



Вестник

Уральского
государственного
университета
путей сообщения

Научный журнал

Herald
of the Ural State University
of Railway Transport

Scientific journal



Научный журнал
Вестник Уральского государственного
университета путей сообщения
(Вестник УрГУПС)
№ 3 (55), 2022 год

Главный редактор
Василий Михайлович Сай
Зам. главного редактора
Дмитрий Станиславович Завалишин
Научный редактор
Василий Федорович Лапшин

Литературный и выпускающий редактор
Людмила Станиславовна Барышникова

Техническое редактирование и верстка
Светлана Николаевна Наймушина

Учредитель и издатель:
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учрежде-
ние высшего образования «Уральский
государственный университет путей
сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя, издателя и редакции:
620034, Екатеринбург,
ул. Колмогорова, 66

Телефон редакции: (343) 221-25-60.
Веб-сайт: www.usurt.ru/vestnik;
e-mail: vestnik@usurt.ru.

Вестник УрГУПС включен ВАКом
в перечень периодических, научных
и научно-технических изданий,
выпускаемых в Российской Федерации,
в которых рекомендуется публикация
основных результатов диссертаций.

DOI:10.20291/2079-0392

Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
Роскомнадзора ПИ № ФС77–38188
от 30 ноября 2009 г.

Подписной индекс журнала
в общероссийском
каталоге «Пресса России» – 70070

Отпечатано в издательстве
Уральского государственного
университета путей сообщения,
620034, Екатеринбург,
ул. Колмогорова, 66.

Подписано в печать 01.12.2022
Дата выхода в свет 14.12.2022.
Цена 388,37 руб.

Тираж 300 экз. 1-й з-д: 1–50.
Формат 70×100/16.
Заказ 24

Уральский государственный
университет путей сообщения
(ФГБОУ ВО УрГУПС), 2021 ©

Scientific journal «Herald of the
Ural State University
of Railway Transport»
(Herald of the USURT)
№ 3 (55), 2022

Editor-in-chief
Vasily M. Say
Deputy Editor-in-Chief
Dmitry S. Zavalishchin
Science editor
Vasily F. Lapshin

Script and copy editor
Lyudmila S. Baryshnikova

Technical editing and make-up
Svetlana N. Naimushina

Founder and publisher:
Federal state-funded educational
institution of the higher education
«Ural State University of Railway Transport»
(FGBOU VO URGUPS)

Address of the founder, publisher and edition:
66 Kolmogorov Street,
620034, Ekaterinburg

Telephone: +7 (343) 221-25-60.
Web-site: www.usurt.ru/vestnik;
e-mail: vestnik@usurt.ru.

DOI:10.20291/2079-0392

Certificate of registration of mass media
by the Federal Service for Supervision
in the sphere of communications,
information technology and mass communications
(Roskomnadzor) PI № FS77–38188
of November 30, 2009.

Subscription reference number
of the issue in the All Russia Catalogue
«Pressa Rossii» – 70070

Printed in the Publishing house
of the Ural State University of
Railway Transport
66 Kolmogorov Street,
620034, Ekaterinburg.

Passed for printing 01.12.2022
Data of issue 14.12.2022.
The price 388,37 rub.

Circulation 300. The 1st pr.: 1–50.
Format 70×100/16.
Order 24

The Ural State University
of Railway Transport
(FGBOU VO URGUPS), 2021 ©

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Владимир Викторович Цыганов, д-р техн. наук, профессор, Институт проблем управления Российской академии наук, Москва, Россия

Сергей Герман-Галкин, д-р техн. наук, профессор, Морская академия, Институт судовой автоматики и электротехники, г. Щецин, Польша

Александр Леонидович Казаков, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Россия

Вячеслав Семенович Шварцфельд, д-р техн. наук, профессор, Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург, Россия

Михаил Ростиславович Якимов, д-р техн. наук, директор Института транспортного планирования Российской академии транспорта, Москва, Россия

Василий Михайлович Сай, д-р техн. наук, профессор, Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Геннадий Львович Аккерман, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

Евгений Самуилович Ашпиз, д-р техн. наук, профессор, РУТ, Москва

Владимир Григорьевич Булаев, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

Александр Петрович Буйносов, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

Тамара Петровна Воскресенская, д-р техн. наук, профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк

Игорь Игоревич Гаврилин, канд. биол. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург

Дмитрий Станиславович Завалишин, канд. физ.-мат. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург

Сергей Николаевич Корнилов, д-р техн. наук, профессор, МГТУ, г. Магнитогорск

Валерий Максимович Курганов, д-р техн. наук, профессор, ТГУ, Тверь

Василий Федорович Лапшин, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

Валерий Владимирович Сапожников, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург

Сергей Викторович Сизый, д-р техн. наук, профессор, УрФУ, Екатеринбург

Галина Адольфовна Тимофеева, д-р физ.-мат. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

Константин Владимирович Щурин, д-р техн. наук, профессор, Московского государственного областного технологического университета, г. Королёв

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Vladimir Viktorovich Tsyganov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Sergey German-Galkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Maritime University, Institute of Marine Electrical Engineering and Vessel Automation, Szczecin, Poland

Alexander Leonidovich Kazakov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Vyacheslav Semyonovich Schwarzfeld, Doctor of Technical Sciences, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Mikhail Rostislavovich Yakimov, Doctor of Technical Sciences, Director of Institute of Transport Planning of Russian Transport Academy, Moscow, Russia

Vasiliy Mikhailovich Say, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

EDITORIAL BOARD

Gennadiy Lvovich Akkerman, Doctor of Technical Sciences, Professor, USURT, Yekaterinburg

Evgeniy Samuilovich Ashpiz, Doctor of Technical Sciences, Professor, RUT (MIIT), Moscow

Vladimir Grigoryevich Bulaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, USURT, Yekaterinburg

Alexander Petrovich Buynosov, Doctor of Technical Sciences, Professor, USURT, Yekaterinburg

Tamara Petrovna Voskresenskaya, Doctor of Technical Sciences, Professor, SSIU, Novokuznetsk

Igor Igorevich Gavrilin, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, USURT, Yekaterinburg

Dmitry Stanislavovich Zavalishchin, PhD, associate professor, The Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg

Sergey Nikolaevich Kornilov, Doctor of Technical Sciences, Magnitogorsk State Technical University, Professor, Magnitogorsk

Valeriy Maksimovich Kurganov, Doctor of Technical Sciences, Professor, TSU, Tver

Vasiliy Fedorovich Lapshin, Doctor of Technical Sciences, Professor, USURT, Yekaterinburg

Valeriy Vladimirovich Sapozhnikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, PSTU, St. Petersburg

Sergey Viktorovich Sizi, Doctor of Technical Sciences, Professor, UFU, Yekaterinburg

Galina Adolfova Timofeeva, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, USURT, Yekaterinburg

Konstantin Vladimirovich Shchurin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Region University of Technology, Korolev city

Содержание

Математические модели технологических процессов

- 4 С. В. Вихарев. Моделирование выбора и удовлетворенности пассажиров на мультимодальных маршрутах
- 15 С. Л. Дерябин, А. П. Садов. Математическое моделирование течений самогравитирующегося газа с помощью нестационарных автомодельных переменных
- 23 А. Л. Казаков, М. Л. Жарков, А. В. Супруновский. О моделировании трансграничных российско-монгольских железнодорожных перевозок
- 33 А. А. Маркина, Л. А. Почуев. Проработка концепции автомобиля с гибридной силовой установкой
- 43 А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкuroв, Д. В. Александрин. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов

Управление в технических системах

- 60 Ю. В. Горелов, Т. Н. Ткачева. Подходы к определению коэффициента геометрии сетевых организационных структур
- 67 А. С. Космодамианский, А. И. Ивахин, Д. В. Котяев. Математическая модель тягового электропривода колесной пары тепловоза с электрической системой повышения сцепных качеств
- 74 А. К. Табунщиков, В. С. Кузьмин. Оценка влияния электромагнитной обстановки многопутных участков железных дорог на функционирование приемников сигналов автоматической локомотивной сигнализации

Организация и логистика

- 83 М. Б. Петров, М. Л. Хазин, Д. Р. Кричкер. Альтернативные направления экспорта-импорта по МТК «Север – Юг» в условиях экономических санкций
- 95 Н. А. Осинцев. Ранжирование элементов «зеленой» цепи поставок методом DEMATEL
- 107 М. Р. Якимов. Подходы к формированию эффективной маршрутной сети крупных городов

Безопасность жизнедеятельности

- 114 А. Р. Закирова. Методология оценки риска получения электротехническим персоналом профессиональных заболеваний, вызванных воздействием магнитных полей

Философские аспекты железнодорожного транспорта

- 123 Е. П. Пьяных. Путешествие как категория философии транспорта

Аспирантская тетрадь

- 138 В. С. Томилов. Влияние блока балластных резисторов на КПД электрической цепи электровоза переменного тока

Contents

Mathematic models of technological processes

- 4 S. V. Vikharev. Modeling the choice and satisfaction of passengers on multimodal routes
- 15 S. L. Deryabin, A. P. Sadov. Mathematical modeling of self-gravitating gas flows using nonstationary self-similar variables
- 23 A. L. Kazakov, M. L. Zharkov, A. V. Suprunovskiy. On modeling of cross-border russian-mongolian railway transportation
- 33 A. A. Markina, L. A. Pochuev. Elaboration of the concept of a car with a hybrid power plant
- 43 A. N. Rakhmangulov, S. N. Kornilov, P. N. Mishkurov, D. V. Alexandrin. Simulation models in digital twins of railway junctions

Control in engineering systems

- 60 Yu. V. Gorelov, T. N. Tkacheva. Approaches to determining the geometry coefficient of network organizational structures
- 67 A. S. Kosmodamianskiy, A. I. Ivakhin, D. V. Katayev. Mathematical model of traction electric drive of a diesel locomotive wheelset with electric boost system of coupling qualities
- 74 A. K. Tabunshchikov, V. S. Kuzmin. Assessment of the impact of the electromagnetic environment of multi-track rail sections on functioning of automatic cab signaling receivers

Organization and logistics

- 83 M. B. Petrov, M. L. Khazin, D. R. Krichker. Alternative export-import directions through the International North – South Transport Corridor under conditions of the economic sanctions
- 95 N. A. Osintsev. Green supply chain elements ranking by DEMATEL method
- 107 M. R. Yakimov. Approaches to formation of an effective route network of large cities

Health and safety

- 114 A. R. Zakirova. Methodology for assessing the risk for electrotechnical personnel to get occupational diseases caused by exposure to magnetic fields

Philosophical aspects of railway transport

- 123 E. P. P'yanikh. Travelling as a category of the philosophy of transport

Research of young scientists

- 138 V. S. Tomilov. The effect of a ballast resistor block on the efficiency of an electric circuit of the ac electric locomotive

Математические модели технологических процессов

УДК 625.113

С. В. Вихарев

Моделирование выбора и удовлетворенности пассажиров на мультимодальных маршрутах

UDC 625.113

S. V. Vikharev

Modeling the choice and satisfaction of passengers on multimodal routes

Аннотация

Пассажиры (особенно в крупных городах) для поездки по одному и тому же маршруту выбирают различные виды транспорта. Этому способствуют развитие улично-дорожной сети (УДС), строительство транспортно-пересадочных узлов. Возникает задача моделирования выбора пассажирами маршрутов и видов транспорта для перемещения с учетом пересадок и смены личного и общественного транспорта в поездках. Решение этой задачи необходимо для целей проектирования маршрутных сетей, планов развития транспортной системы, управления нагрузкой улично-дорожную инфраструктуру.

Математическая модель выбора вида транспорта пассажирами в зависимости от

качества маршрута, личной удовлетворенности и личного опыта пассажира, а также удовлетворенности соседей предложена в [1–4]. Однако эта модель рассматривала только прямые перевозки из точки-источника *A* в точку-сток *B* и не могла учитывать перевозки различными видами транспорта с пересадками.

В настоящей работе представлена новая математическая модель, учитывающая мультимодальность маршрутов, а также наличие нескольких источников и стоков, что позволит смоделировать выбор видов транспорта пассажирами отдельных районов или городов.

Разработанная модель позволяет моделировать выбор и определять уровень удовлетворенности

пассажира на новой маршрутной сети или оценивать влияние изменений на существующей, поскольку вместо статистического анализа используются методы обучения с подкреплением.

Ключевые слова: маршрутная сеть, удовлетворенность пассажира, качество транспорта, обучение с подкреплением, выбор транспорта, мультимодальность.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-4-14

Abstract

Passengers (especially in large cities) choose different modes of transport to travel along the same route. This is facilitated by the development of the road network (RN), the construction of transport hubs. There arises the problem of modeling the choice of routes

Статья рекомендована к публикации С. В. Сизым, д-ром техн. наук, УрФУ. E-mail: s5125@e1.ru.

Сергей Викторович Вихарев, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.; ИЕиМ УрФУ; Екатеринбург, Россия. E-mail: sergey@viharev.com. ORCID 0000-0003-1217-9397.

© С. В. Вихарев, 2022

The article is recommended for publishing by S. V. Sizi, Doctor of Technical Sciences, UrFU. E-mail: s5125@e1.ru.

Sergey Viktorovich Vikharev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher; UrFU; Yekaterinburg, Russia. E-mail: sergey@viharev.com. ORCID 0000-0003-1217-9397.

© S. V. Vikharev, 2022

and modes of transport for passengers to travel, taking into account transfers and changes of personal and public transport during trips. The solution of this problem is necessary for the purposes of designing route networks, plans for the development of the transport system and managing the load on the road infrastructure.

A mathematical model of the choice of the mode of transport by passengers depending on the quality of the route, personal satisfaction and personal experience of the passenger, as well as the

satisfaction of neighbors is proposed in [1–4]. However, this model considered only direct transportation from source point A to drain point B and could not take into account transportation by various modes of transport with transfers.

This paper presents a new mathematical model that takes into account the multimodality of routes, as well as availability of several sources and drains, which will allow passengers to simulate the choice of modes of transport in individual districts or cities.

The developed model makes it possible to simulate the choice and determine the level of passenger satisfaction on a new route network or assess the impact of changes on the existing one, since reinforcement learning methods are used instead of statistical analysis.

Keywords: route network, passenger satisfaction, quality of transport, reinforcement training, choice of transport, multimodality.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-4-14

Ранее в модели рассматривался тривиальный маршрут между точками *A* и *B*, на котором пассажиры выбирают наиболее подходящий вид транспорта, то есть осуществлялась итерация выбора. После каждой итерации оценивалась загруженность транспортной системы, затем пассажиры получали информацию о том качестве поездки, которое соответствовало качеству выбранного транспорта во всей транспортной системе [5]. Для целей настоящей работы достаточно того, что есть некоторая метрика качества маршрутов. Как именно она устроена, для рассматриваемой модели не имеет значения. В литературе (см., например, [6–8]) известны различные подходы к определению метрик и показателей качества маршрута.

В настоящей работе представлена новая математическая модель, учитывающая мультимодальность маршрутов, а также наличие нескольких источников и стоков, что позволит моделировать выбор видов транспорта пассажирами отдельных районов или городов. Для целей настоящей работы под мультимодальностью будем понимать применение различных видов транспорта на одном маршруте, то есть наличие у пассажира возможности

пересаживаться с одного вида транспорта на другой. Для удобства рассуждений условимся, что каждый вид транспорта должен быть привязан к определенному маршруту.

Представим маршрутную сеть города в виде графа, где транспортно-пересадочные узлы являются вершинами, а связывающие их линии транспорта ребрами. Цепь внутри графа определяет некоторый транспортный маршрут. У каждой цепи в графе есть источник (начальная точка), промежуточные вершины (остановки), сток (конечная точка).

Теперь попробуем перенести описанный подход на модель, представленную в [5]. Рассмотрим все маршруты, идущие из точки *A* и проходящие через точку *B*; это будут прямые маршруты, например, можно сесть на автобус, идущий из точки *A*, или же у пассажира есть личный транспорт.

В настоящей работе рассмотрим выбор пассажирами вида транспорта на составных маршрутах, т.е. состоящих из двух и трех прямых направлений. Договоримся, что одна из точек первого маршрута проходит через точку истока *A*, причем этот маршрут имеет точку пересечения со следующим, а конечный маршрут обязательно проходит

через точку B . Ограничение в два или три маршрута введено из соображения логики – вряд ли человек будет совершать больше двух пересадок.

Пусть есть две точки: источник A , в котором находятся пассажиры, и B – точка-сток, куда должны приехать пассажиры (рис. 1). Есть несколько маршрутов, чтобы выполнить перемещение. По синей стрелке ходят метро и трамвай – прямые маршруты. По красным стрелкам можно перемещаться на собственной машине, автобусе, велосипеде. Можно рассмотреть множество вариантов перемещений и выбрать наиболее подходящий. Например, можно добраться на машине до точки узла 1 и затем пересестись на автобус или проехать на автобусе до точки 2 , а дальше использовать каршеринг. Фактически каждый составной маршрут можно объединить в один прямой маршрут и встроить в модель [5].

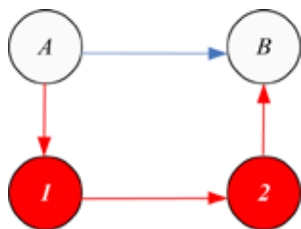


Рис. 1. Пример транспортной системы состоящей из одного источника A и одного стока B

Описание работы нескольких источников и стоков

Поскольку теперь есть явное представление дорожной системы в виде графа, то после каждой итерации можно посчитать, сколько пассажиров и по какому ребру перемещалось, оценить загруженность конкретного ребра в зависимости от вида транспорта. Таким образом, качество транспорта будет определяться намного точнее. Также эта модель позволяет решить более сложную задачу добавления нескольких источников и стоков.

