 40–46. [Senkin NA, Filimonov AS, Khalimbekov IM. *Survivability of building structures of naval part of a high-speed transport highway from ship strike East European Scientific Journal*. 2020;11(63):40-46. (In Russ.)]. Доступно по: https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_11_63_november_2020_part_3-1.pdf Ссылка активна на: 28.02.2019.

Сведения об авторах:

Сенькин Николай Александрович, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 1344-9412; ORCID: 0000-0002-7086-1960

E-mail: senkin1952@yandex.ru

Филимонов Александр Сергеевич, Бакалавр;

eLibrary SPIN: 8184-8545; ORCID: 0000-0002-4817-3184

E-mail: Sanya328kms@yandex.ru

Халимбеков Ислам Мурадович, Бакалавр;

eLibrary SPIN: 6231-2848; ORCID: 0000-0001-9448-906X

E-mail: iislamm@yandex.ru

Кравец Анжелика Игоревна, Бакалавр;

eLibrary SPIN: 8648-4778; ORCID: 0000-0001-6099-7779

E-mail: anzhelika.kravec.98@mail.ru

Митровска Дона, Бакалавр;
ORCID: 0000-0003-4748-2257

E-mail: d.mitrovska@hotmail.com

Большихшапок Иван Сергеевич, Бакалавр;

ORCID: 0000-0001-6868-4312

E-mail: i.bshapok@yandex.ru

Information about authors:

Nikolai A. Senkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 1344-9412; ORCID: 0000-0002-7086-1960

E-mail: senkin1952@yandex.ru

Aleksandr S. Filimonov, Bachelor of Science;

eLibrary SPIN: 8184-8545; ORCID: 0000-0002-4817-3184

E-mail: Sanya328kms@yandex.ru

Islam M. Khalimbekov, Bachelor of Science;

eLibrary SPIN:6231-2848 ;ORCID: 0000-0001-9448-906X

E-mail: iislamm@yandex.ru

Angelica I. Kravets, Bachelor of Science;

eLibrary SPIN: 8648-4778; ORCID: 0000-0001-6099-7779

E-mail: anzhelika.kravec.98@mail.ru

Mitrovska Dona, Bachelor of Science;

ORCID: 0000-0003-4748-2257

E-mail: d.mitrovska@hotmail.com

Ivan S. Bolshikhshapok, Bachelor of Science;

ORCID: 0000-0001-6868-4312

E-mail: i.bshapok@yandex.ru

Цитировать:

Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М. и др. Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 99–123. doi 10.17816/transsyst20217199-123

To cite this article:

Senkin NA, Filimonov AS, Khalimbekov IM, et al. Proposals for the construction of overpass structures and transport hubs for the high-speed highway in St. Petersburg. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):99-123. doi 10.17816/transsyst20217199-123

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

DOI: 10.17816/transsyst202171124-138

УДК [UDC] 339.13

© Д. С. Бельницкий

Российский университет транспорта (МИИТ)

(Москва, Россия)

МОДЕЛЬ РЕЗУЛЬТАТИВНОГО РЫНКА И ТЕХНОЛОГИЯ ГРУЗОВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Обоснование: Процессы либерализации, попытка перехода железнодорожной отрасли на новую модель рынка (рынка свободной конкуренции) без соответствующих изменений составляющей модели, негативно сказываются на эффективности работы железнодорожной отрасли и на результативности рынка грузового железнодорожного сервиса.

В настоящей статье предлагается взглянуть на проблему не с позиций изменения формы собственности в отрасли и формирования рынка свободной конкуренции, а с позиции поиска равновесия технологии работы и применяемой модели рынка грузовых железнодорожных перевозок. Исследование основано на известной концепции Industrial organization. Автор рассматривает рынок как живой механизм, реагирующий на изменения его составляющих в рамках своего поля, не только как место совершения сделок. Результативность рынка грузовых железнодорожных перевозок во многом зависит от технологии создания грузового железнодорожного сервиса. Предлагается сформировать рыночную модель ориентируясь не на вид конкуренции, а на некоторую гармонию технологии грузового железнодорожного сервиса и рынка, точнее равновесия составляющих сервисного рынка.

Цель: определить модель результативного рынка грузовых железнодорожных перевозок, при котором железнодорожная отрасль сможет показать максимальную эффективность.

Методы: экспертная оценка попытки изменения модели рынка грузовых железнодорожных перевозок; анализ причины разбалансировки экономического механизма перевозочной деятельности в сфере грузовых железнодорожных перевозок; попытка структурировать цели результативного рынка грузовых железнодорожных перевозок.

Результаты: представлена авторская трактовка понятий: «Рынок грузовых железнодорожных перевозок», «Экономика грузовых железнодорожных перевозок», «Владелец процесса грузовых железнодорожных перевозок», «Участник процесса грузовых железнодорожных перевозок»; предложена модель результативного рынка грузовых железнодорожных перевозок, сформирован образ и цели результативного рынка грузового железнодорожного сервиса.

Выводы: по результатам исследования могут быть сформулированы рекомендации по формированию сбалансированной модели рынка грузовых железнодорожных перевозок и корректировке целей и существующей модели рынка.

Ключевые слова: результативный рынок грузовых железнодорожных перевозок, цели результативного рынка грузовых железнодорожных перевозок, модель рынка, владелец процесса, участник процесса, поле рынка.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© **D. S. Belnitsky**

Russian University of Transport (MIIT)
(Moscow, Russia)

MODEL OF EFFECTIVE MARKET AND TECHNOLOGY OF FREIGHT RAILWAY TRANSPORTATION

Background: Liberalization processes, an attempt of the railway industry to transition to a new market model (free competition market) without corresponding changes in the component of the model, negatively affect the efficiency of the railway industry and the efficiency of the freight railway service market.

This article proposes to look at the problem not from the standpoint of changing the form of ownership in the industry and the formation of a free competition market, but from the standpoint of finding an equilibrium between the technology of work and the applied model of the freight rail transport market. The research is based on the well-known Industrial organization concept. The author views the market as a living mechanism that responds to changes in its components within its own field, not only as a place for transactions. The efficiency of the freight rail transport market largely depends on the technology for creating a freight rail service. It is proposed to form a market model focusing not on the type of competition, but on a certain harmony of the technology of freight railway service and the market, or rather the balance of the components of the service market.

Aim: to define a model of an efficient rail freight market. in which the railway industry can show maximum efficiency.

Methods: expert assessment of attempt to change the model of the railway freight market; analysis of the reasons for the imbalance in the economic mechanism of transportation activities in the field of freight railway transportation; attempt to structure goals of an efficient railway freight market.

Results: the author's interpretation of the concepts is presented: "The market of freight rail transportation", "The economy of freight rail transportation", "The owner of the process of freight rail transportation", "Participant of the process of freight rail transportation"; a model is proposed, the image and goals of an effective freight railway service market are formed.

Conclusions: Based on the results of the study, recommendations can be formulated on the formation of a balanced model of the rail freight market and adjusting the goals and the existing market model.

Key words: efficient rail freight market, goals of an efficient rail freight market, market model, process owner, process participant, market field.

ВВЕДЕНИЕ

Экономические преобразования в России – либерализация, приватизация и децентрализация управления, осуществлялись в расчете на автоматическое регулирование рынка при исключении практически всякой

позитивной регулирующей роли государства сложных процессов изменения формы собственности, построении рыночного механизма специфики технологических процессов в различных отраслях экономики и распределения материальных благ. Изменения, проводимые железнодорожными реформаторами, не стали исключением. Железнодорожная отрасль пребывает в состоянии болезни, технология создания сервиса грузовых перевозок хотя и способна обеспечивать реализацию грузовых перевозок, но крайне неэффективна, что отражает транспортная составляющая в цене товаров, перевозимых железнодорожным транспортом. В настоящем исследовании предпринята попытка определить и предложить некоторые изменения в реализуемой сегодня модели рынка грузовых железнодорожных перевозок. В работе использованы фундаментальные труды: Tirole J., Scherer F.M., Ross D., Shepherd W.C., Львова Д.С., Третьяка В.П., Смехова А.А., Громова Н.Н., Персианова В.А., Миротина Л.Б. и др., исследования экспертов Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» и консалтинговой компании «Ernst & Young», а также собственный личный опыт работы на железнодорожном транспорте и в консалтинговой деятельности в области менеджмента и логистики.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МОДЕЛИ РЫНКА И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СЕРВИСА

Отраслевая организация экономики представляется и объясняется системным взаимодействием структуры, технологии, поведения и результатов. Взаимодействие и взаимосвязь этих подсистем во многом определяют результативность отрасли. Транспортная отрасль и железнодорожная подотрасль не являются исключением. Взаимодействуя с решением проблем экономического выбора и принятия решений в условиях неопределенности, многофакторности и многозадачности, теория и практика экономики отраслевых рынков позволяют рационально и адекватно трактовать проблемы развития отрасли, использовать технологические решения, определять стратегию развития и поведения организации для достижения лучших результатов, ориентировать и мотивировать персонал и т.д.

В нашей стране железнодорожный транспорт как известно являлся монополией, но в результате структурных изменений произошло распределение погрузочных ресурсов (вагонов), точнее, их передача в частное владение, вследствие чего технология, которая создавала сервис, удовлетворяющий потребности в перевозках грузов, стала терять эффективность. По сути, созданная в СССР технология работы железнодорожного транспорта утратила систему планирования

транспортного производства и эффективные технологии управления парком порожних универсальных вагонов: «шахматку» и «регулировку».

Управление перевозочным процессом сейчас децентрализовано, инструментария для управления перевозочным процессом, учитывающего эти изменения, не предложено и не создано, хотя необходимые ресурсы и возможности для этого были и пока остаются доступны. Речь идет о создании несколько измененной технологии перевозочного процесса, реализуемой посредством IT-решений, которая позволит управлять этим процессом в условиях децентрализации системы управления и перехода универсальных вагонов от одного владельца ко многим собственникам. Эта технология представляет собой динамическую модель планирования и реализации перевозочного процесса (некую «динамическую шахматку», на базе которой и реализуется планирование производственных ресурсов, обеспечивающих процесс грузовых железнодорожных перевозок) при участии владельца инфраструктуры, перевозчика, собственников грузовых железнодорожных вагонов и владельцев грузов (грузоотправителей и грузополучателей), в основе которой лежит та же «шахматка» и соответствие спроса на грузовые перевозки технико-технологическим возможностям владельца инфраструктуры, перевозчика и собственников погрузочных ресурсов.