Рассмотрим пример, полученный добавлением еще двух узлов: C (источ-

ник) и D (сток), также из C в D можно попасть напрямую, скажем, на трамвае или метро (рис. 2), на собственном транспорте – только через точки 1 и 2 . Выбор пассажиров в точке C будет влиять на качество всей транспортной системы; если все жители узла C решат ехать на машинах, то это скажется на качестве поездок пассажиров в A . При этом важно отметить, что раз пассажиры A не являются прямыми соседями пассажиров C , то опыт одних не влияет на выбор других, т.к. они находятся в совершенно разных условиях. Возможно, что автобусные маршруты из A в B намного лучше автобусных маршрутов из C в D . Значит, выбор транспорта, основанный на удовлетворенности соседей, продолжит работать, однако теперь в систему можно включить большее число независимых агентов, влияющих на всю транспортную сеть.

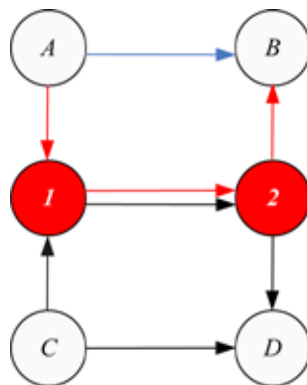


Рис. 2. Пример сложной транспортной системы, состоящей из нескольких источников и стоков

Рассмотрим карту города, улицы и остановки которого представлены в виде графа (рис. 3).

Последовательность вершин и ребер описывает маршрут. Каждая такая последовательность имеет исходную точку, промежуточные вершины (остановки) и точку выхода. Ранее маршрут состоял только из одного ребра, то есть моделировался выбор одного вида транспорта для всего маршрута

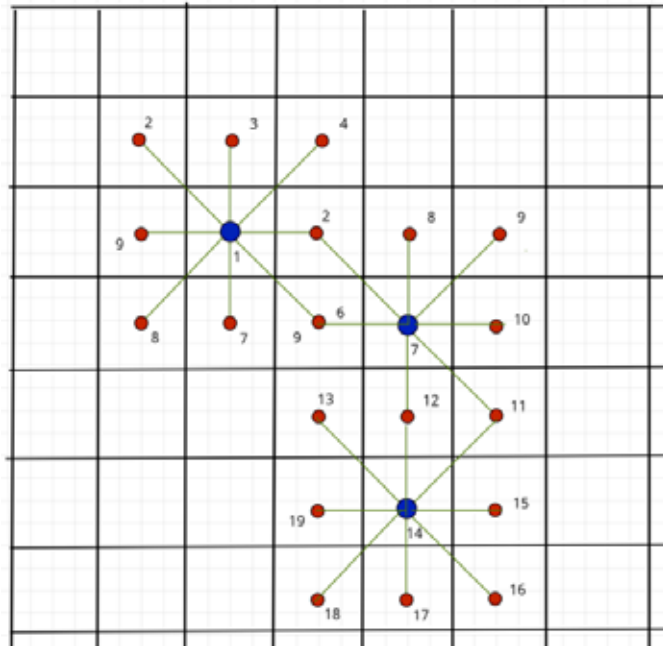


Рис. 3. Три района, соединенные транспортной сетью

[3–5]. В настоящей работе модель расширена за счет составного маршрута, складывающегося из нескольких элементарных маршрутов, соединенных друг с другом, т.е. точка выхода одного прямого маршрута является исходной точкой следующего.

Рассмотрим транспортную систему (см. рис. 3). Каждая точка – это остановка, где пассажир может пересесть на другой вид транспорта. Синие точки под номерами 1, 7, 14 – центры районов, а красные – окрестности этих районов.

Допустим, пассажиру нужно добраться из пункта 1 в пункт 14. Есть много способов сделать это.

Пассажир может проехать весь маршрут на автомобиле по краям 1–2–7–11–14 (рис. 4, а).

Пассажир может выбрать автобус и проехать по краям 1–6–7–12–14 (рис. 4, б).

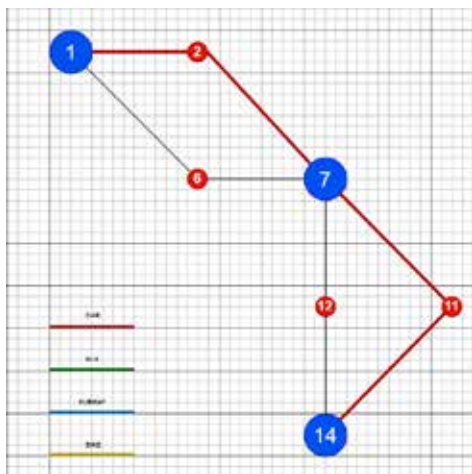
Пассажир может проехать на машине по краям 1–2–7, а затем сесть на метро и проехать по краям 7–12–14 (рис. 4, в).

Пассажир может сначала проехать на автобусе по бордюрам 1–6–7, затем пересесть на метро и проехать одну остановку 7–12, а потом взять напрокат велосипед и добраться до места назначения (рис. 4, г).

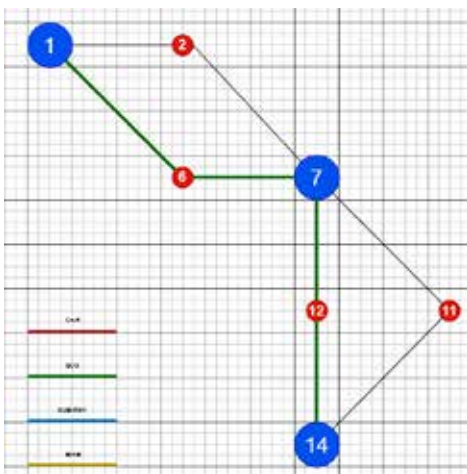
Возможность выбора вида транспорта на каждом участке маршрута называется мультимодальностью. Стоит отметить, что в системе для каждого ребра будет учитываться нагрузка, создаваемая каждым пассажиром, движущимся вдоль ребра на определенном виде транспорта. Заторы по-разному влияют на качество поездки различными видами транспорта, поэтому пассажир может в будущем выбрать наиболее предпочтительный маршрут.

Возможность удаления / добавления вершины на ребро позволит представить большое количество различных транспортных систем, что отвечает потребностям нашего исследования. Разумеется, это не позволит получить дорожную систему любой сложности, но для иллюстрации работы модели достаточно выбранной функциональности. Для целей

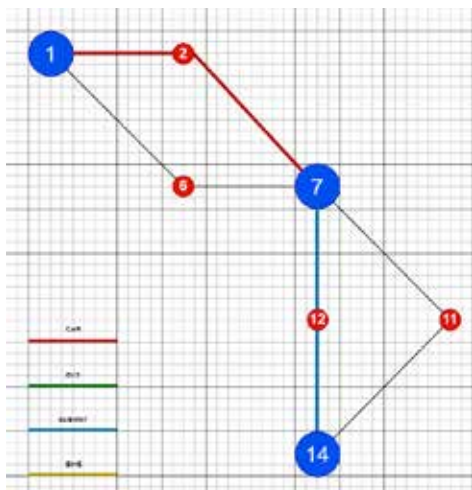
а)



б)



в)



г)

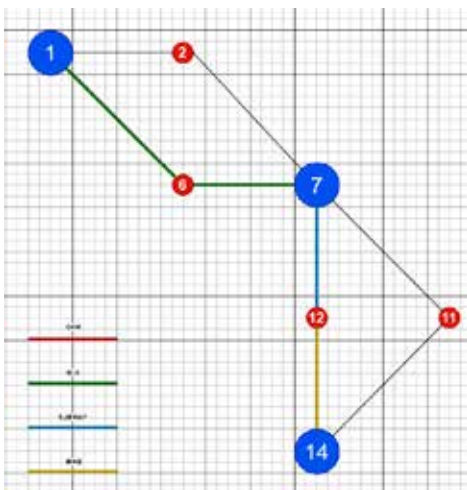


Рис. 4. Пример возможного перемещения из точки 1 в точку 14

моделирования выбора видов транспорта на уровне региона, то есть меньшем масштабе детализации достаточно удалить часть вершин и ребер. Можно также добавить новые вершины между ребрами, детализируя конкретные участки маршрутной сети. Новые вершины будут соответствовать возможности пересадки на другие виды транспорта. Предлагаемый подход дает достаточную вариативность для демонстрации возможностей модели.

Представление мультимодальных маршрутов

В такой расширенной модели пассажир выбирает какой-то определенный вид транспорта на часть поездки, то есть появляется опция мультимодальных маршрутов. Мультимодальный маршрут может содержать различные последовательности общественного и личного транспорта. Мультимодальный маршрут можно описать как

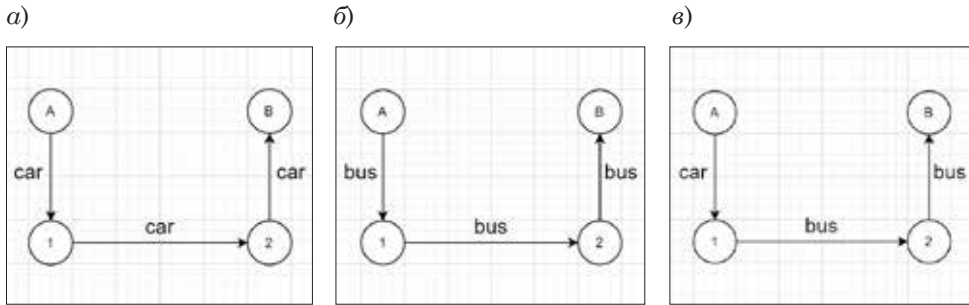


Рис. 5

а – полностью на автомобиле; б – полностью на автобусе; в – мультимодальный маршрут (часть на машине, часть на автобусе)

последовательность ребер, где на каждом ребре задан определенный вид транспорта. Рассмотрим более конкретные примеры.

Пассажир перемещается по всем ребрам исключительно на машине; в предыдущих работах такое поведение означало бы, что он выбрал автомобиль (рис. 5, а); аналогичная ситуация представлена на рис. 5, б, только вместо машины пассажир использует общественный транспорт. Новую выразительную возможность иллюстрирует вариант, представленный на рис. 5, в, поскольку пассажир сначала перемещается на машине, а затем пересекается на общественный транспорт. В настоящей работе представляют интерес именно такие маршруты, поскольку теперь появляется возможность моделировать выбор различных комбинаций видов транспорта и определять наиболее удовлетворяющие потребности пассажира маршруты.

Поскольку выбранный пассажиром мультимодальный маршрут прокладывается через дорожную сеть на карте, а мы знаем, на каком транспорте перемещался каждый пассажир в определенный момент, легко посчитать нагрузку, которую пассажир создает на ребро – участок транспортной системы.

Рассмотрим более сложный пример (рис. 6). В этом графе из вершин-источников А и С выезжают по 30 пассажиров, причем только по 20 из каждого источника выезжают на автобусах и по 10 на личных автомобилях. Однако

видно, что в этом случае узким местом является ребро (1, 2) – на него приходится 20 автомобилистов и 40 пассажиров общественного транспорта.

Важно понимать, что принцип работы модели в части выбора способа перемещения после добавления мультимодальных маршрутов не изменился. Поскольку основная цель – представление возможности модели учитывать мультимодальные маршруты, то не будем приводить детальное описание ранее опубликованных алгоритмов работы, а ограничимся укрупненным указанием шагов выполнения итераций. Выбор пассажира также определяется ожидаемой удовлетворенностью от поездки. Влияние удовлетворенности на выбор транспортных сервисов активно изучается (см., например, [9, 10]).

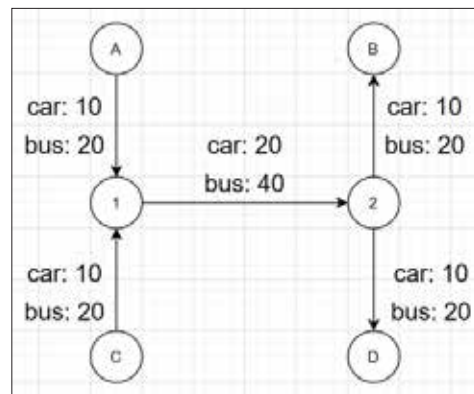


Рис. 6. Пример дорожной сети с узким местом

Укрупненное описание алгоритма итерации для мультимодальной маршрутной сети

Шаг 1. Выбрать следующий маршрут

Пассажиры по заданному алгоритму выбирают, каким маршрутом они будут перемещаться на работу. Для алгоритма Q-learning будет построена матрица выбора, в которой пассажиры выберут наилучший способ перемещения в зависимости от их текущего состояния.

Шаг 2. Оценить нагрузку

Транспортная система определяет нагрузку, создаваемую на транспортную сеть после выбора каждого из пассажиров, т.е. считает, сколько пассажиров и на каком транспорте проехало по каждому ребру системы. Результатом этого шага будет статистка по всему транспортному графу, где для каждого ребра определено, сколько машин, автобусов, трамваев, велосипедистов там находилось во время итерации.

Шаг 3. Оценить качество поездки

Теперь нужно определить уже не качество транспорта, как раньше, а так называемое совокупное качество поездки. Зная нагрузку на каждом ребре, можно посчитать, сколько дискомфорта доставил вид транспорта в тот момент, когда пассажир перемещался на нем.

Шаг 4. Описание алгоритма

Качество определяется для каждого пассажира отдельно. Поскольку уже известны нагрузка на каждом ребре в транспортной системе и, на чем перемещался пассажир по этим ребрам, то можно посчитать качество поездки на каждом ребре в зависимости от того, на каком транспорте перемещался пассажир. Затем посчитать среднее арифметическое полученного качества – это и будет качество всего маршрута.

Шаг 5. Пересчитать удовлетворенность

Основываясь на качестве последней поездки и среднем качестве по последним пяти поездкам, пассажир определяет свой уровень удовлетворенности последней поездкой.

Пример работы алгоритма

Алгоритм реализован в виде научного веб-сервиса с открытым доступом. Рассмотрим транспортную систему (рис. 7) с двумя точками-источниками (вершины 1 и 5), двумя точками-стоками (вершины 4 и 6) и ребром (2, 3), участвующим во всех возможных маршрутах, то есть играющим роль узкого места маршрутной сети. Пусть пассажиры из пункта 1 перемещаются в пункт 4, а пассажиры из пункта 5 перемещаются в пункт 6.

Рассмотрим результаты моделирования выбора видов транспорта на ста итерациях выбора. Из графиков видно, что пассажиров на личном транспорте на ребрах (1, 2) и (5, 2) (рис. 8, а и 8, в соответственно) гораздо больше, чем на ребре (2, 3) (рис. 8, б). Это объясняется тем, что ребро (2, 3) является узким местом в транспортной системе, поэтому пассажиры едут не на личном автомобиле или велосипеде, а на общественном транспорте. Разумеется, для пересадки пункты 2 и 3 должны быть обеспечены перехватывающими парковками.

Такое поведение пассажиров соответствует интуитивным представлениям о работе транспортной системы.

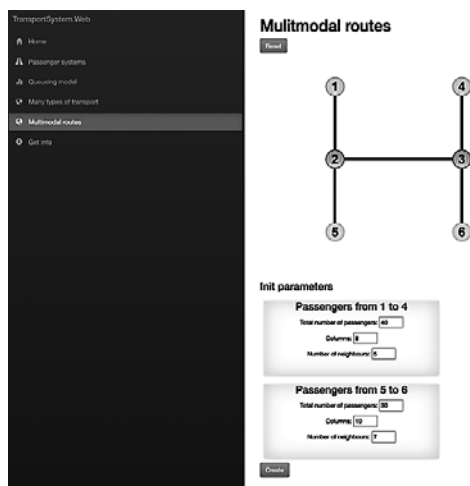
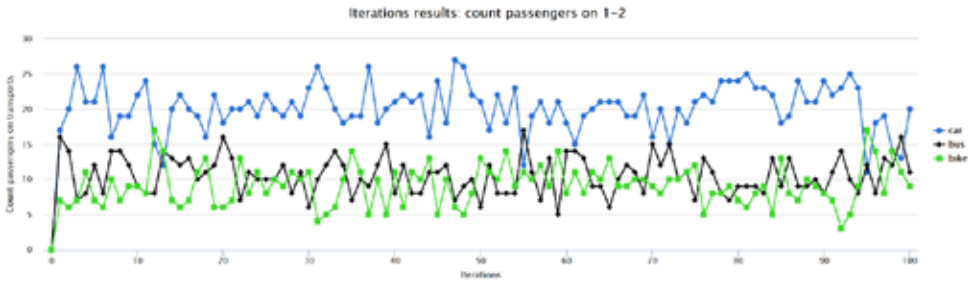


Рис. 7. Инициализация алгоритма

а)



б)



в)

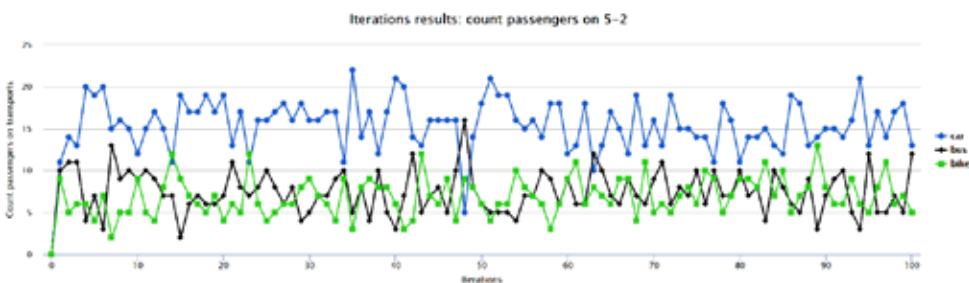


Рис. 8. Количество пассажиров для каждого вида транспорта
а – на ребре (1, 2); б – на ребре (2, 3); в – на ребре (5, 2)

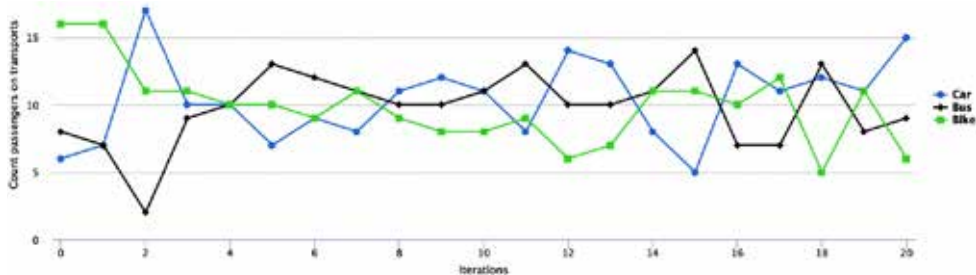
Отметим, что моделирование выбора вида транспорта осуществляется статистическими методами, что позволяет предсказать даже не наблюдаемые на исторических данных ситуации. Такая проблема описана, в частности, в [11]. Каждому пассажиру ставится в соответствие интеллектуальный агент, обучаемый с подкреплением [12]. Агент делает выбор только на основании собственного опыта и ограниченного обмена информацией с другими агентами. Ровно так же и пассажир не владеет данными по всей маршрутной сети и располагает

только собственными знаниями и некоторой информацией от знакомых.

В целом агенты в модели – суть «искусственные пассажиры» – ведут себя похоже на реальных пассажиров (рис. 9).

Пассажиры, выбирая вид транспорта, влияют на загруженность транспортной сети, тем самым воздействуя на качество поездки для себя и пассажиров-попутчиков. Например, на 15-й итерации пассажиры, выбравшие личный автомобиль, получили высокий уровень качества поездки из-за того, что автомобилем решили воспользоваться

а)



б)

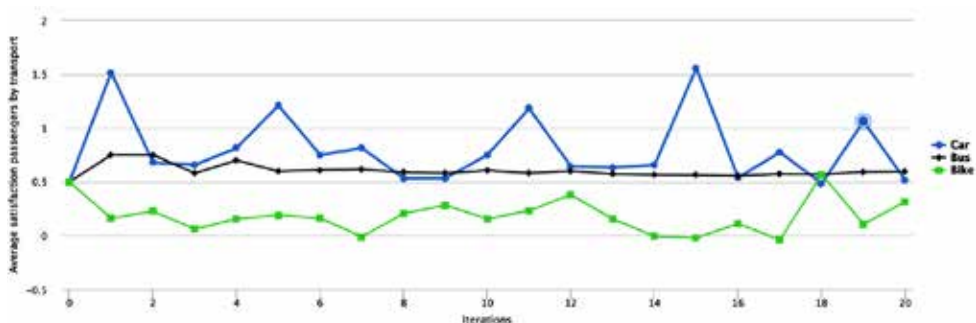


Рис. 9. Выбор пассажирами вида транспорта для поездки из пункта 5 в 2 (показаны двадцать итераций выбора)

а – количество пассажиров на каждом виде транспорта;

б – удовлетворенность пассажиров поездкой по маршруту

всего пять пассажиров, то есть оказались очень удовлетворены поездкой. Из-за этого на следующую итерацию эти пассажиры снова воспользовались личным автомобилем. Также автомобилем решили воспользоваться еще восемь пассажиров, узнавших, что в прошлую итерацию на дороге было мало машин, то есть можно получить лучшее качество, чем при поездке на автобусе. Но из-за этого нагрузка на УДС возросла, а поездка оказалась не настолько приятной, и уровень удовлетворенности автомобильным транспортом на 16-й итерации резко снизился. При этом, поскольку пассажиры постепенно узнают об опыте других пассажиров (в данном примере каждый пассажир передает информацию о своем опыте только семи пассажирам), то и на 17-й итерации нашлись пассажиры, которые

решили, что поездка на автомобиле принесет им большую удовлетворенность, чем на других видах транспорта.

Стоит также отметить, что после резких скачков удовлетворенности поездкой (см., например, итерации 5, 11, 15) наступает разочарование – резкое снижение удовлетворенности. То есть даже при неизменности маршрутной сети удовлетворенность пассажиров меняется, следовательно, варьируются и выбор транспорта, и нагрузка на маршрутную сеть. Это соответствует наблюдаемой натурно неоднородности пассажиропотоков.

Заключение

Предложенная модель учитывает мультимодальные маршруты. Она может работать не только с одной группой

пассажирами, моделируемой интеллектуальными агентами, направляющимися в один пункт, но и с произвольным количеством таких групп. Каждая группа влияет на всю транспортную систему. При этом опыт каждой отдельной группы не учитывается всеми остальными группами и не становится сразу известным другим группам, что соответствует поведению пассажиров в реальной жизни. Например, для одной группы людей, живущих рядом с метро, этот вид транспорта является идеальным. Другой группе, чтобы воспользоваться метро, необходимо пройти 25 минут до ближайшей станции. Эти пассажиры, скорее всего, предпочтут воспользоваться другим видом транспорта.

Модель позволяет смоделировать выбор и определить уровень удовлет-

воренности пассажиров на новой маршрутной сети или оценить влияние изменений на существующей, поскольку вместо статистического анализа используются методы обучения с подкреплением.

Получаемые результаты согласуются с наблюдаемыми свойствами пассажиропотоков. В частности, в модели сохраняются неоднородность пассажиропотоков и изменчивость удовлетворенности при фиксированной маршрутной сети.

В дальнейшем планируется расширить модель на случаи использования большего количества видов транспорта. Предполагается также исследовать влияние встречных потоков пассажиров и расширить выразительные возможности модели кольцевыми маршрутами. ■

Литература

1. Сизый С. В., Щичко А. В., Вихарев С. В. Организационные процессы в сетях с разделенными интересами: актуальность, постановка задачи, план исследования // Вестник УрГУПС, 2009. – № 1–2. – С. 34–42. ISSN 2079-0392.
2. Вихарев С. В., Сизый С. В., Сай В. М., Варанкина К. А. Организация содержания транспортной инфраструктуры в сетях с разделенными интересами с применением математической теории автоматов // Вестник УрГУПС, 2011. № 3 (11). С. 42–54. ISSN 2079-0392.
3. Вихарев С. В., Брусянин Д. А., Сеницын Е. В., Низовцева И. Г., [etc.] Адаптация к регулирующим изменениям в системах с разделенными интересами // Сб. докл. XI Международн. конф. «Российские регионы в фокусе перемен», 17–19 ноября 2016. – Екатеринбург : УрФУ. – Т. 1. С. 62–73.
4. Vikharev S., Mironov D., Brusyanin D., Nizovtseva I. Modelling quality switching on public transport by discrete series of queuing systems in shared interests network // The 9th International Conference Transport Problems 28–30 June 2017, Katowice, Poland. Conference proceedings. P. 87–93.
5. Vikharev S., Lyapustin M., Mironov D., Nizovtseva I., [etc.] Modeling of passengers' choice using intelligent agents with reinforcement learning in shared interests systems; a basic approach // Transport problems, 2019. № 2 (14), P. 43–53.
6. Ismail R., Hafezi M.H., Nor R.M. Passengers preference and satisfaction of public transport in Malaysia // Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2012. № 6 (8). P. 410–416.
7. Hwe S. K., Cheung R. K., Wan Y. Merging bus routes in Hong Kong central business district: Analysis and models // Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2006. № 10 (40) P. 918–935.
8. Van Lierop D., Badami M. G., El-Geneidy A. M. What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature // Routledge, 2018. № 1 (38). P. 52–72.
9. Wang C., Weng J., Chen, Z. A method of building bus satisfaction evaluation index system based on passengers' perception // American Society of Civil Engineers (ASCE), 2018. № 1 (2018). P. 4675–4683.
10. Weng J., Di X., Wang C. A bus service evaluation method from passenger's perspective based on satisfaction surveys: A case study of Beijing, China // Sustainability MDPI AG, 2018. № 8 (10). P. 16–23.

11. Vikharev S., Sinitsyn E., Brusyanin D. Economic and mathematical model for forecasting passenger traffic on a long-term basis. Case of study Russia // Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019. № 14 (3). P. 773–779.
12. Francois-Lavet V., Henderson P., Islam R. An Introduction to Deep Reinforcement Learning // Foundation and Trends in Machine Learning, 2019. № 3 (11). P. 156.

List of references

1. Sizy S. V., Shchichko A. V., Vikharev S. V. Organizational processes in networks with shared interests: relevance, problem statement, research plan // Herald of USURT [Organizatsionnye protsessy v setyakh s razdelennymi interesami: aktual'nost', postanovka zadachi, plan issledovaniya // Vestnik UrGUPS], 2009. – № 1–2. – Pp. 34–42. ISSN 2079-0392.
2. Vikharev S. V., Sizy S. V., Sai V. M., Varankina K. A. Organization of maintenance of transport infrastructure in networks with shared interests using the mathematical theory of automata // Herald of USURT [Organizatsiya soderzhaniya transportnoj infrastruktury v setyakh s razdelennymi interesami s primeneniem matematicheskoy teorii avtomatov // Vestnik UrGUPS], 2011. № 3 (11). Pp. 42–54. ISSN 2079-0392.
3. Vikharev S. V., Brusyanin D. A., Sinitsyn E. V., Nizovtseva I. G., [etc.] Adaptation to regulatory changes in systems with shared interests // Proceedings of XI International Conf. «Russian regions in the focus of change» [Adaptatsiya k reguliruyushhim izmeneniyam v sistemakh s razdelennymi interesami // Sbornik dokladov XI Mezhdunarodn. konferentsii «Rossijskie regiony v fokuse peremen»], November 17–19, 2016. – Yekaterinburg : UrFU. – Vol. 1. Pp. 62–73.
4. Vikharev S., Mironov D., Brusyanin D., Nizovtseva I. Modelling quality switching on public transport by discrete series of queuing systems in shared interests network // The 9th International Conference Transport Problems 28–30 June 2017, Katowice, Poland. Conference proceedings. P. 87–93.
5. Vikharev S., Lyapustin M., Mironov D., Nizovtseva I., [etc.] Modeling of passengers' choice using intelligent agents with reinforcement learning in shared interests systems; a basic approach // Transport problems, 2019. № 2 (14). P. 43–53.
6. Ismail R., Hafezi M. H., Nor R. M. Passengers preference and satisfaction of public transport in Malaysia // Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2012. № 6 (8). P. 410–416.
7. Hwe S. K., Cheung R. K., Wan Y. Merging bus routes in Hong Kong central business district: Analysis and models // Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2006. № 10 (40). P. 918–935.
8. Van Lierop D., Badami M. G., El-Geneidy A. M. What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature // Routledge, 2018. № 1 (38). P. 52–72.
9. Wang C., Weng J., Chen, Z. A method of building bus satisfaction evaluation index system based on passengers' perception // American Society of Civil Engineers (ASCE), 2018. №1 (2018). P. 4675–4683.
10. Weng J., Di X., Wang C. A bus service evaluation method from passenger's perspective based on satisfaction surveys: A case study of Beijing, China // Sustainability MDPI AG, 2018. № 8 (10). P. 16–23.
11. Vikharev S., Sinitsyn E., Brusyanin D. Economic and mathematical model for forecasting passenger traffic on a long-term basis. Case of study Russia // Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019. № 14 (3). P. 773–779.
12. Francois-Lavet V., Henderson P., Islam R. An Introduction to Deep Reinforcement Learning // Foundation and Trends in Machine Learning, 2019. № 3 (11). P. 156.

Статья сдана в редакцию 28 августа 2022 года

УДК 517.95+533.6

С. Л. Дерябин, А. П. Садов

Математическое моделирование течений самогравитирующегося газа с помощью нестационарных автомодельных переменных

UDC 517.95+533.6

S. L. Deryabin, A. P. Sadov

Mathematical modeling of self-gravitating gas flows using nonstationary self-similar variables

Аннотация

В работе рассматриваются одномерные изэнтропические одномерные течения идеального газа, гравитирующего по Ньютону. В качестве математической модели используется система уравнений газовой динамики с учетом действия гравитации по Ньютону. В системе уравнений газовой динамики вводится автомодельная особенность в переменную x , для полученной системы ставится задача Коши с данными на звуковой характеристике. Решение начально-краевой задачи строится в виде сходящегося степенного ряда. Часть коэффициентов ряда находится при решении алгебраических уравнений, остальные коэффициенты ряда – при интегрировании обыкновенных дифференциальных уравнений. Далее в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений выписывается закон движения границы «газ-вакуум». Полученные аналитические решения могут быть использованы для разработки новых аппроксимаций граничных и начальных условий для численного моделирования гравитационной волны разрежения на большой промежуток времени.

Ключевые слова: изэнтропические течения, идеальный газ, газовая динамика, начально-краевая задача, звуковая характеристика.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-15-22

Abstract

The paper considers one-dimensional isentropic flows of an ideal gas gravitating by Newton. As a mathematical model, the system of equations of gas dynamics is used, taking into account the effect of gravity according to Newton. In the system of gas dynamics equations, a self-similar feature is introduced into the variable x , and for the resulting system, the Cauchy problem with data on the sound characteristic is solved. The solution of the initial boundary value problem is constructed in the form of a convergent power series. Some of the coefficients of the series are found when solving algebraic equations, the rest of the coefficients of the series are found when integrating ordinary differential equations. Then, in the form of the system of ordinary differential equations, the law of motion of the gas-vacuum boundary is written out. The obtained analytical solutions can be used to develop new approximations of boundary and initial conditions for numerical simulation of a gravitational rarefaction wave for a long period of time.

Keywords: isentropic flows, ideal gas, gas dynamics, initial boundary value problem, sound characteristic.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-15-22

Статья рекомендована к публикации А. Н. Сесекиным, д-ром физ.-мат. наук, профессором; УрФУ. E-mail: sesekin@list.ru.

Сергей Львович Дерябин, д-р физ.-мат. наук, профессор; кафедра «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: sderyabin@usurt.ru. ORCID 0000-0003-3730-0966.

Алексей Павлович Садов, канд. физ.-мат. наук, доцент; кафедра «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: alsadov@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1504-4177.

© С. Л. Дерябин, А. П. Садов, 2022

The article is recommended for publishing A. N. Sesekin, Doctor of Physics and Mathematics. sciences, professor; UrFU. E-mail: sesekin@list.ru.

Sergey Lvovich Deryabin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; «Natural Sciences» Department of the Ural State University of Railway Transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: sderyabin@usurt.ru.

Alexey Pavlovich Sadov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor; «Natural Sciences» Department of the Ural State University of Railway Transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: alsadov@yandex.ru.

© S. L. Deryabin, A. P. Sadov, 2022

Введение

В работе рассматриваются самогравитирующие течения газа. Движение гравитирующего газового тела рассматривалось в [1, 2] как решение системы интегро-дифференциальных уравнений. Исследование этой системы позволило решить задачу о равновесной форме гравитирующей жидкой массы, вращающейся вокруг своей оси. При описании движения газовых масс, определяющих «звезду» в [3], использовалась одномерная система дифференциальных уравнений.

Среди задач об истечении газа в вакуум особое место занимает задача о распаде специального разрыва. Пусть поверхность Γ отделяет газ от вакуума. Если плотность газа по одну сторону от непроницаемой поверхности Γ строго больше нуля, а по другую – равна нулю, то говорят, что это задача о распаде специального разрыва. В начальный момент времени стенка Γ мгновенно разрушается и начинается истечение газа в вакуум.

При математическом моделировании течений, возникающих после взрыва сверхновой звезды, используется интегро-дифференциальная система уравнений газовой динамики и решается задача о распаде специального разрыва. Эту задачу удалось решить аналитическими методами для сферически- и цилиндрически-симметричного случаев [4–7]. Основное достоинство этих решений состоит в том, что удалось получить условия на границе «газ-вакуум». Однако само решение было построено в специальном функциональном пространстве. Это вызвало серьезные трудности для численного моделирования течений на большой промежуток времени.

В настоящей работе с помощью введения нестационарных автомодельных переменных решение задачи о распаде специального разрыва для сферически- и цилиндрически-симметричных течений самогравитирующего газа получено в явном виде в пространстве

исходных физических независимых переменных. Этот метод ранее использовался в [8–9].

Методы исследования

Объектом исследования в данной работе является характеристическая задача Коши. Теоремы существования и единственности решений таких задач приведены в [7]. Методология построения решений следующая. Выбирается нелинейная система дифференциальных уравнений, описывающая физические законы сохранения. Для нее с помощью аналитических функций задаются граничные и начальные условия. Доказывается локальная теорема существования и единственности решения поставленной начально-краевой задачи. Далее решение строится конструктивно в виде степенного ряда.

1. Постановка задачи

Пусть в момент $t = 0$ сфера или цилиндр Γ радиуса $R > 0$ отделяет политропный, гравитирующий по Ньютону газ от вакуума. Предполагается, что газ находится внутри полости, а снаружи – вакуум.

В момент $t = 0$ известны распределения параметров газа: $u = u_0(x)$ – скорость газа; $\rho = \rho_0(x)$ – плотность газа; x – расстояние до оси или центра симметрии. Функции $u_0(x)$, $\rho_0(x)$ предполагаются аналитическими, а плотность газа всюду больше нуля, в том числе и на границе Γ .

В момент $t = 0$ начинается движение газа, определяемое распределениями $u_0(x)$, $\rho_0(x)$, которое в дальнейшем будем называть фоновым течением.