В результате изменения модели рынка и отсутствия технологий, учитывающих эти изменения, вместо повышения эффективности перевозочной деятельности железнодорожного транспорта в части грузовых перевозок было достигнуто снижение ее эффективности, возникли затруднения в реализации технологического процесса перевозки грузов железнодорожным транспортом. Естественно, это отразилось на результативности рынка грузовых железнодорожных перевозок, как следствие, привело к росту транспортной составляющей в цене товаров, перевозимых с использованием железнодорожного транспорта. Сегодня можно констатировать, что применяемая в железнодорожной отрасли модель рынка не принесла ожидаемых результатов. В связи с этим возникают логичные вопросы, что послужило причиной неудачи? Нужно ли менять производственную и рыночную модели?

ПРОБЛЕМА ОТРАСЛЕВОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ РЕФОРМЫ

Организация перевозки грузов железнодорожным транспортом имеет некоторую специфику в отличие от других отраслей. Создаваемый при этом сервис представляет собой массовое обслуживание потребителей по одной единой технологии организации перевозочного процесса, кроме того, инфраструктура, тяга, погрузочные ресурсы и обеспечивающие подразделения являются неотъемлемой частью технологии производства

грузового железнодорожного сервиса, на рынке реализуется продукт этого производства. Рынок монополии соответствуют такой технологии производства. Крайне затруднительно на таких рынках реализовать функционал двух владельцев процессов или двух процессов в рамках одной технологии.

Проблема проводимой реформы, как мне представляется, состоит в некоем дисбалансе технологии производства сервиса и модели рынка. По сути, предпринята попытка встраивание модели рынка совершенной конкуренции в модель рынка естественной монополии при этом не изменяя технологию производства. Ситуацию усугубляет построение модели рынка грузовых железнодорожных перевозок вразрез с теорией отраслевых рыночных структур (Industrial organization) [1, 2, 3] и совершенно не учитывая специфику железнодорожной отрасли.

Определимся с некоторыми понятиями.

Экономика грузовых железнодорожных перевозок – механизм, приводящий организацию процесса грузовых железнодорожных перевозок в соответствие со спросом на грузовой железнодорожный сервис и спросом на перевозимые товары. Этот механизм представляет собой экономическую систему, цель которой состоит в решении классических и фундаментальных задач: какие сервисы создавать и в каком объеме; каким образом использовать ограниченные ресурсы железнодорожного транспорта на создание каждого предлагаемого на рынке сервиса, т.е. какую технологию использовать для достижения баланса спроса и предложения на рынке грузовых железнодорожных перевозок; как распределить результаты от экономической деятельности по организации перевозки грузов железнодорожным транспортом.

Рынок грузовых железнодорожных перевозок представляет собой поле, где реализуются экономические отношения между владельцами процесса железнодорожных перевозок (производителями транспортных услуг (прежде всего перевозчиками), владельцами транспортной инфраструктуры, владельцами подвижного состава) и потребителями транспортных услуг (грузовладельцами, грузоотправителями, грузополучателями, владельцами погрузочных ресурсов). Рынок грузовых железнодорожных перевозок – это балансирующий или разбалансирующий механизм грузового железнодорожного сервиса и спроса на грузовые железнодорожные перевозки.

Исследования экономики отраслевых рынков и, в частности, рынка грузоперевозок, основываются на попытках измерить большое число базисных (экзогенных) условий, прежде всего: технологии производства сервиса, предпочтения и поведение потребителя и т. д. Однако в настоящих условиях собрать репрезентативные данные и дать им однозначное толкование весьма затруднительно, а в большинстве случаев

и просто невозможно. Об этом Ф.М. Шерер и Д. Росс рассуждали в своей работе «Структура отраслевых рынков» [1]. С того времени мало что изменилось к лучшему.

Большой охват исследования и значительное количество показателей «размывают» его, не позволяя сфокусироваться на главной цели. Фокусируясь на цели очень важно определиться с границами исследования, в случае с железнодорожной отраслью, это границы рынка грузовых железнодорожных сервисов (прямые и интегрированные в модальные сервисы грузовые железнодорожные перевозки).

Несмотря на попытки изменения модели рынка, железнодорожным реформаторам не удалось ее изменить потому, что сама технология грузовых железнодорожных перевозок осталась не измененной, не было предложено ничего нового в технологии организации перевозочного процесса, а инвентарь (парк грузовых вагонов МПС) за небольшую часть от своей стоимости был передан частным собственникам для сдачи в аренду пользователю сервиса грузовых железнодорожных перевозок и «выброшен» из технологического процесса. В результате чего был реализован переход государственной собственности в частную, создан рынок погрузочных ресурсов и обеспечено увеличение транспортной составляющей.

Все это лишь осложнило управление перевозочным процессом на железнодорожном транспорте и естественно отразилось на результативности рынка этого сервиса. Индикаторы отразили эти изменения, цена на перевозку грузов железнодорожным транспортом с учетом всех затрат владельцев грузов зашагала вверх, погрузка на сети железных дорог плавно, но очень уверенно снижается. Следующий шаг реформ – увеличение железнодорожных тарифов на перевозку грузов и это в условиях переориентации бизнеса на рынок автомобильных перевозок.

Главное, в чем ошиблись реформаторы – они не учли степень корреляции между рынком и технологией. Второе, если предпринимается попытка изменения модели рынка, тогда меняется и технология производства сервиса, статус и взаимодействие его участников. Изменение формы собственности на железнодорожные погрузочные ресурсы не изменило модель рынка грузового железнодорожного сервиса, а лишь создало конкурентный рынок железнодорожных погрузочных ресурсов («сбоку» рынка грузовых железнодорожных перевозок), в данном случае, рынок грузовых железнодорожных вагонов как активов и рынок погрузочных ресурсов грузового железнодорожного транспорта. Кроме того, изменения (игры с моделью рынка) привели к появлению новых акторов и перераспределению доходов от перевозочной деятельности, основную долю которого получает не организатор перевозочного процесса, а владелец погрузочного ресурса, при этом практически не

участвуя в перевозочном процессе. К сожалению, повышению результативности рынка, а тем более эффективности процесса грузовых железнодорожных перевозок, это не способствует.

Сегодня экономика грузовых железнодорожных перевозок испытывает значительные трудности, связанные с изменением модели рынка грузовых железнодорожных перевозок, отсутствием отраслевых технологических решений, отражающих экономические изменения в отрасли и экономике РФ, несправедливым распределением доходов от перевозочной деятельности и предоставления погрузочных ресурсов. Что подтверждаю оценки экспертов и отчеты о состоянии железнодорожной отрасли [4]. Все это усугубляется инвестированием акторами иностранных экономик (включая непрофильные активы). При таком положении дел не следует ожидать от отраслевых предприятий эффективности, а от рынков – результативности.

ЦЕЛИ РЕЗУЛЬТАТИВНОГО РЫНКА ГРУЗОВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Как известно парадигма эффективных отраслевых рынков состоит из представлений об ожиданиях общества от производителей товаров и услуг, которая представляется как «структура – поведение – результативность». Применительно к рынку грузовых железнодорожных перевозок понятие результативности его функционирования многомерно, впрочем, как и для других отраслевых рынков. Правильное определение целей во многом определит эффективность модели отраслевого рынка.

Для рынка грузовых железнодорожных перевозок могут быть определены следующие цели:

1. В качестве главной цели следует определить достижение гармонии между пользователями грузовых железнодорожных сервисов и владельцем процесса грузовых железнодорожных перевозок (полагаю, что именно владельцем, так как российский и зарубежный опыт показал, что максимальная эффективность грузовых железнодорожных перевозок достигается в условиях рынка «естественной монополии»).

2. Конфигурация сервиса грузовых железнодорожных перевозок и объемов грузовых железнодорожных перевозок, при которой будет возможно соблюдение баланса расходования ресурсов и потребностей общества в грузовых железнодорожных перевозках.

3. Обеспечение гарантированного повышения качества грузовых железнодорожных перевозок (степени удовлетворенности пользователей железнодорожного грузового сервиса), при снижении общественных издержек и обеспечении устойчивого и долгосрочного роста доходов населения.

4. Владелец процесса грузовых железнодорожных перевозок обязан обеспечить снижение затрат на единицу транспортной продукции, не снижая качество сервиса, постоянно совершенствуя технологический процесс, применяя и используя новые технологии и технику, обеспечивая интеграцию с другими видами транспорта. Эффективное использование владельцем процесса грузовых железнодорожных перевозок собственных и ресурсов участников процесса грузовых железнодорожных перевозок, в том числе трудовых.

Владелец процесса грузовых железнодорожных перевозок – лицо, уполномоченное на организацию процесса железнодорожных грузовых перевозок, которое несет ответственность за эффективную и безопасную его реализацию, имеет в своем оперативном-тактическом распоряжении все необходимые ресурсы: персонал, инфраструктуру, программное и аппаратное обеспечение, информацию, технику и оборудование, весь подвижной состав дислоцированный на инфраструктуре и находящейся в его распоряжении (включая тяговый подвижной состав и грузовые железнодорожные вагоны), а также ресурсы участников железнодорожного транспортного производства.

Участник процесса грузовых железнодорожных перевозок – лицо, непосредственно участвующее в технологическом процессе перевозки грузов железнодорожным транспортом, которое предоставляет в оперативном-тактическом пользовании свои интеллектуальные и технологические ресурсы, IT-технику и оборудование, погрузочные ресурсы и др., несет ответственность за выполнение операций технологического процесса, которые обязался выполнять, имеет право на справедливое распределение.

5. Обеспечение справедливого распределения доходов от деятельности по перевозке грузов железнодорожным транспортом для обеспечения стабильности экономики отрасли и государства.

6. Интеграция грузовых транспортных сервисов в единую транспортную систему, реализующую свои транспортные технологии и сервисы в стране и мире.

7. Регулятор рынка должен обеспечить стабильное и устойчивое развитие экономики железнодорожной отрасли, контроль тарифов, справедливое распределение доходов от перевозочной деятельности и улучшение качества жизни членов общества, участвующих в организации процесса грузовых железнодорожных перевозок.

Для достижения настоящих целей важно выстроить взаимодействие участников процесса особым образом на основе политики консенсуса и построить модель рынка грузовых железнодорожных перевозок. На Рис. в соответствии со сформулированными целями представлена модель (образ) рынка грузовых железнодорожных перевозок.