Кроме этого, в момент $t = 0$ поверхность Γ мгновенно разрушается и возникает волна разрежения. С одной стороны она отделена от фонового течения границей Γ_1 , являющейся поверхностью слабого разрыва. С другой стороны волна разрежения примыкает к вакууму: $\rho_0(t, x)|_{\Gamma_0} = 0$, где Γ_0 – свободная поверхность, отделяющая волну разрежения

от вакуума. Требуется построить волну разрежения.

Сферически- и цилиндрически-симметричные течения самогравитирующего газа описываются системой [7]:

$$\begin{aligned} \rho_t + u\rho_x + \rho\left(u_x + v\frac{u}{x}\right) &= 0, \\ u_t + uu_x + \frac{1}{\rho}p_x &= F(t, x), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $F(t, x) = -2v\pi \frac{G}{x^v} \int_0^x r^v \rho(t, r) dr$.

Здесь p – давление, G – гравитационная постоянная, v – показатель симметрии ($v = 1$ – цилиндрическая, $v = 2$ – сферическая).

Для замыкания системы (1.1) необходимо задать уравнение состояния, определяющее термодинамическую природу газа. Для политропного

газа $p = \frac{\rho^\gamma}{\gamma}$, $\gamma = \text{const} > 1$. В этом случае скорость звука газа

$$c^2 = \frac{dp}{d\rho} = \rho^{\frac{\gamma-1}{2}}, \quad c_0(R) = c_{00} > 0.$$

В системе (1.1) введем новую неизвестную функцию $c = c(t, x)$ и получим систему

$$\begin{aligned} c_t + uc_x + \frac{\gamma-1}{2}c\left(u_x + v\frac{u}{x}\right) &= 0, \\ u_t + uu_x + \frac{2}{\gamma-1}cc_x &= F(t, x). \end{aligned} \quad (1.2)$$

Дифференцируя F по t и x и учитывая уравнение непрерывности, получим два дифференциальных уравнения для функции F :

$$\begin{aligned} F_t &= 2v\pi Gc^{\frac{2}{\gamma-1}}u, \\ F_x &= -\frac{v}{x}F - 2v\pi Gc^{\frac{2}{\gamma-1}}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Доказывается, что получившаяся система (1.2), (1.3) совместна.

Далее решается задача Коши с начальными данными

$$\begin{aligned} c|_{t=0} &= c_0(x), \quad u|_{t=0} = u_0(x), \\ F|_{t=0} &= F_0(x) = -2v\pi \frac{G}{x^v} \int_0^x r^v \rho_0(r) dr. \end{aligned}$$

Это решение является фоновым течением.

Заметим, что $F_0(x)$ есть аналитическая функция. При этом сила F направлена к центру симметрии, и тогда $F_0(R) = -F_{00}$, $F_{00} > 0$. Также будет предполагаться, что $u_0(R) = u_{00} \geq 0$.

Поскольку система (1.2), (1.3) является аналитической и начальные данные – аналитические функции, то задача Коши имеет при малых t аналитическое решение [7]. Далее фоновое течение задается формулами:

$$c = c^0(t, x), \quad u = u^0(t, x), \quad F = F^0(t, x).$$

Зная фоновое течение, по стандартной методике [7] получено уравнение звуковой характеристики Γ_1 как решение задачи Коши

$$\frac{dx}{dt} = u^0(t, x) - c^0(t, x), \quad x(0) = R. \quad (1.4)$$

Задача (1.4) имеет решение в виде ряда

$$\begin{aligned} x &= x_1(t) = R + (u_{00} - c_{00})t + \\ &+ (u_t^0 - c_t^0)\frac{t^2}{2} + \dots = R + tx_2(t). \end{aligned}$$

Здесь $x_2(t)$ – аналитическая функция.

Условия на характеристике Γ_1 будут иметь вид

$$\begin{aligned} c|_{\Gamma_1} &= c^0(t, x_1(t)), \quad u|_{\Gamma_1} = u^0(t, x_1(t)), \\ F|_{\Gamma_1} &= F^0(t, x_1(t)). \end{aligned} \quad (1.5)$$

В системе (1.2)–(1.3) введем нестационарные автомодельные переменные по следующим формулам:

$$t = t', \quad y = \frac{x - R}{t}.$$

В результате такой замены получим систему:

$$\begin{aligned} &tc_t + (u - y)c_y + \\ &+ \frac{\gamma - 1}{2}c \left(u_y + vt \frac{u}{R + ty} \right) = 0, \\ &tu_t + (u - y)u_y + \\ &+ \frac{2}{\gamma - 1}cc_y = tF(t, R + ty), \\ &F_t + y \frac{v}{R + ty} F = 2v\pi G(u - y)c_0^{\frac{2}{\gamma - 1}}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

В новых переменных характеристика Γ_1 имеет вид

$$\begin{aligned} y = x_2(t) &= u_{00} - c_{00} + \\ &+ \frac{1}{2}(u_t^0(0, R) - c_t^0(0, R))t + \dots \end{aligned}$$

Условия на характеристике Γ_1 запишутся в виде

$$\begin{aligned} c|_{\Gamma_1} &= c^0(t, x_2(t)), \quad u|_{\Gamma_1} = u^0(t, x_2(t)), \\ F|_{\Gamma_1} &= F^0(t, x_2(t)). \end{aligned} \quad (1.7)$$

2. Построение решения в физическом пространстве

Построим формальное решение задачи (1.6), (1.7) в виде ряда по степеням t :

$$f(t, y) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(y) \frac{t^k}{k!}, \quad f = \{c, u, F\}. \quad (2.1)$$

В системе (1.5) положим $t = 0$, получим

$$\begin{aligned} (u_0 - y)c_{0y} + \frac{\gamma - 1}{2}c_0u_{0y} &= 0, \\ (u_0 - y)u_{0y} + \frac{2}{\gamma - 1}c_0c_{0y} &= 0, \\ F_1 &= -y \frac{v}{R} F_0 + 2v\pi G(u_0 - y)c_0^{\frac{2}{\gamma - 1}}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Ненулевое решение дифференциальной части системы (2.2) получается,

если определитель $\Delta = (u - y)^2 - c_0^2 = 0$, то есть $(u_0 - y)^2 = c_0^2$ или

$$u_0 - y = -c_0. \quad (2.3)$$

Подставляя $u_0 - y$ во второе уравнение системы (2.2), будем иметь

$$u_{0y} = \frac{2}{\gamma - 1}c_{0y}.$$

Интегрируя уравнение, имеем

$$u_0 = \frac{2}{\gamma - 1}c_0 + D.$$

Произвольную постоянную D определим из условий (1.7), получим

$$u_0 = \frac{2}{\gamma - 1}c_0 + u_{00} - \frac{2}{\gamma - 1}c_{00}.$$

Тогда из соотношения (2.3) имеем

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{1}{2\alpha} \left(y + \frac{2}{\gamma - 1}c_{00} - u_{00} \right), \quad 2\alpha = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}, \\ u_0 &= \frac{2}{\gamma + 1} \left(y + \frac{\gamma - 1}{2}u_{00} - c_{00} \right). \end{aligned}$$

Также справедливы соотношения

$$c_{0y} = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}, \quad u_{0y} = \frac{2}{\gamma + 1}. \quad (2.4)$$

Систему (1.6) проинтегрируем k раз по t , положим $t = 0$ и с учетом (2.3), (2.4) будем иметь

$$\begin{aligned} &-c_0c_{ky} + \frac{\gamma - 1}{2}c_0u_{ky} + \\ &+ \left(k + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) c_k + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} u_k = Q_{1k}(y), \\ &+ c_0c_{ky} - \frac{\gamma - 1}{2}c_0u_{ky} + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} c_k + \\ &+ \left(\frac{\gamma - 1}{2}k + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) u_k = Q_{2k}(y), \\ &F_{k+1} = -y \frac{v}{R} F_k + 2v\pi G u_k c_0^{\frac{2}{\gamma - 1}} + \\ &+ 2v\pi G u_0 c_k^{\frac{2}{\gamma - 1}} + Q_{3k}(y). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Здесь $Q_{1k}(y)$, $Q_{2k}(y)$, $Q_{3k}(y)$ – функции, известным образом зависящие от уже найденных коэффициентов ряда (2.1).

Складывая первые два уравнения системы (2.5), получаем

$$\begin{aligned} \frac{\gamma-1}{2} \left(k + \frac{4}{\gamma+1} \right) u_k - \left(k + 2 \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) c_k = \\ = Q_{1k}(y) + Q_{2k}(y) = Q_k(y). \end{aligned}$$

Из этого соотношения находим

$$\begin{aligned} u_k = - \frac{(2k+4)\gamma+2k-4}{(k\gamma+k+4)(\gamma-1)} c_k + \\ + \frac{2\gamma+2}{k\gamma+k+4} Q_k(y), \\ u_{ky} = - \frac{(2k+4)\gamma+2k-4}{(k\gamma+k+4)(\gamma-1)} c_{ky} + \\ + \frac{2\gamma+2}{k\gamma+k+4} Q_{ky}(y). \end{aligned}$$

Подставляя u_k , u_{ky} во второе уравнение системы (2.5), имеем

$$\begin{aligned} c_0 \left(1 + \frac{(k+2)\gamma+k-2}{k\gamma+k+4} \right) c_{ky} + \\ + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \left(1 - \frac{(k\gamma+k+2)((k+2)\gamma+k-2)}{(k\gamma+k+4)(\gamma-1)} \right) c_k = \\ = Q_{2k}(y) + \frac{2\gamma+2}{k\gamma+k+4} c_0 Q_k(y) + \\ + \frac{2(k\gamma+k+2)}{k\gamma+k+4} Q_{ky}(y) = Q_k^+(y). \end{aligned}$$

После преобразований имеем

$$2c_0 c_{ky} - k c_k = \frac{1}{2\alpha} \frac{k\gamma+k+4}{k+1} Q_k^+(y).$$

Подставляя c_0 , получаем

$$\begin{aligned} \left(y + \frac{2}{\gamma-1} c_{00} - u_{00} \right) c_{ky} - \alpha k c_k = \\ = \frac{k\gamma+k+4}{4(k+1)} Q_k^+(y) = P_k(y). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Интегрируя уравнение (2.6), имеем

$$\begin{aligned} c_k = \left(y + \frac{2}{\gamma-1} c_{00} - u_{00} \right)^{\alpha k} \times \\ \times \left(c_{k0} + \int P_k(y) \left(y + \frac{2}{\gamma-1} c_{00} - u_{00} \right)^{-\alpha k-1} dy \right). \end{aligned}$$

Произвольные постоянные c_{k0} определяются из условий (1.7). Для этого в ряды (2.1) подставим

$$c = c^0(t, x_1(t)), \quad y = x_2(t).$$

Имеем

$$c(t, x_2(t)) = c^0(t, x_1(t)).$$

Дифференцируя это соотношение по t , подставляя $t = 0$, получим алгебраические уравнения для определения c_{k0} :

$$\left(\frac{3-\gamma}{\gamma-1} c_{00} \right)^{\alpha k} \cdot c_{k0} = Q_k.$$

Здесь Q_k известная постоянная. Поскольку $c_{00} \neq 0$, то c_{k0} определяются однозначно. Таким образом, ряд (2.1) задает формальное решение задачи (1.6), (1.7).

Справедлива следующая

Теорема. Ряд (2.1) локально сходится в окрестности точки $(t = 0, x = R)$.

С помощью простейших преобразований решение (2.1) восстанавливается в физическом пространстве переменных t, x .

$$c = c \left(t, \frac{x-R}{t} \right), \quad u = u \left(t, \frac{x-R}{t} \right). \quad (2.7)$$

Заметим, что построенное решение (2.7) позволяет получить аппроксимацию начальных условий в момент времени $t = t_0$ в виде начальных отрезков ряда. Также условия (1.7) дают аппроксимацию граничных условий на поверхности Γ_1 . В то же время использование построенных решений для аппроксимации граничных условий на поверхности Γ_0 представляет большие трудности.

3. Закон движения границы «газ-вакуум»

В системе (1.2)–(1.3) вводятся новые независимые переменные

$$t = t', \quad z = x - x_0(t),$$

где $x = x_0(t)$ – неизвестный закон движения Γ_0 границы «газ-вакуум» ($c|_{\Gamma_0} = 0$).

Производные пересчитываются по формулам

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z}, \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t'} - x_{0t} \frac{\partial}{\partial z}.$$

В дальнейшем штрих опускается.

В новых переменных граница «газ-вакуум» задается уравнением $z = 0$. В результате получаем систему:

$$\begin{aligned} c_t + (u - x_{0t})c_z + \\ + \frac{\gamma - 1}{2}c \left(u_z + v \frac{u}{z + x_0(t)} \right) &= 0, \\ u_t + (u - x_{0t})u_z + \frac{2}{\gamma - 1}cc_z &= \\ = F(t, z + x_0(t)), \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} F_t - x_{0t}F_z &= 2v\pi Gc^{\frac{2}{\gamma-1}}u, \\ F_z &= -\frac{v}{z + x_0(t)}F - 2v\pi Gc^{\frac{2}{\gamma-1}}. \end{aligned}$$

Подставляя F_z из четвертого уравнения системы (3.1) в третье, будем иметь

$$\begin{aligned} c_t + (u - x_{0t})c_z + \\ + \frac{\gamma - 1}{2}c \left(u_z + v \frac{u}{z + x_0(t)} \right) &= 0, \\ u_t + (u - x_{0t})u_z + \frac{2}{\gamma - 1}cc_z &= \\ = F(t, z + x_0(t)), \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} F_t + x_{0t} \frac{v}{z + x_0(t)} F &= \\ = 2v\pi Gc^{\frac{2}{\gamma-1}}(u - x_{0t}). \end{aligned}$$

В системе (3.2) положим $z = 0$, получим

$$\begin{aligned} (u_0 - x_{0t})c_{0z} &= 0, \\ u_{0t} + (u_0 - x_{0t})u_{0z} &= F(t, x_0(t)), \\ F_t + \frac{vx_{0t}}{x_0(t)}F &= 0. \end{aligned}$$

Будем предполагать, что после распада специального разрыва производные c_z , u_z ограничены. В результате получаем систему, решения которой задают закон движения Γ_0 и граничные условия на ней:

$$\begin{aligned} x_{0t} &= u_0, \\ u_{0t} &= F(t, x_0(t)), \\ F_{0t} + \frac{vx_{0t}}{x_0(t)}F_0 &= 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

с начальными условиями

$$x_0(0) = R, \quad u_0(0) = u_{00}, \quad F_0(0) = -F_{00}. \quad (3.4)$$

Преобразуя первые два уравнения системы (3.3) и интегрируя третье уравнение при учете условий (3.4), имеем

$$\begin{aligned} x_{0tt} &= -F_{00} \left(\frac{R}{x_0(t)} \right)^v, \\ u_{0t} &= -F_{00} \left(\frac{R}{x_0(t)} \right)^v, \\ F_0 &= -F_{00} \left(\frac{R}{x_0(t)} \right)^v. \end{aligned} \quad (3.5)$$

В случае цилиндрически-симметричных течений $v = 1$ и система (3.5) имеет вид

$$\begin{aligned} x_{0tt} &= -RF_{00} \frac{1}{x_0}, \\ u_{0t} &= -RF_{00} \frac{1}{x_0}, \\ F_0 &= -RF_{00} \frac{1}{x_0}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

В случае сферически симметричных течений $v = 2$ и система (3.5) имеет вид

$$\begin{aligned}x_{0tt} &= -R^2 F_{00} \frac{1}{x_0^2}, \\u_{0t} &= -R^2 F_{00} \frac{1}{x_0^2}, \\F_0 &= -R^2 F_{00} \frac{1}{x_0^2}.\end{aligned}\quad (3.7)$$

После интегрирования имеем:

$$\begin{aligned}u_0(t) &= \sqrt{u_{00}^2 - 2RF_{00} \ln \frac{x_0(t)}{R}}, \quad v = 1, \\u_0(t) &= \sqrt{u_{00}^2 - 2RF_{00} + 2R^2 F_{00} \frac{1}{x_0(t)}}, \quad v = 2.\end{aligned}$$

Для получения условий на границе «газ-вакуум» для численного моделирования гравитационной волны разрежения на большой промежуток времени необходимо системы (3.6), (3.7) исследовать численными методами.

Результаты и обсуждения

Ранее задачи о распаде специального разрыва решались в пространстве новых независимых переменных, введенных специальным образом [9]. При этом в пространстве исходных

физических переменных законы движения поверхностей Γ_0 , Γ_1 определялись в явном виде. Но чтобы в какой-либо момент времени $t = t_0$ определить значения газодинамических параметров в пространстве физических переменных, необходимо было обращать неявно заданные функции. Эта процедура достаточно громоздка и трудна для задания начальных данных между поверхностями Γ_0 и Γ_1 в момент $t = t_0 > 0$. В настоящей работе для преодоления трудности обращения неявно заданных функций задача решена с помощью введения нестационарных автомодельных переменных.

Выводы

1. В виде сходящегося ряда получены начальные условия в момент времени $t = t_0$.

2. В виде сходящегося ряда получены граничные условия на границе волны разрежения и фонового течения.

3. В виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений выписан закон движения границы «газ-вакуум».

Таким образом, выполнено аналитическое исследование для дальнейшего численного моделирования течения, возникшего после распада специального разрыва на большой промежуток времени. ■

Литература

1. Ламб Г. Гидродинамика. М.-Л. : ОГИЗ, 1947. 928 с.
2. Лихтенштейн Л. Фигуры равновесия вращающейся жидкости. М. : Наука, 1973. 252 с.
3. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М. : Наука, 1987. 432 с.
4. Дерябин С. Л., Чуев Н. П. Сферически-симметричное истечение самогравитирующего идеального газа в вакуум // Прикладная математика и механика. 1994. – Т. 58. – Вып. 2. – С. 77–84. ISSN 0032-8235.
5. Дерябин С. Л. Одномерное истечение самогравитирующего идеального газа в вакуум // Вычислительные технологии. 2003. – Т. 8. – № 4. – С. 32–44. ISSN 1560-7534.
6. Дерябин С. Л., Мезенцев А. В. Одномерное истечение в вакуум нормального газа гравитирующего по Ньютону // Вычислительные технологии. 2009. – Т. 14. – № 3. – С. 25–36. ISSN 1560-7534.
7. Баутин С. П., Дерябин С. Л. Математическое моделирование истечения идеального газа в вакуум. Новосибирск : Наука, 2005. 390 с. ISBN 5-02-032505-8.
8. Дерябин С. Л., Кирьянова А. С. Построение двумерных течений в физическом пространстве, возникающих после распада специального разрыва // Вычислительные технологии. 2020. – Т. 25. – № 4. – С. 4–19. ISSN 1560-7534.

9. Баутин С. П., Дерябин С. Л. Использование нестационарных автомодельных переменных для решения трехмерной задачи о распаде специального разрыва // Вычислительные технологии. 2021. – Т. 26. – № 5. – С. 52–61. ISSN 1560-7534.

List of references

1. Lamb G. Hydrodynamics. M.-L. : OGIZ [Gidrodinamika. M.-L. : OGIZ], 1947. 928 p.
2. Lichtenstein L. The equilibrium figures of a rotating fluid. M. : Nauka [Figury ravnovesiya vrashhayushheysya zhidkosti. M. : Nauka], 1973. 252 p.
3. Sedov L. I. Methods of similarity and dimension in mechanics. M. : Nauka [Metody podobiya i razmernosti v mekhanike. M. : Nauka], 1987. 432 p.
4. Deryabin S. L., Chuev N. P. Spherically symmetric outflow of a self-gravitating ideal gas into a vacuum // Applied Mathematics and Mechanics [Sfericheski-simmetrichnoe istechenie samogravitiruyushhego ideal'nogo gaza v vakuum // Prikladnaya matematika i mekhanika]. 1994. – Vol. 58. – Issue 2. – Pp. 77–84. ISSN 0032-8235.
5. Deryabin S. L. One-dimensional outflow of a self-gravitating ideal gas into a vacuum // Computational Technologies [Odnomernoe istechenie samogravitiruyushhego ideal'nogo gaza v vakuum // Vychislitel'nye tekhnologii]. 2003. – Vol. 8. – № 4. – pp. 32–44. ISSN 1560-7534.
6. Deryabin S. L., Mezentsev A. V. One-dimensional outflow of a normal gas gravitating by Newton into a vacuum // Computational technologies [Odnomernoe istechenie v vakuum normal'nogo gaza gravitiruyushhego po N'yutonu // Vychislitel'nye tekhnologii]. 2009. – Vol. 14. – № 3. – Pp. 25–36. ISSN 1560-7534.
7. Bautin S. P., Deryabin S. L. Mathematical modeling of the outflow of an ideal gas into a vacuum. Novosibirsk : Nauka [Matematicheskoe modelirovanie istecheniya ideal'nogo gaza v vakuum. Novosibirsk : Nauka], 2005. 390 p. ISBN 5-02-032505-8.
8. Deryabin S. L., Kiryanova A. S. Construction of two-dimensional flows in physical space arising after decay of a special gap // Computational Technologies [Postroenie dvumernykh techenij v fizicheskom prostranstve, vznikayushhikh posle raspada spetsial'nogo razryva // Vychislitel'nye tekhnologii]. 2020. – Vol. 25. – № 4. – Pp. 4–19. ISSN 1560-7534.
9. Bautin S. P., Deryabin S. L. The use of nonstationary self-similar variables for solving the three-dimensional problem of decay of a special gap // Computational technologies [Ispol'zovanie nestatsionarnykh avtomodel'nykh peremennykh dlya resheniya trekhmernoj zadachi o raspade spetsial'nogo razryva // Vychislitel'nye tekhnologii]. 2021. – Vol. 26. – № 5. – Pp. 52–61. ISSN 1560-7534.

Статья сдана в редакцию 11 сентября 2022 года

УДК 656.212:519.872.5

А. Л. Казаков, М. Л. Жарков, А. В. Супруновский

О моделировании трансграничных российско-монгольских железнодорожных перевозок

UDC 656.212:519.872.5

A. L. Kazakov, M. L. Zharkov, A. V. Suprunovskiy

On modeling of cross-border russian-mongolian railway transportation**Аннотация**

Статья посвящена математическому моделированию трансграничных железнодорожных перевозок между Россией и Монголией. В качестве объекта исследования выбран участок пути от станции Наушки (Россия) до станции Сухэ-Батор (Монголия), на котором имеется пакетное движение и выполняются таможенные функции с пассажирскими и грузовыми поездами. В статье построена математическая модель движения транспорта по этому участку. Она имеет вид сети массового обслужива-

ния с групповым обслуживанием заявок. Поступление пакетов поездов с разных направлений описывается с помощью нескольких ВМАР (Branch Markovian Arrival Process) потоков. Применение этого математического аппарата позволяет учесть различные параметры работы станций и путей между ними, а также случайные факторы, оказывающие значительное влияние на перевозочный процесс. Для исследования полученной математической модели использовались численные методы, в частности, имитационное моделирование. С его

помощью проведены два вычислительных эксперимента с текущим и максимальным плановым поездопотоком. На основе полученных результатов установлено узкое место в структуре системы и оценены способы увеличения ее пропускной способности.

Ключевые слова: трансграничные железнодорожные перевозки, транспортный поток, математическая модель, теория массового обслуживания, вычислительный эксперимент.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-23-32

Статья рекомендована к публикации М. Б. Петровым, д-ром техн. наук, руководителем Центра развития и размещения производительных сил Института экономики УрО РАН. E-mail: michpetrov@mail.ru.

Александр Леонидович Казаков, д-р. физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник; Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН, кафедра «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения; г. Иркутск, Россия. E-mail: kazakov@icc.ru ORCID 0000-0002-3047-1650.

Максим Леонидович Жарков, канд. техн. наук, научный сотрудник; Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН; г. Иркутск, Россия. E-mail: zharkm@mail.ru ORCID 0000-0003-4981-338X.

Антон Викторович Супруновский, старший преподаватель; кафедра «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения; г. Иркутск, Россия. E-mail: as.irgups@gmail.com ORCID 0000-0001-8356-4271.

© А. Л. Казаков, М. Л. Жарков, А. В. Супруновский, 2022

The article is recommended for publishing by M. B. Petrov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Center for the Development and Placement of Productive Forces of the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: michpetrov@mail.ru.

Alexander Leonidovich Kazakov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher; V. M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS, Department of Operational Work Management, Irkutsk State University of Railway Engineering; Irkutsk, Russia. E-mail: kazakov@icc.ru ORCID 0000-0002-3047-1650.

Maxim Leonidovich Zharkov, Candidate of Technical Sciences, Researcher; V. M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS; Irkutsk, Russia. E-mail: zharkm@mail.ru ORCID 0000-0003-4981-338X.

Anton Viktorovich Suprunovskiy, Senior Lecturer; Department of «Operational Work Management» of Irkutsk State University of Railway Transport; Irkutsk, Russia. E-mail: as.irgups@gmail.com ORCID 0000-0001-8356-4271.

© A. L. Kazakov, M. L. Zharkov, A. V. Suprunovskiy, 2022

Abstract

The article is devoted to mathematical modeling of cross-border railway transportation between Russia and Mongolia. As the object of the study, a section of the railway track from the station of Naushki (Russia) to the station of Sukhbaatar (Mongolia) was selected, on which there is package traffic and customs functions are performed with passenger and freight trains. The article presents a mathematical model of traffic on this section. It has the form of a queuing network with

group service of applications. The arrival of train packages from different directions is described using several BMAP (Branch Markovian Arrival Process) streams. The use of this mathematical apparatus makes it possible to take into account various parameters of the operation of stations and tracks between them, as well as random factors which have a significant impact on the transportation process. Numerical methods, in particular, simulation modeling, were used to study the resulting mathematical

model. By means of that, two computational experiments were carried out with the current and maximum planned train traffic. Based on the results obtained, a bottleneck in the system structure was identified and ways to increase its throughput were evaluated.

Keywords: cross-border railway transportation, traffic flow, mathematical model, queuing theory, computational experiment.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-23-32

В настоящее время Россия переориентирует цепи поставок с Европы на Азию, прежде всего на Китай [1]. В первую очередь это касается железнодорожных перевозок как наиболее экономически выгодных в соотношении «скорость/цена» на дальних расстояниях [2]. Кратчайший маршрут из Центральной России в Северо-Восточный Китай проходит через территорию Монголии и включает в себя Трансмонгольскую железную дорогу (Трансмонгольскую магистраль, ТМЖД), которая соединяет российский г. Улан-Удэ и китайский г. Тяньцзинь. Общая протяженность ТМЖД составляет 2215 км, причем половина (1108 км) проходит по территории Монголии (рис. 1) [3].



Рис. 1. Трансмонгольская железная дорога

Проблематика, связанная с трансграничными российско-монгольскими железнодорожными перевозками, обычно рассматривается в научной литературе в контексте транспортных коридоров между Россией и Китаем [4] или даже более широко – между Европой и Северо-Восточной Азией [5]. Последняя работа особенно интересна, поскольку в ней представлены взгляды китайской стороны. Между тем, товарооборот между Россией и Монголией, несмотря на резкое падение после распада СССР и ликвидации СЭВ, продолжает сохраняться на достаточно высоком уровне и даже в предпандемийные годы имел тенденцию к росту [6]. Но зачастую этот аспект не учитывается при исследовании железнодорожных перевозок через территорию Монголии, в лучшем случае проводится качественный анализ экономических показателей [6, 7]. С другой стороны, при разработке планов реконструкции ТМЖД прогнозирование транспортных потоков обычно сводится к построению линейного тренда [8].

Авторам не удалось найти в научной литературе работ, которые были бы посвящены математическому моделированию трансграничных российско-монгольских перевозок. Но глубокий научный анализ технико-экономической проблемы подобного уровня

без использования современного математического и программно-алгоритмического аппарата чрезвычайно сложен, если не невозможен.

Монгольская часть ТМЖД не электрифицирована и имеет однопутную систему движения [8], что не характерно для российских железных дорог. При этом из-за скачкообразных изменений цепей поставок (из-за пандемии COVID-19 [4], влияния геополитических факторов и т.п.) структура поездопотоков и их объемы подвержены значительным и резким колебаниям. При столь сложном сочетании неблагоприятных факторов для эффективного прогнозирования и планирования перевозок необходимо учитывать случайные факторы.

Рассмотрим участок пути от станции Наушки (Россия) до станции Сухэ-Батор (Монголия), от которого зависит пропускная способность ТМЖД. Обе станции расположены около границы и на них осуществляются таможенные функции. На этих объектах используется пакетное движение поездов из-за однопутной системы движения на ТМЖД [8]. Под «пакетом» понимается группа от одного до четырех поездов, следующих друг за другом с относительно небольшим интервалом времени.

На железнодорожном транспорте чаще применяются оптимизационные математические модели [2, 9–12]. В частности, при решении задач оптимизации специалисты находят абсолютную пропускную способность железнодорожных систем [2, 9, 13]. Однако в реальности последняя достижима далеко не во всех случаях, поскольку такие модели строятся для идеальных условий функционирования системы. Поэтому необходимо использовать вероятностные модели [9, 10, 13].

Для долгосрочного прогнозирования работы железнодорожного транспорта в условиях неопределенности [2, 14] применяются модели, основанные на методах теории массового обслуживания (ТМО), в частности, на сетях массового обслуживания (СеМО) [15].

СеМО оказались удобными для описания частей железнодорожной сети [16], развязок и крупных станций [17, 18]. Именно на основе такого подхода нами разработана методика моделирования работы как отдельных сортировочных железнодорожных станций [19, 20], так и участка железнодорожной сети [21].

В настоящей работе созданный авторами подход применяется для моделирования движения поездов по участкам железной дороги с пакетным движением поездов, причем используется несколько независимых ВМАР [20] для описания поступления пакетов поездов с различных направлений. Получаемые модели сложны для аналитического исследования, поэтому для их анализа применяются численные методы, в частности, статистическое и имитационное моделирование [22].

По объему выполняемых работ станции Наушки и Сухэ-Батор являются внеклассными (рис. 2).

Станция Наушки состоит из приемо-отправочного парка (ПОП), грузового двора и досмотрового парка. ПОП включает 13 путей, из которых два – главный ход, два предназначены для приема и пропуска пассажирских поездов и девять – для обработки грузовых поездов. В парке работает одна бригада обслуживания поездов, состоящая из одной группы технического осмотра и одной группы таможенного. Обработка грузовых поездов в ПОП по станции Наушки – 180–280 мин (в среднем 230 мин), из которых 100–120 мин приходится на таможенные операции. Обработка пассажирских поездов по станции Наушки – 90–110 мин. Грузовой двор включает шесть путей, на которых может быть размещен один поезд. Среднее время его обработки составляет одни сутки. Досмотровый парк включает пять путей, из них один – главный ход, остальные предназначены для отстоя вагонов и таможенного осмотра. Как правило, этот парк практически не влияет на работу станции, поэтому далее в модели мы его не учитываем.

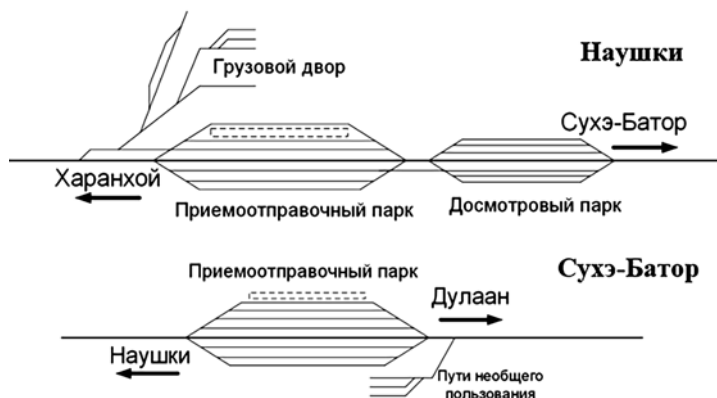


Рис. 2. Схема железнодорожного участка Наушки – Сухэ-Батор

Станция Сухэ-Батор состоит из одного парка (23 пути). Первые три пути предназначены для пассажирских поездов. Прием и отправление грузовых поездов осуществляется на путях с 4 по 12. Пути 13 и 14 – главный ход, 15–23 – погрузочно-разгрузочные пути. Технический и таможенный осмотр поездов выполняется одной бригадой, как и на станции Наушки.

Среднее время хода от станции Наушки до Сухэ-Батор – 45 мин. Минимальный интервал между отправляемыми поездами в пакете составляет 18 мин.

Поездотоки. Количество пассажирских поездов на Монголию – 3-4 поезда в сутки и столько же обратно. Максимально по графику из России на станцию Наушки можно отправить 16 грузовых поездов (и столько же обратно), со станции Наушки до станции Сухэ-Батор – 12. Фактически же по стыку Наушки – Сухэ-Батор в настоящее время следуют семь-восемь грузовых поездов в сутки в каждом направлении. Поезда прибывают пакетами, как правило, их максимальный размер составляет четыре поезда. Средний размер пакета для направления Россия – Монголия составляет 2,75 поездов, обратно – 2,59.

Построение модели выбранного объекта происходит в три этапа: 1) описание входящих поездотоков, 2) моделирование работы инфраструктурных

элементов, 3) учет в модели маршрутов движения поездов в системе и других ее особенностей [21].

Математическое описание входящих поездотоков

Поезда поступают с двух направлений, каждое из которых описывается с помощью отдельного ВМАР-потока. Под заявкой понимается весь поезд целиком. Тогда группа заявок – это один пакет поездов. Примем, что его размер описывается биномиальным распределением $B(4, 0,69)$, где первый параметр (число испытаний) равен максимальному размеру пакета, а второй (вероятность успеха) подобран так, чтобы среднее значение этой случайной величины соответствовало среднему размеру пакета. Интенсивность поступления пакетов – 4 в сутки, или 0,17 в час. Тогда ВМАР-потоки будут задаваться матрицами

$$\begin{aligned} D_{R0} &= (-0,170), D_{R1} = (0,0140), \\ D_{R2} &= (0,0464), D_{R3} = (0,0692), \\ D_{R4} &= (0,0374); \\ D_{M0} &= (-0,170), D_{M1} = (0,0194), \\ D_{M2} &= (0,0539), D_{M3} = (0,0665), \\ D_{M4} &= (0,0302), \end{aligned} \quad (1)$$

где D_{Ri} – поездоток из России; D_{Mi} – из Монголии.

Математическое описание функционирования структурных элементов

Каждый элемент рассматриваемого железнодорожного участка в зависимости от типа описывается одной или более системами массового обслуживания (СМО, или узлы).

Приемоотправочный парк на ст. Наушки принимает/отправляет поезда с двух направлений, поэтому каждый парк описывается двумя многоканальными СМО без очереди (узлы 1 и 2). Их каналы моделируют работу путей. Время обслуживания в канале описывается нормальным распределением и соответствует времени обработки поезда бригадой: для пассажирских $N(100; 3)$, для грузовых – $N(230; 16)$. Первый параметр (математическое ожидание) соответствует среднему времени обслуживания соответствующего поезда, второй (ср. квадратическое отклонение) подобран по правилу трех сигм. Здесь и далее все параметры измеряются в минутах.