МОДЕЛЬ РЕЗУЛЬТАТИВНОГО РЫНКА ГРУЗОВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Достижение цели построения модели рынка требует обращения к фундаментальным ценностям, применения новых технологических решений и измерителей степени достижения поставленных целей.

Понятно, что главная цель достижения гармонии между производителями и пользователями достигается только при условии минимальных сбоев работы рыночного механизма (технологии перевозочного процесса на железнодорожном транспорте).

Определение и понимание «образа рынка», отражающего эту гармонию, представлено на Рис. Это модель результативного рынка грузовых железнодорожных перевозок, в которой предпринята попытка определить структурные и технологические параметры, оказывающие существенное влияние на рынок грузовых железнодорожных перевозок.

Настоящая модель основывается на Гарвардской парадигме, однако имеет некоторые отличия, которые состоят в несколько измененной схеме классической Гарвардской парадигмы. Рынок представляется как поле, а эффективность взаимодействия достигается через консенсус. Кроме того, учтена специфика работы грузового железнодорожного транспорта в России, его инфраструктурная и технологическая модель.

Результативность рынка достигается посредством консенсуса составляющих рынка и баланса спроса и предложения на грузовой железнодорожный сервис, а также несколько иначе выстроенных взаимосвязей. Такая модель позволяет гармонизировать взаимодействие участников рынка и технологию производства сервиса.

Поле рынка – это четкие границы рынка (арена), позволяющие построить его модель, в рамках которой акторы выстраивают свое поведение, ориентируясь на позиции и власти каждого из них. Где общая цель всех участников рынка – не выдвинуть более слабых за пределы поля, а достичь такого положения каждого из участников, при котором станет возможна стабилизация рынка, позволяющая рынку выживать и развиваться её участникам в относительно долгосрочной перспективе.

Стабильность рынка достигается абсолютно понятными идентичностью и иерархией участников рынка (лидеров и аутсайдеров), где все они разделяют концепцию контроля, направляющую действия факторов.

Настоящая модель позволяет увидеть равновесное положение составляющих рынка и сбалансировать любую из них относительно остальных. Например, «встроить» компании-операторы в единый технологический процесс грузовых железнодорожных перевозок, где оператор будет полноценным элементом системы.

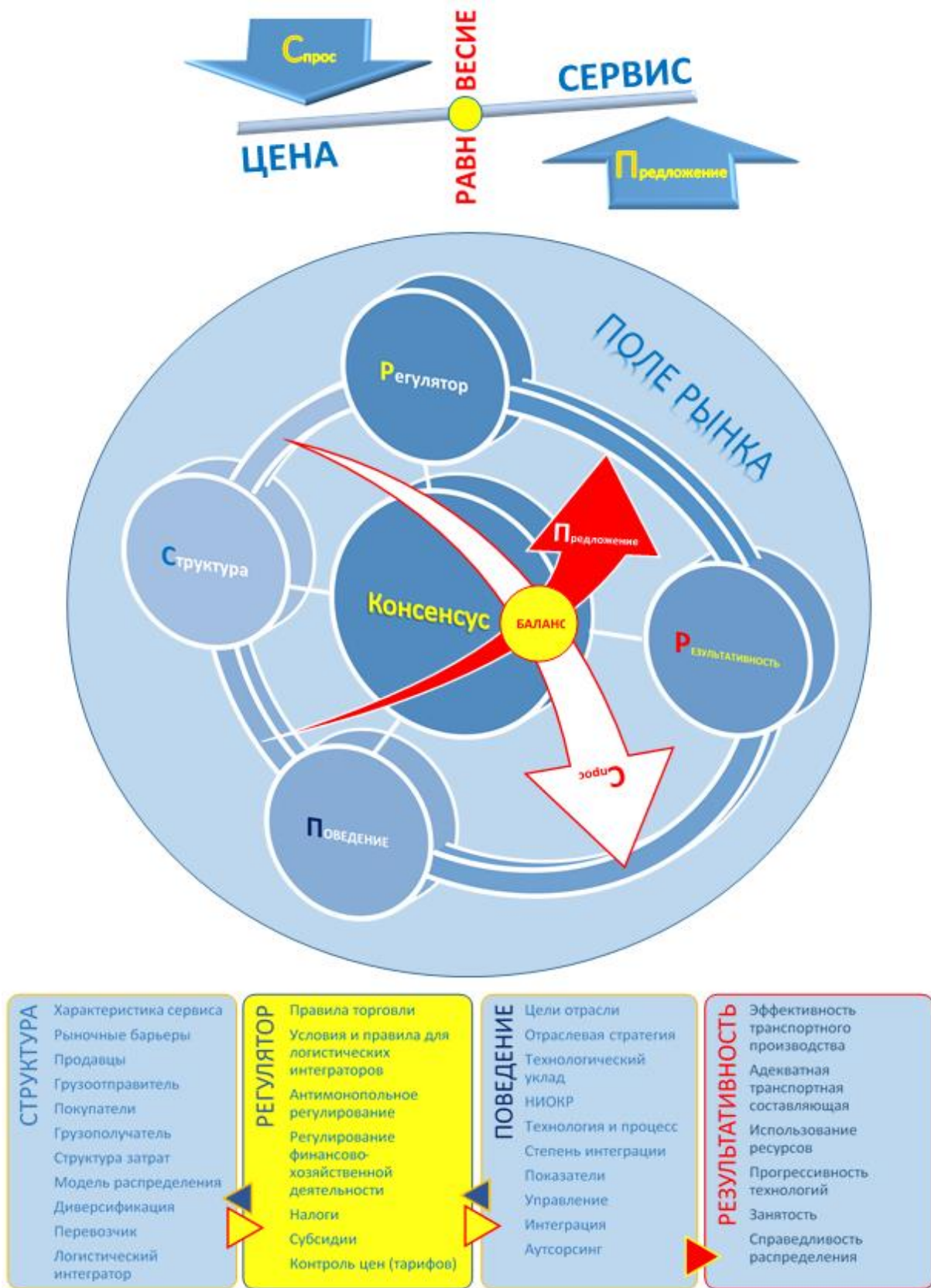


Рис. Модель результативного рынка грузовых железнодорожных перевозок

В данном случае стабильное положение рынка может быть достигнуто, если его участники не формируют тугий узел проблем конкурируя за власть, а выстраивают партнерские взаимоотношения сотрудничая и дополняя друг друга при реализации перевозочного процесса. Равновесное положение рынка отразится в транспортной составляющей цены перевозимых товаров железнодорожным транспортом.

Точки роста (места регулировочных действий) можно определить при анализе составляющих рынка реализованных в предложенной модели рынка: структуры, регулятора, поведения и результативности, положение которых в поле рынка стабилизируется посредством достижения консенсуса между акторами при балансе спроса и предложения. При этом необходимо учитывать все проблемные точки в модели рынка, в противном случае не удастся достичь равновесного и стабильного положения рынка, а значит рынок не будет результативным.

ВЫВОДЫ

Результатами настоящего исследования стали выявленные несоответствия существующей модели рынка грузовых железнодорожных перевозок с Гарвардской парадигмой, что во многом объясняет снижение эффективности работы железнодорожной отрасли и, в частности, грузовых железнодорожных перевозок. Реформаторы железнодорожной отрасли не учли важность и значение технологии создания грузового железнодорожного сервиса и его взаимосвязи с конкуренцией на рынке, меняется модель рынка – нужно менять и технологию производства сервиса. Разделение рынка грузовых железнодорожных перевозок на рынок перевозок, рынок погрузочных ресурсов и рынок железнодорожных вагонов (активов) не будет способствовать стабилизации на рынках и приведет к еще большему дисбалансу, что естественно будет корректироваться рыночным механизмом, повлияет на рост транспортной составляющей в цене перевозимых грузов и в итоге приведет к изменению системы ценообразования и росту тарифов на грузовые железнодорожные перевозки.

Для решения этих проблем предложено несколько скорректировать цели и существующую модель рынка грузовых железнодорожных перевозок. Структура отраслевого рынка в предложенной модели несколько отличается от классической, прежде всего иначе выстроенными взаимосвязями между его составляющими, что образует некий балансирующий механизма (политика консенсуса), функционирующий вместе со спросом и предложением. Политика консенсуса реализуется в данном случае как процесс поиска решений (балансирующий механизм), при котором будет достигнуто положение отсутствия «возражений»,

конфликтов между составляющими модели рынка грузовых железнодорожных перевозок. При не достижении гармонии (равновесного, стабильного положения) рыночная модель не может быть реализована.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рынок – это, живой механизм, и действия по его разбалансировке приводят к отрицательной результативности, а могут привести и к полному коллапсу в отрасли. Монопольный рынок не может без соответствующих изменений в экономике и технологии производства стать рынком свободной конкуренции. Рынок грузовых железнодорожных перевозок сильно зависит от технологии производства услуги (технологии организации перевозочного процесса), пожалуй, больше, чем в других отраслях экономики. Изменяя цели и модель рынка, требуется изменять и способ производства сервиса, он должен быть более эффективным, чем существующий, тогда и рынок будет результативным, в противном случае такие изменения не целесообразны. Предлагая заведомо неэффективную или менее эффективную технологию производства, и при этом менять модель рынка – значит заведомо ориентировать рынок на не результативность. Важно не забывать, что максимальная эффективность работы железнодорожного транспорта достигается именно в условиях монополии, а транспортной системы – в партнерстве и кооперации, а не в свободной конкуренции ее участников.

Представленная в настоящей работе модель результативного рынка грузовых железнодорожных перевозок и сформулированные цели предоставляют возможность по-новому взглянуть на состояние железнодорожной отрасли, оценить целесообразность продолжения эксперимента.

Относительно развития технологий, как мне представляется, учитывая переход к шестому технологическому укладу, интеграционные процессы и новые скорости развития, технологии должны быть ориентированы не на развитие конкуренции, а на интеграцию в единую систему всех видов транспорта, кооперацию, а не конкуренцию участников перевозочного процесса. Возможно, это приведет к трансформации видов транспорта в одну транспортную отрасль.

Для транспортного рынка и рынка грузового железнодорожного сервиса, в частности, как мне представляется, необходимо развитие и практическое применение кластерных технологий, их встраивание в технологию транспортного производства. Это откроет возможности для интеграции, лучшего логистического взаимодействия партнеров и обеспечит повышение эффективности перевозочного процесса.