Грузовой двор на станции Наушки может вместить лишь один поезд, поэтому его работа описывается одноканальной СМО без очереди (узел 3). Распределение времени обслуживания в канале $N(1440; 180)$.

По единственному железнодорожному пути между станциями поезда следуют в двух направлениях. Для описания его функционирования используются две одноканальные СМО без очереди и с групповым обслуживанием (узлы 4 и 5). Размер группы соответствует максимальному размеру «пачки». Среднее время обслуживания в этих СМО увеличено в два раза по сравнению с фактическим временем движения пакета по данному пути, тогда распределение времени обслуживания в каналах узлов 4 и 5 будет $N(87; 10)$.

Станция Сухэ-Батор имеет только один ПОП, в составе которого входят погрузочно-разгрузочные пути. Они применяются для обслуживания местного поездопотока. Нам не удалось найти

в открытых источниках данных об их использовании, поэтому в модели их не учитываем. Работу остальных путей ПОП моделируем двумя многоканальными СМО без очереди (узлы 6 и 7). Время обслуживания пассажирских поездов описывается $N(100; 3)$, грузовых – $N(230; 16)$.

Таким образом, структурные элементы железнодорожного участка Наушки – Сухэ-Батор мы описываем семью узлами. К ним добавим еще два фиктивных узла, которые выступают в качестве источников потоков заявок: узел 0 для ВМАР-1, узел 8 для ВМАР-2. Формальное описание модели имеет следующий вид:

узел 0 – источник ВМАР-1;

узел 1 – ВМАР-1 /G/8/0 и узел 2 – */G/5/0 – описывают работу ПОП при станции Наушки в двух направлениях;

узел 3 – грузовой двор Наушки – */G/1/0;

узлы 4 и 5 – */G^X/1/0 – описывают работу пути между станциями;

узел 6 – */G/6/0 и узел 7 – ВМАР-2 /G/8/0 – ПОП при ст. Сухэ-Батор;

узел 8 – источник ВМАР-2.

Описание маршрутов движения поездов строится в виде матрицы. Она будет разреженной, поскольку поезда могут передвигаться между станциями только одному пути, следовательно, неинформативной. Поэтому маршрутную матрицу мы не приводим, а вероятности переходов между узлами представлены на рис. 3 в виде весов. В узлах СеМО применяются временные блокировки работы каналов для предотвращения потерь заявок между узлами.

Для численного исследования полученной математической модели авторами разработана имитационная модель работы СеМО в виде программного модуля на основе дискретно-событийного подхода к моделированию и методов Монте-Карло. Для программной реализации использовались среда Delphi EX8, язык программирования Object Pascal. Программный модуль предназначен для нахождения показателей эффективности выбранной СеМО.

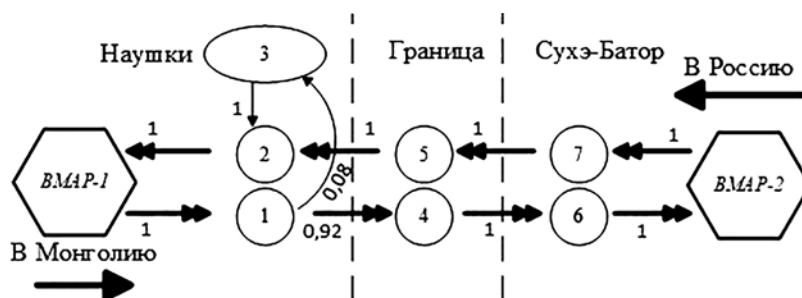


Рис. 3. Схема СеМО

В ней могут присутствовать до ста узлов и несколько независимых ВМАР-потоков. Число каналов и длина очереди различны для каждого узла. Каналы работают независимо друг от друга, возможны разные законы распределения времени обслуживания и размеров обслуживаемых групп заявок в каналах. Дополнительно программный модуль может отображать процесс работы СеМО в табличном виде и сохранять результаты в MS Excel.

Результаты двух модельных экспериментов представлены в таблицах 1 и 2. В каждой таблице отображены средние результаты за десять пусков имитационной модели. Виртуальное время каждого пуска составило 21 день. Это минимальное значение, за которое имитационная модель может вычислить показатели эффективности данной СеМО.

Модельный эксперимент 1. В таблице 1 представлены результаты исследования предложенной модели при поступлении восьми грузовых и трех

пассажирских поездов с каждого направления; поездопоток описывается матрицами (1).

Среднее время прохождения технического и таможенного контроля составляет чуть более 10 часов (узлы 1 и 7), основная часть из которых – ожидание бригады осмотра и освобождения пути между станциями. Этот временной промежуток – узкое место, что можно видеть по максимальному значению коэффициента занятости каналов в узлах 4 и 5 по отношению к данному параметру в узлах 1, 2, 6 и 7. Грузовой двор (узел 3) хоть и имеет наибольшие коэффициент занятости каналов и среднее время в узле, но практически не влияет на систему в целом, так как объем поездопотока здесь незначительный. В предложенной модели не учитывается наличие диспетчерского управления, поэтому вероятность отказа мы интерпретируем как процент остановки поездов на соседних станциях из-за занятости путей на станциях Наушки

Таблица 1

Результаты эксперимента 1

Поступило	Групп	Заявок	Отказ.	Групп	Заявок	Вероят. отказа	0,057
	167,25	467,38		8,00	26,75		
Характеристика узлов	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7
Коэф. занятости каналов	0,21	0,26	0,78	0,39	0,41	0,18	0,21
Ср. время в узле (мин)	613,32	233,36	1521,22	58,42	56,78	212,13	639,85
Сумм. кол-во заявок в узле	222,38	168,75	15,38	203,75	217,13	156,13	218,25
Ср. вр. блокировки одной заявки (мин)	26,31	—	3,20	0,19	2,89	—	30,34

или Сухэ-Батор. В данном эксперименте 5,7 % поездов могут быть остановлены, что не является критическим значением.

Можно заключить, что железнодорожный участок Наушки – Сухэ-Батор имеет достаточную пропускную способность для текущего объема поездопотоков. Однако для пропуска максимального объема поездопотока (по графику суммарно 32 поезда) текущей производительности будет недостаточно, требуется увеличить число бригад на станциях и повысить среднюю скорость движения поездов по путям.

Модельный эксперимент 2. По сравнению с экспериментом 1, увеличим интенсивность поступления до 16 поездов в сутки с каждого направления (0,238 групп поездов в час), сократим время обслуживания грузовых поездов в каналах узлов 1, 2, 6 и 7 на 50 %, что соответствует добавлению по одной бригаде на рассматриваемых станциях, в узлах 4 и 5 снизим время обслуживания на 10 % и увеличим максимальный размер обслуживаемой группы заявок до 5. Результаты исследования обновленной модели представлены в таблице 2.

Увеличение числа бригад позволило сократить среднее время прохождения таможенного контроля на 28 %, но это слабо влияет на пропускную способность системы в целом. Для повышения пропускной способности участка Наушки – Сухэ-Батор (без существенных финансовых затрат) нужно увеличить

скорость движения поездов по нему. Но это не принесет существенной выгоды из-за конструктивных ограничений участка (прежде всего, однопутного движения). Таким образом, для эффективного увеличения пропускной способности данного участка требуется проведение мероприятий по его реконструкции, в числе которых могут быть постройка дополнительных разъездов, оборудование линии автоблокировкой, а в перспективе – строительство второго главного пути.

В ходе проведенных исследований была построена и численно исследована математическая модель, описывающая трансграничные железнодорожные перевозки между Россией и Монголией. Ее отличительной особенностью является то, что она имеет вид сети массового обслуживания, а не оптимизационной задачи, как это обычно бывает в подобных случаях. Применение этого математического аппарата позволяет учесть случайные факторы, которые в условиях хронических сбоев в логистических цепях поставок, характерных для последних двух лет, оказывают значительное влияние на перевозочный процесс.

Модель программно реализована, выполнен вычислительный эксперимент, позволивший сделать некоторые предварительные выводы. В частности, его результаты косвенно подтверждают мнение специалистов, что для развития ТМЖД необходима поэтапная реконструкция ее монгольской части [8],

Таблица 2

Результаты эксперимента 2

Поступило	Групп	Заявок	Отказано	Групп	Заявок	Вероят. отказа	0,070
	226,83	633,83		14,00	44,33		
Характеристика узлов	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7
Коэф. занятости каналов	0,20	0,28	0,83	0,42	0,43	0,21	0,19
Ср. время в узле (мин)	458,96	222,37	1528,01	45,02	44,47	213,64	445,10
Сумм. кол-во заявок в узле	299,17	189,67	16,33	280,83	289,00	181,17	289,67
Ср. вр. блокировки одной заявки (мин)	21,20	–	1,91	0,56	3,01	–	17,99

в противном случае увеличить объемы транзита Россия – Монголия – Китай будет чрезвычайно сложно.

Дальнейшие исследования связаны с построением на той же методической основе полной модели железнодорожного участка Наушки – Улан-Батор со

всеми действующими на нем станциями и далее – всей монгольской части ТМЖД. Это позволит определять участки, которые нуждаются в приоритетной реконструкции в условиях ограниченного финансирования. ■

Литература

1. О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 02.07.2021 № 400. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107030001> (дата обращения: 01.09.2022).
2. Морозов В. Н., Шапкин И. Н. Эффективные методы и модели управления процессами перевозок на железнодорожном транспорте (теория, практика, перспективы). М. : Финансы и статистика, 2019. 486 с. ISBN 978-5-00184-052-7.
3. Самуйлов В. М., Ткачева Т. Н., Калашников А. Е. Развитие проекта «Новый шелковый путь»: функционирование в период пандемии и рост контейнерных перевозок // Инновационный транспорт. 2021. № 2 (40). С. 8–13. ISSN 2311-164X.
4. Макаров А. В., Макарова Е. В., Андреев А. Б. Монгольский коридор: проблемы и перспективы развития транзитно-транспортной сети Монголии // ЭКО. 2020. № 10. С. 34–49. ISSN 0131-7652.
5. Чэнь Цюцзе. Современное состояние и проблемы развития трансграничных логистических маршрутов в Северо-Восточной Азии // Регионалистика. 2021. Т. 8. № 5. С. 18–27. eISSN 2313-0881.
6. Намжилова В. О. Российско-монгольские торгово-экономические отношения: дальнейшие перспективы // Регионалистика. 2021. Т. 8. № 1. С. 29–38. eISSN 2313-0881.
7. Национальные интересы России и Монголии в треугольнике Россия – Монголия – Китай: проблемы, противоречия и сценарии / В. В. Грайворонский, Т. Дорж, А. П. Суходолов [и др.]. Иркутск : «Развитие», 2021. 466 с. ISBN 978-5-6047137-0-9.
8. Батулин А. П., Балжир М. Выбор оптимального варианта развития Улан-Баторской железной дороги // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 2 (57). С. 154–165. ISSN 1992-3252.
9. Акулиничев В. М., Кудрявцев В. А., Корешков А. Н. Математические методы в эксплуатации железных дорог. М. : Транспорт, 1981. 223 с.
10. Поттгофф Г. Учение о транспортных потоках / Пер. с нем. В. И. Шейко, В. Н. Воскресенского ; под ред. Е. П. Нестерова. М. : Транспорт, 1975. 343 с.
11. Казаков А. Л., Лемперт А. А., Бухаров Д. С. Об одном численном методе решения некоторых задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 6 (53). С. 6–12. eISSN 2500-1590.
12. Брусянин Д. А., Казаков А. Л., Маслов А. М. Оптимизация региональной маршрутной сети междугородных и пригородных пассажирских перевозок с использованием логистических принципов // Транспорт Урала. 2012. № 1 (32). С. 106–109. ISSN 1815-9400.
13. Weik N., Nießen N. Quantifying the effects of running time variability on the capacity of rail corridors // J. Rail Transport Planning Management. 2019. V. 15. Pp. 100237. ISSN 2210-9706.
14. Казаков А. Л., Маслов А. М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 27–32. ISSN 1813-9108.
15. Medhi J. Stochastic Models in Queuing Theory. San Diego : Academic Press, 2002. 482 p. ISBN 0-12-487462-2.
16. Huisman T., Boucherie R. J., Van Dijk N. M. A solvable queueing network model for railway networks and its validation and applications for the Netherlands // European Journal Operational Research. 2002. V. 142. Pp. 30–51. ISSN 0377-2217.
17. Marinov M., Viegas J. A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations // Simulation Modelling Practice and Theory. 2009. V. 17. Issue 6. Pp. 1106–1129. ISSN 1569-190X.

18. Любченко А. А., Бартош С. В., Смирнов В. А., Castillo P. А. Дискретно-событийная модель железнодорожного узла в среде AnyLogic // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 3. С. 87–92. ISSN 2310-9793.
19. Жарков М. Л., Казаков А. Л., Супруновский А. В., Павидис М. М. Моделирование крупнейшей в мире железнодорожной сортировочной станции с использованием теории массового обслуживания // Вестник УрГУПС. 2021. № 3 (51). С. 4–14. ISSN 2079-0392.
20. Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of railway stations based on queuing networks // Applied Sciences (Switzerland). 2021. V. 11 (5). 2425. eISSN 2076-3417.
21. Жарков М. Л., Супруновский А. В. О моделировании железнодорожных узлов на основе теории массового обслуживания // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 1 (25). С. 120–132. ISSN 2413-0133.
22. Кельтон В., Лой А. Имитационное моделирование. Классика CS. СПб : Питер, 2004. 847 с. ISBN 5-94723-981-7.

List of references

1. On the National Security Strategy of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation No. 400 dated 02.07.2021 [O Strategii natsional'noj bezopasnosti Rossijskoj Federatsii: Ukaz Prezidenta RF ot 02.07.2021 № 400]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107030001> (accessed on: 01.09.2022).
2. Morozov V. N., Shapkin I. N. Effective methods and models of management of transportation processes in railway transport (theory, practice, prospects) [Ehffektivnye metody i modeli upravleniya protsessami perevozok na zheleznodorozhnom transporte (teoriya, praktika, perspektivy)]. M. : Finansy i statistika]. M. : Finance and Statistics, 2019. 486 p. ISBN 978-5-00184-052-7.
3. Samuylov V. M., Tkacheva T. N., Kalashnikov A. E. Development of the New Silk Road project: functioning during the pandemic and the growth of container transportation // Innovative Transport [Razvitie proekta «Novyj shelkovyj put'» : funktsionirovanie v period pandemii i rost kontejnernykh perevozok // Innovatsionnyj transport]. 2021. № 2 (40). Pp. 8–13. ISSN 2311-164X.
4. Makarov A. V., Makarova E. V., Andreyev A. B. The Mongolian corridor: problems and prospects of development of the transit and transport network of Mongolia // ECO [Mongol'skij koridor: problemy i perspektivy razvitiya tranzitno-transportnoj seti Mongolii // EKO]. 2020. № 10. Pp. 34–49. ISSN 0131-7652.
5. Chen Qiujie. Current state and problems of development of cross-border logistics routes in Northeast Asia // Regionalism [Sovremennoe sostoyanie i problemy razvitiya transgranichnykh logisticheskikh marshrutov v Severo-Vostochnoj Azii // Regionalistika]. 2021. Vol. 8. № 5. Pp. 18–27. eISSN 2313-0881.
6. Namzhilova V. O. Russian-Mongolian trade and economic relations: Far Eastern prospects // Regionalism [Rossijsko-mongol'skie torgovo-ehkonomicheskie otnosheniya: dal'nevostochnye perspektivy // Regionalistika]. 2021. Vol. 8. № 1. Pp. 29–38. eISSN 2313-0881.
7. National interests of Russia and Mongolia in the triangle Russia – Mongolia – China: problems, contradictions and scenarios / V. V. Grayvoronsky, T. Dorzh, A. P. Sukhodolov [et al.]. Irkutsk: «Razvitie» [Natsional'nye interesy Rossii i Mongolii v treugol'nike Rossiya – Mongoliya – Kitaj: problemy, protivorechiya i stsennarii / V. V. Grayvoronskij, T. Dorzh, A. P. Sukhodolov [i dr.]. Irkutsk : «Razvitie», 2021. 466 p. ISBN 978-5-6047137-0-9.
8. Baturin A. P., Balzhir M. Choosing the optimal option for the development of the Ulaanbaatar railway // Mir transporta [Vybor optimal'nogo varianta razvitiya Ulan-Batorskoj zheleznoj dorogi // Mir transporta]. 2015. Vol. 13. № 2 (57). Pp. 154–165. ISSN 1992-3252.
9. Akulinichev V. M., Kudryavtsev V. A., Koreshkov A. N. Mathematical methods in the operation of railways. M. : Transport [Matematicheskie metody v ehkspluatatsii zheleznykh dorog. M. : Transport], 1981. 223 p.
10. Potthoff G. The doctrine of transport flows / Translated from German by V. I. Sheiko, V. N. Voskresensky ; edited by E. P. Nesterov. M. : Transport [Uchenie o transportnykh potokakh / Perevod s nemetskogo V. I. Shejko, V. N. Voskresenskogo ; pod red. E. P. Nesterova. M. : Transport], 1975. 343 p.
11. Kazakov A. L., Lempert A. A., Bukharov D. S. On numerical method for solving some optimization problems arising in transport logistics // Bulletin of the Irkutsk State Technical University [Ob odnom chislennom metode resheniya nekotorykh zadach optimizatsii,