Естественно, при построении модели рынка для его стабильности и совершенствования технологии производства грузового железнодорожного сервиса необходимо обеспечить справедливое распределение доходов от перевозочной деятельности и солидарную ответственность за качество сервиса перед обществом. В противном случае неизбежен дисбаланс на рынке и неэффективная работа отрасли.

Для общества цель перераспределения доходов от перевозочной деятельности на железнодорожном транспорте через создание рынка свободной конкуренции ошибочна. Рынок грузовых железнодорожных перевозок более эффективен при монополии, это согласуется с особенностями функционирования железнодорожной отрасли и подтверждается опытом России и других стран. Масштаб отрасли определяет структуру и систему управления ею, любая децентрализация ведет к снижению эффективности функционирования.

Однако надо отметить, что при переходе к шестому технологическому укладу будут формироваться интегрированные транспортные сервисы 4 и 5 PL, где цепь поставок будет пронизывать различные рынки с разными видами конкуренции. Но и при таких условиях максимальная результативность рынка грузовых железнодорожных перевозок возможна при монополии, при этом технология организации перевозочного процесса будет максимально эффективна при централизованном управлении, что позволит применять лучшие технологические решения (например, «Регулировка»). Свободная конкуренция необходима при оперировании в смешанном сообщении (модальных перевозках), в местах стыковки и переработке грузо- и товаропотоков (в Хабах), на первой и последней мили логистической цепи. Но это будет уже не рынок грузовых железнодорожных перевозок, а рынок интегрированного комплексного логистического сервиса. Этот рынок формируется сегодня, сдерживает его формирование только отсутствие необходимой логистической инфраструктуры и интегрированной технологии перевозочного процесса в смешанном сообщении. Можно спорить, но интеграционные процессы в экономике и переход к новому технологическому укладу, возможности ИТ, создают предпосылки к трансформации и консолидации видов транспорта в одну отрасль.

Применяемая сегодня в железнодорожной отрасли модель рынка разделяет поля рынка и формирует новые, стимулирует конкуренцию в отдельных звеньях цепи поставок, приводит к децентрализации управления перевозочным процессом, несправедливому распределению (например, между компаниями-операторами и ОАО «РЖД») росту транспортной составляющей, снижению мотивации у пользователей сервисов грузового железнодорожного транспорта. Нужно останавливать бессмысленный эксперимент с моделью рынка, корректировать ее и ее

настройки. Бездействие и продолжение эксперимента неизбежно приведет к устойчивому снижению результативности рынка грузовых железнодорожных перевозок.

Автор заявляет, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Scherer FM, Ross D. *Industrial market structure and economic performance*. Boston: Houghton-Mifflin, 1990. 713 p.
2. Shepherd WC. *The economics of industrial organization: analysis, markets, policies*. New Jersey: Prentice-Hall International, Inc., 1997. 447 p.
3. Tirole J. *The theory of industrial organization*. Cambridge: MIT Press, 1988. 479 p.
4. ООО «Эрнст энд Янг». Обзор отрасли грузоперевозок в России. Исследование состояния транспортной отрасли, 2019. [Ernst & Young LLC. *Obzor otrasli gruzoperevozok v Rossii. Issledovanie sostoyaniya transportnoi otrasli*, 2019. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.ey.com/ru_ru/automotive-transportation/ey-transportation-services-2019. Ссылка активна на: 12.11.2020.
5. Bowersox DJ, Closs DJ. *Logistical management: the integrated supply chain process*. New York: McGraw-Hill Companies, 1996. 730 p.
6. Shapiro JF. *Modeling the supply chain*. Pacific Grove: Duxbury, 2001. 586 p.
7. Третьяк В.П. Экономика отраслевой организации рынков = *Industrial organization: учеб. пособие*. – М.: ТЕИС, 2005. – 143 с. [Tretyak VP. *Ekonomika otraslevoi organizatsii rynkov = Industrial organization: schoolbook*. Moscow: TEIS; 2005. 143 p. (In Russ.)].
8. Львов Д.С. Развитие экономики России и задачи экономической науки. – М.: Экономика, 1999. – 80 с. [Lvov DS. *Razvitie ekonomiki Rossii i zadachi ekonomicheskoi nauki*. Moscow: Ekonomika; 1999. 80 p. (In Russ.)].
9. Бельницкий Д.С. Некоторые аспекты функционирования и развития транспорта в России // *Экономика и менеджмент инновационных технологий*. – 2019. – № 7. [Belnitsky DS. *Nekotorye aspekty funkcionirovaniya i razvitija transporta v Rossii. Economics and innovations management*. 2019;7. (In Russ.)]. Доступно по: <http://ekonomika.snauka.ru/2019/07/16626>. Ссылка активна на: 06.11.2020.
10. Галабурда В.Г., Персианов А.В., Тимошин А.А. и др. *Единая транспортная система / под ред. В. Г. Галабурды*. – М.: Транспорт, 1996. – 295 с. [Galaburda VG, Persianov AV, Timoshin AA. *Edinaya transportnaya Sistema*. Galaburda VG, editor. Moscow: Transport; 1996. 295 p. (In Russ.)]. Доступно по: <http://padabum.com/d.php?id=39225>. Ссылка активна на: 12.11.2020.
11. Миротин Л.Б., Гудков В.А., Зырянов В.В. и др. *Управление грузовыми потоками в транспортно-логистических системах / под ред. Л.Б. Миротина*. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 704 с. [Mirotin LB, Gudkov VA, Zyryanov VV. *Upravlenie gruzovymi potokami v transportno-logisticheskikh sistemakh*. Mirotin LB, editor. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom; 2010. 704 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://obuchalka.org/2014012875520/upravlenie-gruzovimi-potokami-v-transportno-logisticheskikh-sistemah-mirotin-l-b-gudkov-v-a-2010.html>. Ссылка активна на: 12.11.2020.

12. Смахов А.А. Маркетинговые модели транспортного рынка, – М.: Транспорт, 1998. – 120 с. [Smekhov AA. Marketingovye modeli transportnogo rynka. Moscow: Transport, 1998. 120 p. (In Russ.)].
13. Бельницкий И.Д. Некоторые аспекты организации грузодвижения на направлении Юго-Восточный Китай – Северо-Западная Европа // Современные научные исследования и инновации. – 2020. – № 5. [Belnitsky ID. Nekotorye aspekty organizatsii gruzodvizhenija na napravlenii Jugo-Vostochnyj Kitaj – Severo-Zapadnaja Evropa. Modern scientific researches and innovations. 2020;5. (In Russ.)]. Доступно по: <http://web.snauka.ru/issues/2020/05/92458>. Ссылка активна на: 06.11.2020.
14. Громов Н.Н., Персианов В.А. Управление на транспорте: учеб. пособие. – М.: Транспорт, 1990. – 336 с. [Gromov NN, Persianov VA. Upravlenie na transporte: schoolbook. Moscow: Transport, 1990. 336 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://booksee.org/book/592795>. Ссылка активна на: 12.11.2020.
15. Иловайский Н.Д., Киселев А.Н. Сервис на транспорте (железнодорожном): Учеб. для студентов вузов ж.-д. трансп. – М.: Маршрут, 2003. – 585 с. [Ilovaiskii ND, Kiselev AN. Servis na transporte (zheleznodorozhnom): schoolbook. Moscow: Marshrut; 2003. 585 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://booksee.org/book/524058>. Ссылка активна на: 12.11.2020.
16. Транспортная логистика: Учебник для транспортных вузов / под ред. Л.Б. Миротина. – М.: Экзамен, 2002. – 512 с. [Mirotin LB, editor. Transportnaya logistika: schoolbook. Moscow: Ekzamen; 2002. 512 p. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.studmed.ru/view/mirotin-lb-transportnaya-logistika_832f104.html. Ссылка активна на: 12.11.2020.

Сведения об авторе:

Данила Станиславович Бельницкий, к.э.н.;
eLibrary SPIN: 3453-2144; ORCID: 0000-0002-0199-5332;
Scopus ID: 698588; Researcher: AAX-6050-2020;
Mendeley: <https://www.mendeley.com/profiles/danial-belnitsky/>
E-mail: danila.belnitsky@gmail.com

Information about the author:

Danila St. Belnitsky, Ph.D;
eLibrary SPIN: 3453-2144; ORCID: 0000-0002-0199-5332;
Scopus ID: 698588; Researcher: AAX-6050-2020;
Mendeley: <https://www.mendeley.com/profiles/danial-belnitsky/>
E-mail: danila.belnitsky@gmail.com

Цитировать:

Бельницкий Д.С. Модель результативного рынка и технология грузовых железнодорожных перевозок // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 124–138. doi: 10.17816/transsyst202171124-138

To cite this article:

Belnitsky DS. Model of effective market and technology of freight railway transportation. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):124-138. doi: 10.17816/transsyst202171124-138

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 338.47-656

DOI 10.17816/transsyst202171139-157

© **М. В. Фёдорова**

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

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ТАРИФНОЙ ПОЛИТИКЕ НА ЛИНИИ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Обоснование: В качестве основы развития транспортной системы городских агломераций предлагается использовать магнитолевитационный транспорт. Для его эксплуатации необходима специальная скоростная инфраструктура, новый подвижной состав. Проект строительства и эксплуатации линии магнитолевитационного транспорта (МЛТ) Санкт-Петербург – Сертолово имеет исключительно долгосрочный характер, существенно влияет на развитие городского скоростного транспорта, и поэтому его реализация возможна только в рамках стратегического управления развитием городских транспортных систем.

Цель: Ввод в эксплуатацию линий магнитолевитационного транспорта в местах концентрации растущих пассажиропотоков, который будет способствовать сокращению временных затрат в пути, удовлетворению провозной потребности, улучшению качества и роста безопасности поездки при движении по выделенным полосам.

Метод: В статье разработаны предложения по тарифной политике на линии магнитолевитационного транспорта. Также дан прогноз пассажиропотоков по линии МЛТ с учетом рекомендуемых тарифов сбора платы за проезд и определены потенциальные доходы проекта по линии МЛТ.

Результаты: Целью внедрения этой линии МЛТ является улучшение транспортного обслуживания и снижение затрат времени на поездки населения города Сертолово за счет обеспечения скоростных сообщений, повышения технического уровня подвижного состава и остановок МЛТ, что существенно влияет на комфортность передвижения пассажиров.

Ключевые слова: скоростной городской транспорт, городские транспортные системы, магнитная левитация, тарифная политика,

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© **M. V. Fedorova**

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

TARIFF POLICY OFFERS ON THE LINE OF MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT

Background: It is proposed to use maglev transport as the basis for the development of the transport system of urban agglomerations. Its operation requires a special high-speed infrastructure, new rolling stock. The project for the construction and operation of the maglev transport line (MLT) St. Petersburg – Sertolovo has an extremely long-term nature, significantly affects the development of urban high-speed transport, and therefore its implementation is possible only within the framework of strategic management of the development of urban transport systems.

Aim: Commissioning of maglev transport lines in places of concentration of growing passenger traffic, which will help to reduce travel time, meet freight needs, improve the quality and increase travel safety when driving on dedicated lanes.

Method: The article has developed proposals for the tariff policy on the maglev transport lines. Also, a forecast of passenger traffic on the MLT line was given, taking into account the recommended tariffs for collecting tolls, and the potential income of the project on the MLT line was determined.

Results: The purpose of the introduction of this MLT line is to improve transport services and reduce the time spent on trips for the population of the city of Sertolovo by providing high-speed communications, improving the technical level of rolling stock and MLT stops, which significantly affects the comfort of passenger movement.

Key words: high-speed urban transport, urban transport systems, magnetic levitation, tariff policy.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее автором была сделана попытка обоснования строительства магнитолевитационной трассы Санкт-Петербург – Сертолово [1]. Главным преимуществом развития сети скоростного пассажирского городского транспорта является резкое сокращение временных затрат на перемещение населения. Данная технология предполагает эффективную сеть городского общественного транспорта с обязательным выделением полос для общественного транспорта. В сложившихся условиях отставания в развитии метрополитена от роста спроса населения на скоростные перевозки, исчерпания пропускной способности основных магистралей мегаполисов и нехватки провозных возможностей видов общественного транспорта для повышения эффективности и качества транспортного обслуживания является необходимым развитие скоростного городского транспорта.

Мы предлагаем включить в транспортную систему городов магнитолевитационный транспорт на примере Санкт-Петербурга и Ленинградской области [2, 3].

МЛТ является эстакадным видом kolejного транспорта и обладает всеми достоинствами и недостатками эстакадных линий. К его

достоинствам относятся, прежде всего, безопасность, экологичность (пониженный уровень шума за счет отсутствия трущихся поверхностей и отсутствие вредных выбросов в атмосферу), скорость и сниженное энергопотребление за счет отсутствия сил трения, а также высокая пропускная способность [4, 5, 6].

МЛТ имеет низкие показатели энергопотребления. Энергозатраты в среднем в расчете на 1 пасс-км составляют 0,21 кВт/час, что в условиях тарифов для четвертой ценовой группы предприятий Москвы составляет 0,29 руб. Следует отметить, что энергозатраты занимают существенную долю в структуре операционных расходов: в пиковом режиме для рельсового транспорта они существенно превышают среднее значение 29 % [7, 8, 9, 10].

РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ТАРИФНОЙ ПОЛИТИКЕ НА ЛИНИИ МЛТ

По данным социологического опроса населения г. Сертолово было получено распределение ответов респондентов на вопрос: «Чем Вы руководствуетесь, когда выбираете вид транспорта, совершая запланированные поездки?» (Рис. 1). Респондентам было предложено выбрать три критерия по степени значимости [11].

Наиболее значимыми критериями при выборе вида транспорта респонденты назвали скорость передвижения и отсутствие другого вида транспорта на данном маршруте: 27,0 % и 26,5 % респондентов соответственно. Более 17 % респондентов (из числа указавших наиболее значимый критерий – 660 чел.) наиболее значимым критерием при выборе вида транспорта назвали стоимость проезда, 12,3 % – «выбираю то, что быстрее подойдет», 10,2 % – комфорт, 2,7 % – безопасность (рисунок 7.5). Около 4 % респондентов наиболее значимыми критериями назвали критерии, не предусмотренные в вариантах ответов: расположение остановки (13 чел.), удобный маршрут (5 чел.), использование личного автомобиля (3 чел.), наличие льгот (2 чел.) и др.

На втором месте по значимости 29,5 % респондентов (из числа указавших второй по значимости критерий – 82,7 % респондентов) отметили скорость передвижения, 20,3 % – комфорт, 18,7 % – стоимость проезда.

На третьем месте по значимости 23,5 % респондентов (из числа указавших третий по значимости критерий – 510 чел.) отметили вариант ответа – комфорт, 22,2 % – безопасность, 15,9 % – скорость передвижения, 15,5 % – стоимость проезда.

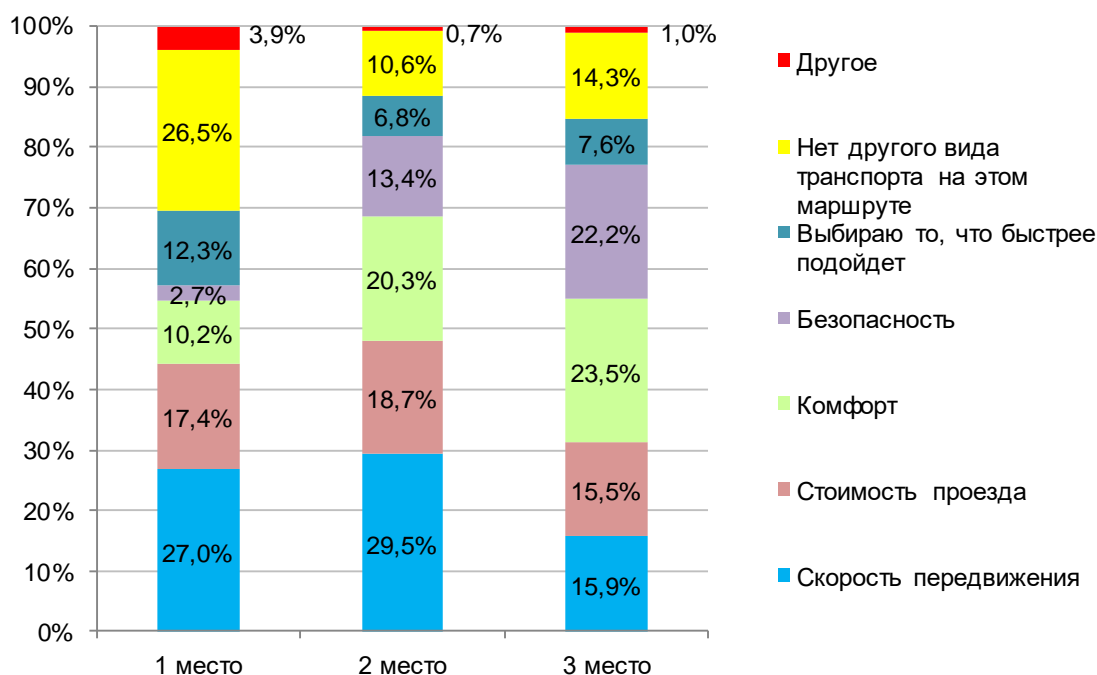


Рис. 1. Распределение ответов респондентов на вопрос о критериях выбора вида транспорта по степени значимости (1 место - самая высокая значимость), %

Источник: составлено по данным <http://www.mosertolovo.ru/>

В ходе социологического опроса населения г. Сертолово было выявлено, что регулярно поездки в г. Санкт-Петербург совершают 88% респондентов. Основным видом транспорта при поездках является коммерческий автобус (87 % респондентов) [12].

Возможность использования МЛТ для поездок по направлению «Сертолово – Санкт-Петербург» рассматривают около 85 % респондентов. Более 90 % респондентов из числа указавших предпочтительный остановочный пункт на проектируемой линии МЛТ по направлению в г. Санкт-Петербург планируют совершать поездки до станции метрополитена «Парнас».

В ходе социологического опроса наиболее часто респонденты указывали расходы на поездку в один конец до Санкт-Петербурга в 60 руб. что соответствует стоимости проезда в коммерческом автобусе от г. Сертолово до г. Санкт-Петербурга. Указанный уровень расходов на поездку может быть принят в качестве рекомендуемого тарифа на проезд в МЛТ. При этом, основанием для выбора тарифа на проезд в МЛТ также должны быть результаты анализа эластичности спроса по цене.

Пассажирский транспорт является одной из важнейших отраслей жизнеобеспечения региона, от функционирования и развития которого зависит качество жизни населения, эффективность работы отраслей экономики региона и возможности использования его градостроительного и социально-экономического потенциала.

Проектируемая линия легкого рельсового транспорта по направлению Сертолово – Санкт-Петербург имеет общую эксплуатационную протяженность 14,8 км.

Строительство линии МЛТ представляет собой перспективное направление развития системы общественного пассажирского транспорта Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Анализ мирового опыта свидетельствует о наличии значительной дифференциации в подходах к формированию тарифных систем и определению уровня оплаты на общественном пассажирском транспорте. Уровень платы за проезд может меняться от нулевого (бесплатный проезд) и примыкающего к нему крайне низкого до сравнительно высокого. Так, например, общественный пассажирский транспорт был бесплатным в Липецке с 1992 по 2003 гг. Примеры эксплуатации пассажирских транспортных систем с нулевым тарифом существуют и за рубежом. В Буффало введен бесплатный проезд на участке системы легкого рельсового транспорта, проходящей по центральным деловым районам; в Такоме (США) линия ЛРТ, открытая в 2003 г. в центре города, работает как бесплатный челночный маршрут. А во многих крупных городах, среди которых Париж, Нью-Йорк, города Российской Федерации и др., традиционным является использование постоянного тарифа, дифференциация же тарифов преимущественно используется в пригородной зоне.

Уровень платы является одним из основных регуляторов спроса на услуги пассажирского транспорта. Системы дифференцированной оплаты обеспечивают возможность управления спросом на услуги общественного пассажирского транспорта с учетом интересов пассажиров, перевозчиков и транспортной системы города в целом.

Существуют следующие виды тарифных систем и подходы к формированию тарифов:

- нулевой тариф;
- максимальный тариф;
- система дифференцированной оплаты;
- постоянный тариф.

Нулевой тариф и его влияние на спрос на услуги общественного пассажирского транспорта. Существует опыт использования нулевого тарифа на общественный пассажирский транспорт для всех пассажиров как с целью социальной поддержки населения, так и с целью максимизации пассажиропотоков и снижения нагрузки на улично-дорожную сеть. В этом случае финансирование системы общественного транспорта осуществляется за счет бюджета.