- voznikayushhikh v transportnoj logistike // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2011. № 6 (53). Pp. 6–12. eISSN 2500-1590.
12. Brusyanin D. A., Kazakov A. L., Maslov A. M. Optimization of the regional route network of intercity and suburban passenger transportation using logistic principles // Transport of the Urals [Optimizatsiya regional'noj marshrutnoj seti mezhdugorodnykh i prigorodnykh passazhirsikh perevozok s ispol'zovaniem logisticheskikh printsipov // Transport Urala]. 2012. № 1 (32). Pp. 106–109. ISSN 1815-9400.
 13. Weik N., Nießen N. Quantifying the effects of running time variability on the capacity of rail corridors // J. Rail Transport Planning Management. 2019. V. 15. Pp. 100237. ISSN 2210-9706.
 14. Kazakov A. L., Maslov A. M. Constructing a model of uneven traffic flow on the example of a railway freight station // Modern technologies. System analysis. Modeling [Postroenie modeli neravnomernogo transportnogo potoka na primere zheleznodorozhnoj gruzovoj stantsii // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie]. 2009. № 3 (23). Pp. 27–32. ISSN 1813-9108.
 15. Medhi J. Stochastic Models in Queuing Theory. San Diego : Academic Press, 2002. 482 p. ISBN 0-12-487462-2.
 16. Huisman T., Boucherie R. J., Van Dijk N. M. A solvable queuing network model for railway networks and its validation and applications for the Netherlands // European Journal Operational Research. 2002. V. 142. Pp. 30–51. ISSN 0377-2217.
 17. Marinov M., Viegas J. A simulation modeling methodology for evaluating flat-shunted yard operations // Simulation Modeling Practice and Theory. 2009. V. 17. Issue 6. Pp. 1106–1129. ISSN 1569-190X.
 18. Lyubchenko A. A., Bartosh S. V., Smirnov V. A., Castillo P. A. Discrete-event model of a railway junction in AnyLogic environment // Dynamics of systems, mechanisms and machines [Diskretno-sobytnaya model' zheleznodorozhnogo uzla v srede AnyLogic // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin]. 2016. № 3. Pp. 87–92. ISSN 2310-9793.
 19. Zharkov M. L., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V., Pavlidis M. M. Modeling of the world's largest railway marshalling yard using queuing theory // Herald of USURT [Modelirovanie krupnejshej v mire zheleznodorozhnoj sortirovochnoj stantsii s ispol'zovaniem teorii massovogo obsluzhivaniya // Vestnik UrGUPS]. 2021. № 3 (51). C. 4–14. ISSN 2079-0392.
 20. Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of railway stations based on queuing networks // Applied Sciences (Switzerland). 2021. V. 11 (5). 2425. eISSN 2076-3417.
 21. Zharkov M. L., Suprunovsky A. V. On modeling railway junctions based on the theory of queuing // Information and mathematical technologies in science and management [O modelirovanii zheleznodorozhnykh uzlov na osnove teorii massovogo obsluzhivaniya // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii]. 2022. № 1 (25). Pp. 120–132. ISSN 2413-0133.
 22. Kelton V., Low A. Simulation modeling. Classic CS. St. Petersburg : Peter [Imitatsionnoe modelirovanie. Klassika CS. SPb : Piter], 2004. 847 p. ISBN 5-94723-981-7.

Статья сдана в редакцию 1 сентября 2022 года

А. А. Маркина Л. А. Почуев

Проработка концепции автомобиля с гибридной силовой установкой

A. A. Markina L. A. Pochuev

Elaboration of the concept of a car with a hybrid power plant

Аннотация

Жители крупных городов сильно страдают от загрязняющих атмосферу веществ, значительная доля которых приходится на автомобильный транспорт. Для решения этой проблемы автопроизводители модернизируют двигатели внутреннего сгорания, проектируют альтернативные силовые установки.

В настоящей статье проведен анализ различных современных силовых установок, выделены их сильные и слабые стороны. Представлены статистические данные, демонстрирующие рост производства и продаж электромобилей и гибридных автомобилей в России и за рубежом.

Автомобили, оснащаемые традиционными двигателями внутреннего сгорания (ДВС), обладают уникальными преимуществами и на сегодняшний день занимают более 99 % мирового автопарка. На основании анализа сформирована схема гибридной силовой установки (ГСУ), сочетающей компоненты силовых установок электромобилей и ДВС. Описаны основные элементы установки, их компоновка в автомобиле. Представлена принципиальная схема трансмиссии, перечислены ее составляющие и описана их работа.

Схема ГСУ разработана в рамках концепции автомобиля, соответствующего тенденциям современного автомобилестроения. При этом автомобиль предполагает возможность спортивного вождения, обладает хорошими динамическими показателями.

Ключевые слова: современные силовые установки электромобилей, гибридная силовая установка, электромобиль, компоновка агрегатов, трансмиссия гибридного автомобиля.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-33-42

Abstract

Residents of large cities suffer greatly from air pollutants, a significant proportion of which is accounted for the road transport. In order to solve this issue, car manufacturers are upgrading internal combustion engines, designing alternative engine units.

This article analyzes various modern engine units, highlights their strengths and weaknesses. Statistical data demonstrating the growth of production and sales of electric and hybrid vehicles in Russia and abroad are presented.

Cars equipped with traditional internal combustion engines (ICE) have unique advantages and today make more than 99 % of the global fleet. Based on the analysis, a scheme of a hybrid power plant (HPP) was formed, combining the components of engine units of electric vehicles and internal combustion engines. The main elements of installation and their layout in the car are described. A schematic diagram of a transmission is presented, its components are listed and their operation is described.

The HPP scheme was developed within the framework of the concept of a motor vehicle corresponding to the trends of modern automotive industry. At the same time, such cars provide the opportunity of sport driving experience, have good dynamic performance.

Keywords: modern engine units of cars, hybrid engine unit, electric vehicle, layout of units, transmission of a hybrid car.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-33-42

Статья рекомендована к публикации Е. Ю. Кузнецовой, д-ром экон. наук; УрФУ. E-mail: e.y.kuznetsova@urfu.ru.

Анастасия Александровна Маркина, канд. техн. наук, кафедра «Подъемно-транспортные машины и роботы» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина; Екатеринбург, Россия. E-mail: aa.markina@urfu.ru. ORCID 0000-0002-0461-9543.

Леонид Андреевич Почуев, аспирант кафедры «Подъемно-транспортные машины и роботы» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина; Екатеринбург, Россия. E-mail: Ss.Ljazo.sS@gmail.com. ORCID 0000-0002-0844-7646.

© А. А. Маркина, Л. А. Почуев, 2022

The article is recommended for publishing by E. Y. Kuznetsova, Doctor of Economics; UrFU. E-mail: e.y.kuznetsova@urfu.ru.

Anastasia Alexandrovna Markina, Candidate of Technical Sciences, Department of «Lifting and Transport Machines and Robots» of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; Yekaterinburg, Russia. E-mail: aa.markina@urfu.ru. ORCID 0000-0002-0461-9543.

Leonid Andreyevich Pochuev, Postgraduate student of the Department of Lifting and Transport Machines and Robots of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; Yekaterinburg, Russia. E-mail: Ss.Ljazo.sS@gmail.com. ORCID 0000-0002-0844-7646.

© А. А. Маркина, Л. А. Почуев, 2022

На начало 2022 г. в России зарегистрировано более 60 млн транспортных средств, из которых более 45,5 млн – легковые автомобили [1, 2] (рис. 1).

Вопрос оценки выброса загрязняющих веществ в окружающую среду автомобильным транспортом и их влияние на экологическое благополучие описан многими исследователями [3–6]; одним из актуальных направлений исследования остается изучение влияния темпов автомобилизации на экологическую обстановку в крупных населенных пунктах [7, 8].

В 2019 г. Россия ратифицировала Парижское соглашение, цель которого – снижение парниковых газов до уровня 70–75 % относительно показателей 1990 г. По данным Росстата и Росприроднадзора, совокупный объем выбросов загрязняющих атмосферу веществ от передвижных источников в 2020 г. составил 5,137 млн т – самый низкий показатель с 2010 г. [9]. Повышение экологических стандартов вносит положительный вклад в снижение количества вредных выбросов автомобильным транспортом. Соответствие последнему экологическому стандарту вынуждает автопроизводителей применять технические решения, снижающие ресурс, мощность и коэффициент полезного действия силовой установки.

В 2021 г. выбросы загрязняющих атмосферу веществ от автомобильного

транспорта сократились более чем в три раза [9] (рис. 2).

Для снижения негативного экологического воздействия автотранспорта без ущерба основным технико-экономическим показателям могут быть использованы: а) альтернативные источники энергии, б) новые конструкторско-технологические решения в допроизводственном и производственном цикле, в) управление эксплуатационными режимами [10–12]. Эффективность первого значительна, однако требует вложения больших ресурсов, в том числе на этапе НИОКР, при том, что многие из известных технологий не могут быть использованы серийно. Тем не менее за последние десять лет на автомобильном рынке значительно возросло количество электро- и гибридных автомобилей, что связано не только с их более высокими экологическими показателями, но и скоростными. Количество проданных электромобилей за 2021 г. в сравнении с 2020-м, выросло с 3,24 до 6,75 млн [13]. Самые распространенные источники питания для электромобилей – это водородный генератор или тяговая батарея. Очень популярны автомобили с большими тяговыми аккумуляторными батареями (рис. 3).

В России в 2021 г. продано 2254 электромобиля, что в 3,1 раза больше, чем годом ранее (рис. 4) [14]. За 2021 г. в три раза увеличилось количество гибридных автомобилей.

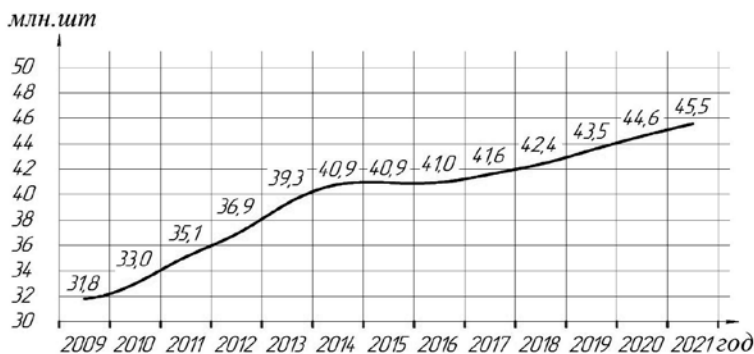


Рис. 1. Количество легковых автомобилей в России

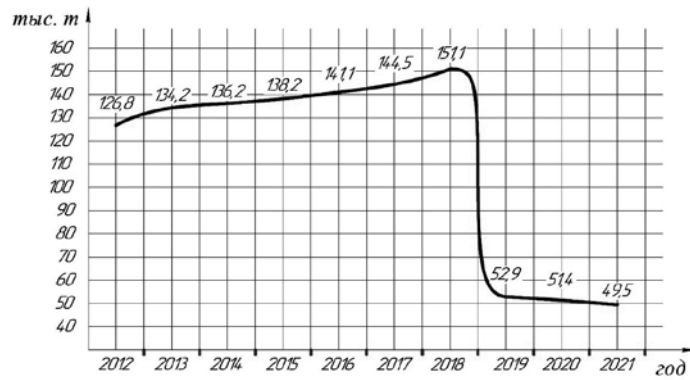


Рис. 2. Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от автомобилей



Рис. 3. Статистика мировых продаж электромобилей

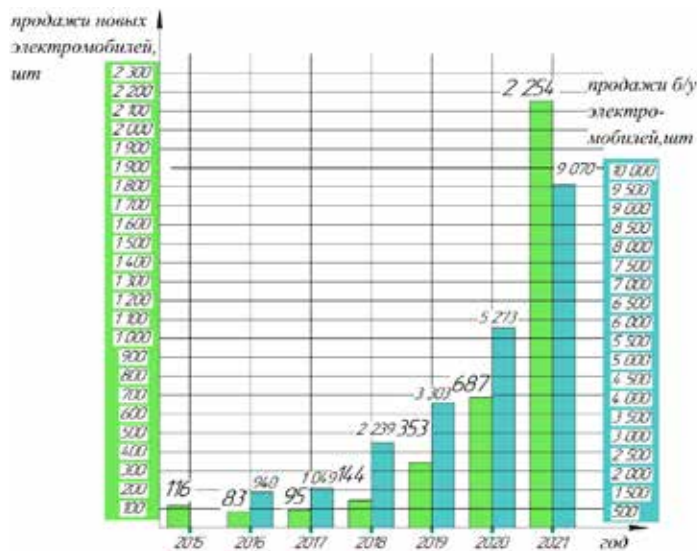


Рис. 4. Продажи новых и б/у электромобилей в России

Если в начале XXI в. ставка делалась на развитие гибридного транспорта, а электромобили казались далекой перспективой, то сегодня акцент сделан

именно на электрический транспорт. Однако количественное преимущество остаётся за автомобилями с двигателями внутреннего сгорания (таблица 1).

Таблица 1

Сравнение различных силовых установок		
	Сильные стороны	Слабые стороны
Автомобили с ДВС	<p>Большой запас хода и быстрое его пополнение</p> <p>Возможность эксплуатации в широком диапазоне температур окружающей среды</p> <p>Низкая масса автомобиля</p> <p>Понятные и доступные широкому кругу специалистов процессы производства, эксплуатации и ремонта автомобилей</p> <p>Большая дальность хода при езде с постоянной скоростью</p>	<p>Шум и вибрации при работе двигателя</p> <p>Высокий расход топлива при движении с частыми разгонами и торможениями</p> <p>Требуется периодическое техническое обслуживание</p> <p>Низкий КПД двигателя</p> <p>Высокая стоимость топлива</p>
Электромобили с водородным электрогенератором	<p>Отсутствие шумов и вибраций при работе, а также доступность 100%-ного крутящего момента с самых низких оборотов двигателя</p> <p>Низкий вес системы, особенно в сравнении с электромобилями с аккумуляторными батареями</p> <p>Высокая дальность хода</p> <p>Высокая экологичность технологии уже в текущем варианте реализации</p> <p>Простота и надежность системы в сравнении с автомобилями с традиционными ДВС</p>	<p>Дорогое сложное оборудование</p> <p>Для добычи водорода чаще всего используют сжигание углеводородов, при этом выделяется большое количество углекислого газа</p> <p>Низкая эффективность доставки топлива до потребителя (около 30–35 % потерь)</p> <p>Более дорогой и сложный процесс распространения инфраструктуры в сравнении с классическим электромобилем</p> <p>Высокая стоимость водородного топлива в сравнении с электроэнергией на 1 км пути</p>
Электромобили с тяговыми аккумуляторными батареями	<p>Простота конструкции и минимальное число движущихся деталей благодаря простому двигателю и трансмиссии</p> <p>Отсутствие шумов и вибраций при работе</p> <p>Доступность 100%-ного крутящего момента с самых низких оборотов двигателя</p> <p>Низкий центр тяжести и идеальный баланс шасси автомобиля</p> <p>Не требует частого технического обслуживания</p> <p>Высокий показатель пассивной безопасности</p> <p>Отсутствие вредных продуктов горения ископаемого топлива</p> <p>Возможность пополнить заряд АКБ от розетки 220 V</p> <p>Возможность возврата части энергии, затраченной при разгоне, во время торможения</p> <p>Дешевизна электроэнергии в сравнении с другими видами топлива</p>	<p>Высокий вес аккумуляторных батарей</p> <p>Небольшой запас хода на одной зарядке</p> <p>Долгий процесс восполнения заряда АКБ</p> <p>Слабо развитая инфраструктура, в частности, сеть быстрых зарядных станций</p> <p>Большой урон экологии из-за вредного производства аккумуляторных батарей, а также существующих процессов их утилизации</p>

В качестве основы для дальнейшей разработки выберем последовательно-параллельную гибридную силовую установку.

Предлагается разработать компоновочную и принципиальную схемы трансмиссии автомобиля, ориентированного на спортивное вождение, в соответствии с тенденциями современного автомобилестроения, связанными с экономией топлива, снижением выбросов в городах. При движении по трассе действует ДВС и используется передний привод. ДВС должен быть связан с мотором/генератором, что позволит эффективно рекуперировать энергию во время торможения, поскольку большие тормозные усилия приходятся на переднюю ось автомобилей.

Для динамичного режима движения автомобиль должен иметь привод на заднюю ось, поэтому задние колеса приводятся во вращение двумя электродвигателями, что позволяет реализовать векторизацию тяги. Большой диапазон рабочих оборотов позволяет упростить трансмиссию, отказаться от сложного, менее эффективного дифференциала. Электродвигатели как нельзя лучше подходят для динамичной езды, обеспечивают намного более быстрый отклик на педаль акселератора в сравнении с ДВС и развивают высокую мощность с низких оборотов. Так происходит связь всех колес с электродвигателями, что позволит реализовать полный привод при разгонах и тяжелых дорожных условиях.

В качестве прототипа двигателя внутреннего сгорания принимается двигатель концерна Volkswagen TDI 2.0 (DFBA) EA 288. Стартер и генератор заменяет спаренный с ДВС электродвигатель. Электродвигатели на задней оси – асинхронные, трехфазные с короткозамкнутой обмоткой (АДКР). Электродвигатель на передней оси работает как двигатель при запуске ДВС, но зачастую будет использоваться в качестве генератора. В режиме генератора он будет работать, получая мощность и крутящий момент от ДВС или

от передних колес в период торможения автомобиля. Для более точного управления будем использовать синхронный электродвигатель с обмотками возбуждения ротора.

Предполагается использовать литий-железо-фосфатные ячейки в форме тонких параллелепипедальных пакетов модели LT-LFP 72 (энергоемкий) отечественной компании «Лиотех». Для обеспечения минимального момента инерции автомобиля при прохождении поворотов наиболее массивные компоненты (ДВС, АКБ, электродвигатели, инверторы) располагаются по возможности ближе к центру масс.