Использование нулевого тарифа при обеспечении приемлемого качества транспортного обслуживания действительно максимизирует число пассажиров на общественном пассажирском транспорте. Однако в условиях недостатка бюджетных средств, характерного для регионов России, высока вероятность недостаточного финансирования, ведущего к износу подвижного состава, инфраструктурных элементов и другим негативным последствиям.

Для практики применения нулевого тарифа характерны следующие особенности:

- отмена платного проезда может привести к снижению фискальной ответственности руководства транспортных предприятий в периоды достаточного финансирования и снижению качества транспортного обслуживания при сокращении финансирования;

- гарантированные значительные субсидии перевозчикам снижают эффективность их работы. В долгосрочной перспективе это часто приводит к ухудшению качества транспортного обслуживания и/или финансовому кризису;

- в большинстве случаев привлечение новых пассажиров на общественный транспорт происходит за счет более высокого уровня обслуживания, а не только за счет снижения стоимости проезда; таким образом, более эффективным является выделение дополнительных средств на совершенствование транспортного обслуживания с целью повышения спроса на перевозки, а не отмена платного проезда;

- применение нулевого тарифа приводит к злоупотреблениям и проблемам в эксплуатации: люди начинают пользоваться транспортом без необходимости, повышается риск вандализма, затрудняется поддержание общественного порядка в подвижном составе и т.п.;

- справедливо, если пассажиры общественного пассажирского транспорта оплачивают часть затрат на перевозку, и как правило, они готовы к этому;

- отсутствие ограничений спроса может вызвать переполнение подвижного состава на коротких перегонах маршрутов, что приводит к серьезному увеличению эксплуатационных затрат.

Однако существует ряд случаев, когда система бесплатного проезда может успешно применяться в ограниченных масштабах. В том числе:

- на челночных маршрутах и всех транспортных маршрутах, действующих на территории небольших зон высокой активности, например, в центральных деловых районах, студенческих городках, аэропортах и т.п.;

- на подвозочных маршрутах к крупным транспортным линиям или терминалам, а также к крупным зонам парковки и торговым зонам;

- при обслуживании особых мероприятий;

– в рекламных целях, например, при открытии новых линий рельсового транспорта.

Кроме того, как в крупных, так и в малых городах существует опыт установления низких тарифов, а также их снижения с целью привлечения пассажиров. Эксперты отмечают, что такое снижение обычно вызывает очень значительный рост пассажиропотоков, превышающий прогноз, представленный в исследованиях, посвященных эластичности спроса на перевозки общественным транспортом.

В большинстве случаев снижение стоимости проезда оказывается невыгодным в коммерческом отношении: рост доходов от сбора платы за счет увеличения пассажиропотоков не компенсирует потерю доходов в результате снижения стоимости проезда и дополнительные эксплуатационные затраты, связанные с необходимостью обслуживания большего количества пассажиров, или же соотношение затрат и доходов оказывается менее выгодным, чем при прежнем, более высоком размере платы за проезд. Тем не менее, эти изменения оцениваются как очень успешные, так как они способствуют снижению нагрузки на улично-дорожную сеть, повышению транспортной подвижности населения, активизации его социальной и экономической деятельности.

Максимальный тариф и его влияние на спрос на услуги общественного пассажирского транспорта. Противоположностью политике стимулирования спроса на перевозки общественным транспортом является политика, направленная в первую очередь на максимизацию доходов от сбора платы за проезд. Применение высоких тарифов часто приводит к несколько более жесткому финансовому контролю и управлению на транспортных предприятиях, но их влияние на спрос резко отрицательное.

Повышение тарифов на общественном пассажирском транспорте требует максимальной осторожности, так как оно может стать катализатором в запуске в цепи событий, составляющих так называемый «двойной порочный круг», представленный на Рис. 2.

Как видно из схемы, если повышение тарифов вызывает значительное переключение пассажиров с общественного транспорта на личный, то это приводит к росту интенсивности транспортных потоков, которое вызывает снижение их скорости и повышение эксплуатационных затрат транспортных предприятий (на схеме – сплошная линия). Кроме того, снижение пассажиропотока может привести к увеличению интервала движения на маршрутах общественного пассажирского транспорта, что делает общественный транспорт менее привлекательным и снова приводит к снижению спроса (пунктирная линия). Как повышение затрат, так и снижение доходности затем ведут к необходимости снова повысить тарифы.

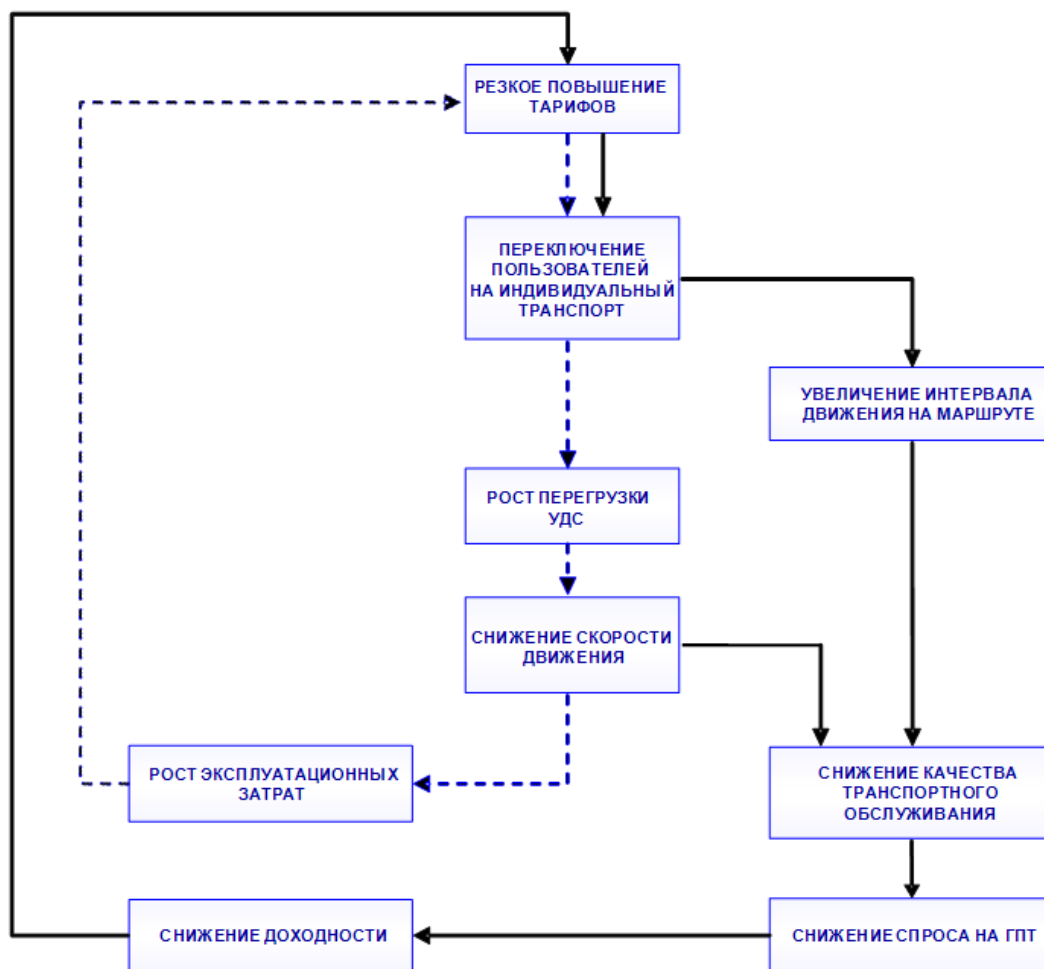


Рис. 2. Возможные последствия необоснованного роста тарифов на пассажирском транспорте

Таким образом, порочный круг замыкается. Отсюда следует необходимость поддержки оптимального уровня тарифов со стороны бюджета с целью поддержания транспортного обслуживания на приемлемом уровне и во избежание дальнейшего ухудшения качества системы общественного пассажирского транспорта и транспортной системы в целом.

Следствием такого развития событий является деградация пассажирского транспорта, сопровождающаяся ухудшением условий движения легковых автомобилей, что приводит к параличу городской транспортной системы в целом. В большинстве городов, где применяется рациональная транспортная политика, справедливая по отношению к общественному транспорту, задача привлечения пользователей считается гораздо более важной, нежели максимизация доходов. Такая политика позволяет повысить транспортную подвижность населения, снизить перегрузку УДС и предотвратить деградацию городской среды.

Система дифференцированной оплаты. Использование дифференцированного тарифа для оплаты поездок на общественном пассажирском транспорте является широко распространенной практикой для крупных городов с населением свыше 1 млн человек. Широкая практика находит отражение в различных принципах тарификации и их сочетании.

Применяются следующие базовые принципы тарификации в зависимости от следующих факторов:

- времени;
- расстояния;
- качества обслуживания;
- наличия пересадок;
- вида транспорта и/или перевозчика;
- вида проездного билета.

Практически во всех тарифных системах, применяемых в крупных городах, используется сочетание нескольких базовых принципов тарификации.

Наиболее распространенными базовыми принципами дифференциации являются:

- дифференциация в зависимости от времени;
- дифференциация в зависимости от расстояния.

При дифференциации тарифов в зависимости от времени стоимость проезда может зависеть от:

- продолжительности поездки;
- времени (периода) совершения поездки.

Так, система дифференцированной оплаты в зависимости от продолжительности поездки применяется в Праге, Амстердаме, Париже, Стокгольме, Будапеште, Осло и др.

Дифференциация стоимости проезда в зависимости от времени совершения поездки применяется в таких крупных городах, как Лондон, Гамбург, Франкфурт-на-Майне и др. и позволяет совершать поездки по сниженной цене в межпиковый период и период вечернего спада интенсивности пассажиропотоков. В Гамбурге, например, снижение тарифа практикуется в будние дни с 9 до 16 часов и в выходные дни после 18 часов. В Берлине – с 10 до 15 ежедневно. Подобная дифференциация стоимости проезда позволяет снизить пиковые нагрузки на транспортную систему и/или привлечь дополнительных пассажиров в период умеренной загрузки.

При дифференциации тарифов в зависимости от протяженности поездки стоимость проезда может определяться:

- зонами, в пределах которых совершается поездка;

- начальной и конечной зоной;
- количеством перегонов;
- количеством тарифных участков;
- протяженностью поездки.

Система дифференциации тарифов в зависимости от расстояния используется в настоящее время в большинстве крупных городов Европы. Так, например, в Берлине, Гамбурге, Лондоне, Барселоне используется дифференциация стоимости проезда в зависимости от зон.

Применение системы дифференцированной оплаты обеспечивает соответствие размера платы за проезд объему предоставленных транспортных услуг и позволяет в полной мере учесть возможности и потребности различных групп пассажиров.

Однако объективной предпосылкой создания системы дифференцированной оплаты проезда на общественном пассажирском транспорте является неоднородность поездок, отличающихся по дальности, продолжительности, времени совершения, пересадочности и другим характеристикам. Данная система является эффективной при высокой протяженности маршрута и большом количестве станций на нем. Однако вследствие приведенных выше факторов, несмотря на все очевидные преимущества дифференцированной системы оплаты проезда, можно заключить о нецелесообразности применения подобной схемы на проектируемой линии легкого рельсового транспорта по направлению Сертолово – Санкт-Петербург. Причиной тому невысокая протяженность маршрута (менее 20 км) и небольшое число станций на нем.

Постоянный тариф. Применение постоянного (фиксированного, плоского) тарифа также имеет как достоинства, так и недостатки.

К достоинствам такой тарифной системы относятся:

- простота понимания пассажирами;
- простота учета платежей;
- простота контроля оплаты проезда.

Основными недостатками постоянного тарифа являются:

- несправедливость: при применении постоянного тарифа пассажиры, совершающие короткие поездки, платят за них слишком высокую плату, не соответствующую объему предоставленных услуг, в то время как едущие на дальние расстояния обычно недоплачивают;
- сокращение пассажиропотоков вследствие отказа от поездок на короткие расстояния, и, следовательно, выпадение части доходов.

В то же время необходимость более высокой платы за поездки на большое расстояние в некоторых случаях, в том числе и в крупных городах России, таких, как Санкт-Петербург, компенсируется отсутствием возможности бесплатной пересадки между маршрутами и видами

транспорта. При этом разница между величиной оплаты проезда теряет актуальность для маршрутов, в которых отсутствует значительная разница между дальностью поездок, что делает данный вид тарификации наиболее приемлемым для оплаты проезда по проектируемой линии МЛТ по направлению Сертолово – Санкт-Петербург.

В Российской Федерации тарифы на перевозки пассажиров и багажа пассажирским транспортом общего пользования регламентируются органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации в области государственного регулирования тарифов.

В Табл. 1 представлены тарифы на пригородные пассажирские перевозки железнодорожным транспортом в зоне тяготения проектируемой линии МЛТ Сертолово – Санкт-Петербург. Согласно действующим нормативным документам Правительством Ленинградской области установлен предельный тариф на перевозку пассажиров железнодорожным транспортом общего пользования в размере 2,77 руб. за каждый последующий после 14-го км.

В Табл. 2 представлены тарифы на маршрутах регулярных перевозок наземным пассажирским маршрутным транспортом общего пользования в зоне тяготения проектируемой линии МЛТ по направлению Сертолово – Санкт-Петербург, действующие в 2020 году.

Стоимость проезда на маршрутах регулярных перевозок с посадкой и высадкой пассажиров только в установленных остановочных пунктах наземным пассажирским маршрутным транспортом общего пользования составляет не более 4,5 руб. за км пробега. Стоимость проезда на маршрутах регулярных перевозок с посадкой и высадкой пассажиров в любом не запрещенном правилами дорожного движения месте наземным пассажирским маршрутным транспортом общего пользования колеблется в диапазоне от 55 до 180 руб. в зависимости от дальности поездки. На большинстве маршрутов используется зональная дифференциация тарифа. При этом стоимость километра пробега на таких маршрутах значительно дешевле, чем на маршрутах регулярных перевозок, использующих участковый вид тарифа, с посадкой и высадкой пассажиров только в установленных остановочных пунктах.

Средняя протяженность маршрутов наземного пассажирского маршрутного транспорта в зоне тяготения проектируемой линии МЛТ Сертолово – Санкт-Петербург варьируется от 15 до 56,5 км.

Таблица 1. Тарифы на пригородные пассажирские перевозки железнодорожным транспортом в зоне тяготения проектируемой линии МЛТ по направлению Сертолово – Санкт-Петербург

№ пп	Перечень работ (услуг) субъекта естественной монополии в сфере железнодорожных перевозок, тарифы (ставки сборов и платы) на которые регулируются государством	Нормативно-правовой акт	Тарифы	Наименование органа исполнительной власти, осуществляющего государственное регулирование
1	разовые (на одну поездку в одну сторону)	Приказ № 401-п от 16.12.2020 «Об установлении тарифов на перевозку пассажиров железнодорожным транспортом общего пользования в пригородном сообщении на территории Ленинградской области, осуществляемую открытым акционерным обществом «Северо-Западная пригородная пассажирская компания»	1) Тариф «Стандарт»: 37,38 руб. за первые 14 км, вне зависимости от дальности поездки; 2,67 руб. за каждый последующий километр после 14-го	Комитет по тарифам и ценовой политике Ленинградской области
2	абонементные (на несколько поездок)	Распоряжение № 102 от 13.03.2015 г. «О стоимости проездных документов для проезда пассажиров в пригородном сообщении по территории Ленинградской области»	Размер скидки к разовому билету составляет от 0% до 10%, в зависимости от вида абонементного билета, срока действия и дальности поездки.	ОАО «СЗППК»

Ввиду отсутствия таких предпосылок, как неоднородность поездок, отличия по дальности, продолжительности, времени совершения, пересадочности и другим характеристикам, а также при учете небольшой протяженности маршрута проектируемой линии МЛТ, внедрение системы дифференцированной оплаты проезда не является целесообразным. Наиболее приемлемым для оплаты проезда по проектируемой линии МЛТ по направлению Сертолово – Санкт-Петербург является применение постоянного тарифа.

Таблица 2. Тарифы на маршрутах регулярных перевозок наземным пассажирским маршрутным транспортом общего пользования в зоне тяготения проектируемой линии МЛТ по направлению «Сертолово – Санкт-Петербург», 2020 г.

Номер маршрута	Наименование маршрута	Средняя протяженность, км	Вид тарифа	Стоимость проезда, руб.
Маршруты регулярных перевозок с посадкой и высадкой пассажиров только в установленных остановочных пунктах наземным пассажирским маршрутным транспортом общего пользования				
435	А.с. «ул. Жени Егоровой» – пос. Елизаветинка	32,5	участковый	Не более 4,5 руб. за км пробега
497	Черная Речка, 33 Км – ст. Песочная	15,1	участковый	Не более 4,5 руб. за км пробега
Маршруты регулярных перевозок с посадкой и высадкой пассажиров в любом не запрещенном правилами дорожного движения месте наземным пассажирским маршрутным транспортом общего пользования				
434	41-й км – станция метро «Проспект Просвещения», Санкт-Петербург	30,2	километровый	55
439	41-км, 40-км, мемориал, 38-км, 37-км, 36-км, дор. на Елизаветинку, мкрн. Черная Речка (центр), Черная Речка-2, Черная Речка-1, 30-км, г. Сертолово (дор. на пос. Песочный, Городок, 26-км, ул. Молодцова), Осиновая Роща, пр. Энгельса, Санкт-Петербург, ст.м. «Парнас»	27,3	километровый	65
444	г. Сертолово-2 – станция метро «Проспект Просвещения», Санкт-Петербург	15,9	зонный	43
456	пос. Ленинское, Яшеля, 45 – 47 км, Садоводства, Черная речка, Сертолово, Парголово, ст.м. «Проспект Просвещения»	46,0	зонный	90 р., СПб – Парголово – 60р.; СПб – Чёрная Речка – 70р.; СПб – садоводства – 80р.; СПб – Симагино – 80р.; Парголово – садоводства – 50р.; Парголово – Ленинское – 80р.; Сертолово – Ленинское – 60р.; садоводства – Ленинское – 50р.; Симагино – Ленинское – 50р.

Номер маршрута	Наименование маршрута	Средняя протяженность, км	Вид тарифа	Стоимость проезда, руб.
555a	г. Сертолово – станция метро «Проспект Просвещения», Санкт-Петербург	15	зонный	60
675	п. Первомайское, п. Чайка, п. Огоньки, п. Симагино, Садоводства, п. Черная речка, г. Сертолово, п. Осиновая Роща, п. Парголово, Санкт-Петербург, пр. Просвещения, ст. м. «Проспект Просвещения», ст.м. «Парнас»	56,5	зонный	120
676	пос. Черная речка – ОКБ, пр. Луначарского, Санкт-Петербург	20,9	зонный	70
678	Мичуринское (почта, центр), Светлое, Васильево, Коробицыно, Подгорье, Первомайское, Огоньки, Симагино, 40-км, Черная Речка, г. Сертолово (остановка Городок), Осиновая Роща, Санкт-Петербург, ст. метро «Парнас»	52	зонный	65 – 180
673	г. Сертолово – станция метро «Озерки», Санкт-Петербург	16	зонный	60

Таблица 3. Прогноз индекса потребительских цен до 2030 г.

Показатель	Вариант	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
ИПЦ, в % к предыдущему году	Базовый	102,8	102,7	102,7	102,5	102,3	102,2	102,0	102,0	102,0	102,0
	Умеренно-оптимистический	103,3	103,1	102,9	102,8	102,6	102,5	102,3	102,1	102,0	102,0

Источник: Министерство экономического развития Российской Федерации

ПРОГНОЗ ПАССАЖИРОПОТОКОВ ПО ЛИНИИ МЛТ С УЧЁТОМ РЕКОМЕНДУЕМЫХ ТАРИФОВ СБОРА ПЛАТЫ ЗА ПРОЕЗД

Прогноз пассажиропотоков по линии МЛТ между г. Сертолово и станцией метрополитена «Парнас» в г. Санкт-Петербурге был выполнен с учетом прогноза спроса на передвижения населения по линии МЛТ, а также результатов обоснования выбора рекомендуемого тарифа.

Начало эксплуатации линии МЛТ принято с 2025 г. с учетом продолжительности периода прохождения конкурса на выполнение проектных работ, проектирования и строительства линии МЛТ, приобретения подвижного состава.

В 2025 г. потенциальный спрос на передвижения населения по линии МЛТ оценивается в 14,4 млн чел. С учетом рекомендуемого тарифа сбора платы за проезд в первый год эксплуатации линии МЛТ пассажиропоток составит 10,6 млн чел. (Табл. 4).

Таблица 4. Прогноз пассажиропотоков по линии магнитолевитационного транспорта по направлению «Сертолово – Санкт-Петербург» до 2030 г.

Год	Объем пассажиропотоков, тыс. чел.	
	потенциальный	с учетом рекомендуемого тарифа на проезд
2025 г.	14 441	10 610
2026 г.	14 800	10 880
2027 г.	15 170	11 150
2028 г.	15 550	11 430
2029 г.	15 940	11 720
2030 г.	16 340	12 010

В 2030 г. объем пассажиропотока с учетом рекомендуемого тарифа сбора платы за проезд увеличится до 12 млн человек, или на 13,2 % по сравнению с 2025 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ДОХОДОВ ПРОЕКТА ПО ЛИНИИ МЛТ

В рамках выполнения данной работы к потенциальным доходам проекта по линии МЛТ отнесены доходы от сбора платы за проезд в МЛТ.

Прогноз доходов от сбора платы за проезд в МЛТ на участке «Сертолово – Санкт-Петербург» был выполнен на основе прогноза пассажиропотоков и рекомендуемого тарифа в ценах 2020 г. и ценах соответствующих лет [13, 14, 15, 16].

Для прогноза потенциальных доходов проекта по линии МЛТ в ценах соответствующих лет был использован прогноз индекса потребительских цен, представленный Министерством экономического развития Российской Федерации в следующих документах:

- Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на 2020 год и на плановый период 2021 и 2022 годов;
- Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на 2020 год;
- Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года.

В соответствии с Прогнозом социально-экономического развития Российской Федерации на 2020 год и на плановый период 2021 и 2022 годов предусмотрено два варианта развития: вариант 1 (базовый) и вариант 2 (умеренно-оптимистический).

Индекс потребительских цен на период до 2030 г. в двух вариантах представлен в Табл. 3.

Прогноз доходов от сбора платы за проезд в МЛТ на участке «Сертолово – Санкт-Петербург» в ценах 2020 г. и ценах соответствующих лет представлен в Табл. 5.

При определении доходов от сбора платы за проезд в МЛТ учитывался рекомендуемый тариф на проезд – 80 руб. в ценах 2020 г.

Таблица 5. Прогноз доходов от сбора платы за проезд в МЛТ по направлению «Сертолово – Санкт-Петербург» до 2030 г. (в ценах 2020 г. и ценах соответствующих лет)

Год	Доходы от сбора платы за проезд, млн руб.		
	в ценах 2020 г.	в ценах соответствующих лет	
		базовый вариант	умеренно-оптимистический вариант
2025 г.	531	743	743
2026 г.	544	783	783
2027 г.	558	814	825
2028 г.	572	846	869
2029 г.	586	879	914
2030 г.	600	925	961

Таким образом, при тарифе 80 руб. (в ценах 2020 г.) доходы от сбора платы за проезд в МЛТ по направлению «Сертолово – Санкт-Петербург» в 2025 г. составят 531 млн руб., в 2030 г. – 600 млн руб. в ценах 2020 г.

С учетом прогноза индекса потребительских цен доходы от сбора платы за проезд в МЛТ в ценах соответствующих лет в 2025 г.

прогнозируются на уровне 743 млн руб. по базовому и умеренно-оптимистическому вариантам, в 2030 г. – 925 млн руб. и 961 млн руб. соответственно.

В связи с тем, что расхождение в значениях индексов потребительских цен по двум вариантам незначительное, доходы от сбора платы за проезд в МЛТ в ценах соответствующих лет по двум прогнозным вариантам существенно не различаются.

При определении доходов от сбора платы за проезд в МЛТ по направлению «Сертолово – Санкт-Петербург» тариф для льготных категорий граждан не учитывался в связи с предоставлением субсидий на компенсацию выпадающих доходов транспортным организациям из бюджета г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Планируемая МЛТ от Санкт-Петербурга до Сертолово, проходит через территории массовой жилищной застройки и обеспечивающей связи пассажиров со станцией метрополитена «Парнас». Целью внедрения этой линии МЛТ является улучшение транспортного обслуживания и снижение затрат времени на поездки населения города Сертолово за счет обеспечения скоростных сообщений, повышения технического уровня подвижного состава и остановок МЛТ, что существенно влияет на комфортность передвижения пассажиров. Кроме этого, внедрение линии МЛТ позволит переключить пользователей легковых автомобилей на линию МЛТ, что уменьшит загрязнение окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Фёдорова М.В. Обоснование строительства магнитолевитационной трассы (МЛТ) Санкт-Петербург – Сертолово // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 134–146. [Fodorova M.V. Justification Of the need for the Construction of the Maglev Route St. Petersburg – Sertolovo // Transportation systems and technology. 2019;5(4):134-146. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201954134-146
2. Городской транспорт энергоэффективность, экологически устойчивый транспорт: сборник материалов для политических деятелей в развивающихся городах. – Берлин: GIZ, 2013. – 99 с. [*Gorodskoy transport energoeffektivnost', ekologicheski ustoychivyy transport: sbornik materialov dlya politicheskikh deyateley v razvivayushchikhsya gorodakh.* Berlin: GIZ; 2013. 99 p. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <http://greenlogic.by/content/files/dad357e3aec74d42c89c14e4d4fb872.pdf>. Ссылка активна на: 01.10.2020.
3. Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны: монография – СПб: Типография НП-Принт, 2015. – 140 с. [*Zaitsev AA. Magnitovlevitatsionny transport in a single transport system of the country: monograph.* St. Petersburg: NP-Print; 2015. 140 p. (In Russ.)].

4. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Талашкин Г.Н. Транспорт на магнитном подвесе (монография). – СПб: ПГУПС, 2010. – 160 с. [Zaitsev AA, Sokolova IaV, Talashkin GN. *Transport na magnitnom podvese* (monograph). St. Petersburg: PGUPS; 2010. 160 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004907216>. Ссылка активна на: 02.11.2020.
5. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF, editors. *Magnitolevitatsionnyj transport: nauchnye problemy i tekhnicheskie resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. 612 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://b-ok.org/book/2910926/a2ce27>. Ссылка активна на: 02.10.2020.
6. Вакуумно-левитационные транспортные системы: научная основа, технологии и перспективы для железнодорожного транспорта: коллективная монография членов и научных партнёров Объединённого учёного совета ОАО «РЖД» / под ред. Б.М. Лapidуса и С.Б. Нестерова. – М.: ООО «РАС», 2017. – 192 с. [Lapidus BM, Nesterov SB, editors. *Vakuumno-levitatsionnyye transportnyye sistemy: nauchnaya osnova, tekhnologii i perspektivy dlya zheleznodorozhnogo transporta: kolektivnaya monografiya chlenov i nauchnykh partnerov Ob'yedinonnogo uchonogo soveta ОАО “RZHD”*. Moscow: RAS; 2017. 192 p. (In Russ.)].
7. Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: ответ на вызовы времени // Транспортные системы и технологии. – 2017. – № 1 (7). – С. 5–19. [Zaitsev AA. Magnetolevitational transport: response to time challenges. *Transportation Systems and Technology*. 2017;1(7suppl.1):5-19. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst2017315-13
8. Shanghai maglev – all you need to know maglev.net [cited 2017 Sept. 12]. Available from: <http://www.maglev.net/shanghai-maglev>
9. Vuchic VR, Casello JM. An evaluation of Maglev technology and its comparison with high speed rail *Transportation Quarterly* [cited 2017 Sept. 13]. Available from: <http://www.thetransitcoalition.us/LargePDFfiles/maglevEvalandComparisonHSR.pdf>
10. FTA Low-Speed Urban Maglev Research Program [cited 2017 Sept. 13]. Available from: <http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/FTALowSpeedLessonsLearned.pdf>
11. АНО «Дирекция по развитию транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области» Отчёт «Анализ перспективного пассажиропотока и разработка тарифной политики по линии легкого рельсового транспорта по направлению Сертолово – Санкт-Петербург». – 2015. [ANO “Direktsiya po razvitiyu transportnoy sistemy Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti” Otchet “Analiz perspektivnogo passazhiropotoka i razrabotka tarifnoy politiki po linii legkogo rel'sovogo transporta po napravleniyu Sertolovo – Sankt-Peterburg”. 2015. (In Russ.)].
12. Официальный сайт города Сертолово. Доступно по: <http://www.mosertolovo.ru/> Ссылка активна на: 12.09.2020.
13. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г.: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р [Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 g.: utv. Rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 22.11.2008 g. № 1734-r. [Internet]. (In Russ)]. Режим доступа: http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13008. Дата обращения: 12.10.2020.
14. Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга 2017–2038 гг. (перспектива до 2048 г.) [Kontseptsiya razvitiya transportnoy sistemy Sankt-Peterburga 2017-2038 gg. (perspektiva do 2048g.) [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по:

<http://krti.gov.spb.ru/koncepciya-razvitiya-transportnoj-sistemy-sankt-peterburga/>.

Ссылка активна на: 12.11.2020.

15. Техническое задание на разработку Стратегии развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2030 года [Tekhnicheskoye zadaniye na razrabotku Strategii razvitiya transportnoy sistemy Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti na period do 2030 goda [Internet]. (In Russ)]. Доступно по: <http://docplayer.ru/27602974-Tehnicheskoe-zadanie-na-razrabotku-strategii-razvitiya-transportnoy-sistemy-sankt-peterburga-i-leningradskoy-oblasti-na-period-do-2030-goda.html>. Ссылка активна на: 07.11.2020.
16. Стратегия социально-экономического развития Ленинградской области до 2030 года от 13 июля 2016 года. [Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Leningradskoy oblasti do 2030 goda ot 13 iyulya 2016 goda [Internet]. (In Russ)]. Доступно по: http://lenoblinvest.ru/images/Strategy_2030.pdf. Ссылка активна на: 16.10.2020.

Сведения об авторе:

Фёдорова Мария Владимировна, к.э.н., старший преподаватель;

eLibrary SPIN-1518-7831; ORCID: 0000-0003-2740-573X;

E-mail: tale19quale@mail.ru

Information about the author:

Maria V. Fedorova, PhD Economics, Senior Lecturer;

eLibrary SPIN-1518-7831; ORCID: 0000-0003-2740-573X;

E-mail: tale19quale@mail.ru

Цитировать:

Фёдорова М.В. Предложения по тарифной политике на линии магнитолевитационного транспорта // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 139–157. doi: 10.17816/transsyst202171139-157

To cite this article:

Fedorova MV. Tariff Policy Offers on the Line of Magnetic Levitation Transport. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):139-157. doi: 10.17816/transsyst202171139-157