Гибридная силовая установка (ГСУ) позволяет значительно упростить трансмиссию, не использовать многоступенчатые коробки передач; для снижения потерь энергии в различных режимах движения и возможности совместной и раздельной работы двигателей необходимо предусмотреть различные элементы трансмиссии.

Опишем работу элементов силовой установки, основываясь на схеме ГСУ с увеличенными элементами (рис. 5).

Передняя часть СУ представляет собой ДВС 1 и генератор 4, задняя – два больших электродвигателя 9. Дифференциал встроен в двухступенчатый понижающий редуктор 5. С гидротрансформатором 2 эти компоненты находятся в корпусе передней трансмиссии. Планетарный дифференциал 3 служит для создания и разрыва механической связи генератора 4 и редуктора 5. При включении пакета фрикционных 3/2 водило блокируется, обеспечивая передачу крутящего момента от коронной 3/2 на солнечную шестерню 3/1 – вал генератора 4. Таким образом, крутящий момент может передаваться от редуктора 5 к генератору 4 и обратно. При включении пакета фрикционных 3/2 водило разблокируется, при этом останавливается солнечная шестерня 3/3. Так обеспечивается возможность передачи крутящего момента от ДВС 1 на колеса через редуктор 5 без затрат энергии на работу генератора.

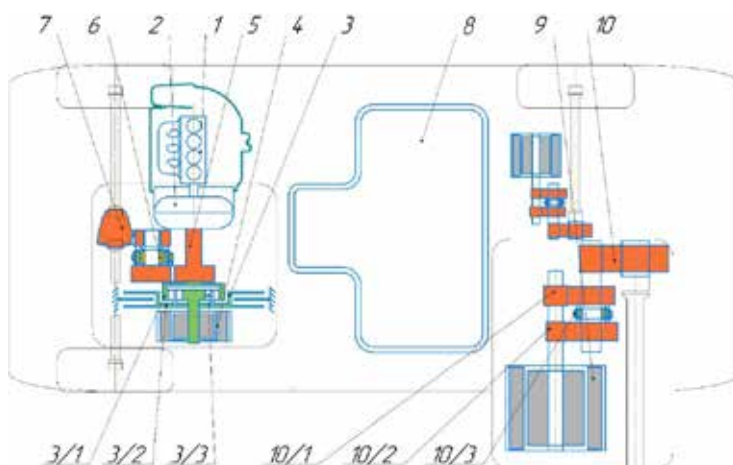


Рис. 5. Схема силовой установки с увеличенными элементами

1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – гидротрансформатор; 3 – планетарный повышающий редуктор генератора; 4 – генератор на передней оси; 5 – двухступенчатый цилиндрический редуктор передней оси; 6 – муфта редуктора; 7 – дифференциал передней оси; 8 – аккумуляторная батарея; 9 – электродвигатели задних колес; 10 – двухступенчатая трансмиссия заднего колеса. Позициями 3/1, 3/2, 3/3 отмечены элементы планетарного дифференциала 3; 10/1, 10/2, 10/3 – элементы трансмиссии 10 заднего колеса

Муфта 6 при включении передает крутящий момент от ДВС 1 на колеса, а крутящий момент от колес – к генератору 4 при блокировке пакета фрикционов 3/2 при заглушенном ДВС 1 за счет отсутствия жесткой связи ДВС и редуктора 5 благодаря гидротрансформатору 2. Здесь обеспечивается рекуперационное торможение на передней оси автомобиля.

При выключении муфты 6 можно обеспечить работу генератора 4 от ДВС 1 независимо от вращения колес. Обеспечивается возможность заряда АКБ 6 от ДВС 1 при остановке автомобиля.

За счет гидротрансформатора 2 компенсируется отсутствие коробки передач у ДВС. Автомобиль может двигаться с разряженной АКБ 6 в диапазоне скоростей от 0 до 210 км/ч.

Муфта 10/3 при выключенном положении обеспечивает механический разрыв связи заднего колеса с электродвигателем 9. Это используется в случаях

движения по трассе за счет ДВС для снижения расхода топлива и для возможности перемещения автомобиля на своих колесах сторонними силами при буксировке*.

При включенном положении 10/3 может быть включена одна из зубчатых передач 10/1, 10/2. Электродвигатель 9 соединяется с двухступенчатой трансмиссией. Две передачи позволят электродвигателю за счет работы на оптимальных оборотах эффективней ускорять вращение колеса при разгоне и затормаживать его при рекуперативном торможении.

Задние колеса приводятся во вращение двумя симметричными агрегатными блоками, каждый из которых состоит из асинхронного электродвигателя 9 и коробки передач 10.

При поездках по трассе большую часть пути будет работать ДВС. Электродвигатели работают в режиме генераторов при торможении или случае

* Электромобили строго запрещено буксировать из-за постоянной связи колес с электродвигателями. При разряде АКБ автомобиль можно перемещать только на эвакуаторе.

Таблица 2

Характеристика	Значение
Максимальная мощность ДВС, кВт	136
Максимальный крутящий момент ДВС, Нм	400
Максимальная мощность электродвигателя, кВт	110
Максимальный крутящий момент электродвигателя, Нм	300
Емкость аккумуляторной батареи, кВтч	46
Разгон 0–100 км/ч (спортивный режим движения), с	5,06
Разгон 0–200 км/ч (спортивный режим движения), с	15,23
Максимальная скорость (спортивный режим движения), км/ч (м/с)	258 (71,6)
Проезд 402 м (спортивный режим движения), с	13,044
Максимальное ускорение (спортивный режим движения), м/с ²	13,03
Расход топлива при устоявшемся движении на 100 км/ч, л/100 км	4,8
Пробег на одном заряде АКБ при постоянной скорости 100 км/ч, км	210

разрядки АКБ. Как двигатели они будут работать при трогании автомобиля с места до определенной скорости (30 км/ч), при полном заряде батареи, в экстренных ситуациях, под контролем системы стабилизации для осуществления возможности векторизации тяги.

При экономичных поездках в городе автомобиль приводится в движение электродвигателями задней оси. Активно используется рекуперативное торможение, вплоть до возможности управления автомобилем исключительно педалью акселератора. В таком режиме ДВС работает при температуре воздуха менее 10 °С для подзарядки батареи и прогрева салона и компонентов установки.

При движении в спортивном режиме (в том числе в форсированных) на краткий промежуток времени будут задействованы электродвигатели. За счет векторизации тяги можно настроить поведение автомобиля в поворотах. При низком заряде АКБ спортивный режим недоступен. ДВС может быть задействован для быстрого разгона автомобиля с места, а также при необходимости реализации полного привода,

например, при движении по сложному дорожному покрытию.

В случае выхода из строя компонентов СУ автоматически будет разорвана связь между колесами и двигателями, что позволит отбуксировать автомобиль до места проведения ремонта.

В случае низкого заряда батареи автомобиль двигается от ДВС с включенным гидротрансформатором (при этом возрастает расход топлива) либо СУ работает по последовательной схеме: электроэнергия поступает от генератора, питающего ДВС. Скорость достигает 50 км/ч, это позволит доехать до ближайшей зарядки своим ходом. Здесь потеря на преобразование и передачу энергии выше, чем у традиционной трансмиссии, частично это нивелируется тем, что ДВС работает в оптимальном режиме.

На основе выбранной схемы комбинированной силовой установки и трансмиссии и общеизвестных методик анализа эксплуатационных свойств проведен предварительный расчет показателей тягово-скоростных свойств и свойств топливной экономичности (таблица 2).

* В отличие от передачи энергии механической трансмиссией, когда двигатель часто изменяет частоту вращения коленвала и большую часть времени работает в не самом экономичном режиме.

Произведенные гибридные автомобили имеют больше общего с традиционным автомобилем, чем с электромобилем. Разрабатываемый автомобиль, напротив, ближе к электромобилям, поскольку зачастую будет перемещаться по городу с использованием батареи и электродвигателя. Это значит, что в случае полной разрядки батареи он не сможет перемещаться в городском режиме. Потребуется или поставить автомобиль на зарядку, или дать генератору зарядить батарею от работы ДВС. Но, в отличие от силовой установки электромобиля, разрабатываемая

ГСУ способна самостоятельно или по требованию водителя пополнять заряд батареи при его снижении до определенного уровня. Также запас хода при полной зарядке обеспечит поездки на городских дорогах. Автомобиль будет обладать большей топливной эффективностью по сравнению с гибридными и традиционными автомобилями, при этом будет иметь возможность динамичной езды и хорошей проходимости. Кроме того, его запас хода выше, чем у электромобиля, особенно при холодной погоде. ■

Литература

1. Статистика автомобилизации в России // RUXPERT.RU : патриотическая энциклопедия о России и мире. 2022. URL: https://ruxpert.ru/Статистика:Автомобилизация_России (дата обращения: 19.03.2022).
2. Количество легковых автомобилей в России // AUTOREVIEW.RU : ежедн. интернет-изд. 2022. URL: <https://autoreview.ru/news/avtopark-rossii-svezhie-dannye-i-samye-massovye-brendy> (дата обращения: 19.03.2022).
3. Шутовская Г. А. Анализ мероприятий по снижению воздействия автотранспорта на окружающую среду / Г. А. Шутовская // Молодежь в науке: Новые аргументы : Сб. научн. работ VI Международного молодежного конкурса, Липецк, 30 апреля 2017 года / Отв. ред. А. В. Горбенко. – Липецк : Научное партнерство «Аргумент», 2017. – С. 172–175. ISBN 978-5-9909486-7-9.
4. Сгибнев А. В. Выбросы CO₂ и экология автомобилей РФ: частное мнение / А. Сгибнев // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 6 (95). С. 10–11. eISSN: 2073-9141
5. Кузнецов К. Р. Влияние автомобилей на экологию / К. Р. Кузнецов // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 43. С. 1131–1132. ISSN 2687-1068.
6. Галимова А. А. Экологические аспекты технической эксплуатации грузового автомобильного транспорта / А. А. Галимова, А. А. Маркина // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта, Екатеринбург, 06 декабря 2019 года / Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2020. – С. 62–65. ISBN 978-5-7996-2872-4.
7. Литаврин В. В. Один из способов улучшения экологической ситуации в крупных городах / В. В. Литаврин // Инновационные тенденции развития российской науки : М-лы XII Международной научно-практической конференции молодых ученых, Красноярск, 08–09 апреля 2019 года / Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2019. – С. 240–242.
8. Пушилина Ю. Н. Влияние выхлопных газов автомобилей на экологию населенных мест / Ю. Н. Пушилина, А. А. Задонская, Д. А. Сафонова // Приоритетные направления развития науки и технологий : Тезисы докладов XVIII Международной научно-технической конференции, Тула, 20 ноября 2015 года / под общ. ред. В. М. Панарина. – Тула : Изд-во «Инновационные технологии», 2015. – С. 12–14. ISBN 978-5-9906864-2-7.
9. Экологические показатели загрязнения атмосферы в России. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_bul_2021.pdf (дата обращения: 19.03.2022).
10. Раевский Л. А. Улучшение экологии путём модернизации и внедрения новых технологий в автомобилестроении / Л. А. Раевский, А. А. Полосин // Наука и образование: новое время. – 2021. – № 4 (45). С. 1–7. ISSN 2312-4431.
11. Илимбетов Р. Ю. Применение гибридных установок в грузовых автомобилях. Опыт зарубежных стран / Р. Ю. Илимбетов, А. М. Астапенко, В. В. Попов // Наука ЮУрГУ : материалы 65-ой Научной конференции, Челябинск, 23–25 апреля 2013 года. – Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2013. – С. 15–18. ISBN 978-5-696-04454-5.

12. Сарыкулов С. Ж. Гибридные автомобили – решение экологической проблемы автомобильного транспорта / С. Ж. Сарыкулов // News of Science and Education. – 2017. – Т. 3. – № 10. С. 018–022. ISSN 2312-2773.
13. Статистика продаж электромобилей по всему миру // IEA.ORG : Международное энергетическое агентство. 2022. URL: <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales> (дата обращения: 19.03.2022).
14. Продажи электромобилей в России // AUTOSTAT.RU : аналитическое агентство. 2022. URL: <https://www.autostat.ru/news/50525/> (дата обращения: 19.03.2022).

List of references

1. Statistics of motorization in Russia // RUXPERT.EN : patriotic encyclopedia about Russia and the world. 2022 [Statistika avtomobilizatsii v Rossii // RUXPERT.RU : patrioticheskaya ehntsiklopediya o Rossii i mire]. URL: https://ruxpert.ru/Statistics:MOTORIZATION_RUSSIA (accessed on: 03.19.2022).
2. Number of passenger cars in Russia // AUTOREVIEW.EN : every day. internet ed. [Kolichestvo legkovykh avtomobilej v Rossii // AUTOREVIEW.RU : ezhdnevnoe internet-izdanie] 2022. URL: <https://autoreview.ru/news/avtopark-rossii-svezhie-dannye-i-samyemassovye-brendy> (accessed on: 03.19.2022).
3. Shutovskaya G. A. Analysis of measures to reduce the impact of motor transport on the environment / G. A. Shutovskaya // Youth in science: New arguments : Collection of scientific papers. Works of the VI International Youth Conference, Lipetsk, April 30, 2017 / Ed. by A. V. Gorbenko. – Lipetsk : Scientific Partnership «Argument» [Analiz meropriyatij po snizheniyu vozdejstviya avtotransporta na okruzhayushchuyu sredu / G. A. SHutovskaya // Molodezh' v nauke: Novye argumenty : Sbornik nauchnykh rabot VI Mezhdunarodnogo molodezhnogo konkursa, Lipetsk, 30 aprelya 2017 goda / Otvetstvennyj redaktor. A. V. Gorbenko. – Lipetsk : Nauchnoe partnerstvo «Argument», 2017. – Pp. 172–175. ISBN 978-5-9909486-7-9.
4. Sgibnev A. V. CO₂ emissions and ecology of cars of the Russian Federation: private opinion / A. Sgibnev // Journal of Automotive Engineers [Vybrosoy CO₂ i ehkologiya avtomobilej RF: chastnoe mnenie / A. Sgibnev // ZHurnal avtomobil'nykh inzhenerov]. – 2015. – № 6 (95). Pp. 10–11. eISSN: 2073-9141.
5. Kuznetsov K. R. Influence of cars on ecology / K. R. Kuznetsov // Innovations. The science. Education [Vliyanie avtomobilej na ehkologiyu / K. R. Kuznetsov // Innovatsii. Nauka. Obrazovanie]. – 2021. – № 43. Pp. 1131–1132. ISSN 2687-1068.
6. Galimova A. A. Ecological aspects of technical operation of truck motor transport / A. A. Galimova, A. A. Markina // Innovative development of land transport equipment and technologies, Yekaterinburg, December 06, 2019 / Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. – Yekaterinburg : Ural University Publishing House [Ehkologicheskie aspekty tekhnicheskoy ehkspluatatsii gruzovogo avtomobil'nogo transporta / A. A. Galimova, A. A. Markina // Innovatsionnoe razvitie tekhniki i tekhnologij nazemnogo transporta, Ekaterinburg, 06 dekabrya 2019 goda / Ural'skij federal'nyj universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B. N. El'tsina. – Ekaterinburg : Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta], 2020. – Pp. 62–65. ISBN 978-5-7996-2872-4.
7. Litavrin V. V. One of the ways to improve the environmental situation in large cities / V. V. Litavrin // Innovative trends in the development of Russian science : Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Krasnoyarsk, 08-09 April 2019 / Krasnoyarsk State Agrarian University. – Krasnoyarsk : Krasnoyarsk State Agrarian University [Odin iz sposobov uluchsheniya ehkologicheskoy situatsii v krupnykh gorodakh / V. V. Litavrin // Innovatsionnye tendentsii razvitiya rossijskoj nauki : Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, Krasnoyarsk, 08–09 aprelya 2019 goda / Krasnoyarskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. – Krasnoyarsk : Krasnoyarskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet], 2019. – Pp. 240–242.
8. Pushilina Yu. N. Impact of car exhaust gases on ecology of populated areas / Yu. N. Pushilina, A. A. Zadonskaya, D. A. Safonova // Priority directions for the development of science and technology : Abstracts of the XVIII International Scientific and Technical Conference, Tula, November 20, 2015 / under the general editorship of V.M. Panarin. – Tula : Publishing House «Innovative Technologies» [Vliyanie vykhlopnykh gazov avtomobilej na ehkologiyu

- naselennykh mest / Yu. N. Pushilina, A. A. Zadonskaya, D. A. Safonova // *Prioritetnye napravleniya razvitiya nauki i tekhnologii : Tezisy dokladov XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Tula, 20 noyabrya 2015 goda / pod obshh. red. V. M. Panarina. – Tula : Izdatelstvo «Innovatsionnye tekhnologii», 2015. – Pp. 12–14. ISBN 978-5-9906864-2-7.
9. Environmental indicators of atmospheric pollution in Russia [Ehkologicheskie pokazateli zagryazneniya atmosfery v Rossii]. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_bul_2021.pdf (accessed on: 03.19.2022).
 10. Raevsky L. A. Improvement of ecology through modernization and introduction of new technologies in the automotive industry / L. A. Raevsky, A. A. Polosin // *Science and Education: novoye vremya* [Uluchshenie ehkologii putyom modernizatsii i vnedreniya novykh tekhnologiy v avtomobilestroenii / L. A. Raevskiy, A. A. Polosin // *Nauka i obrazovanie: novoe vremya*]. – 2021. – № 4 (45). Pp. 1–7. ISSN 2312-4431.
 11. Ilimbetov R. Yu. Application of hybrid installations in trucks. The experience of foreign countries / R. Y. Ilimbetov, A. M. Astapenko, V. V. Popov // *Science of SUSU : materials of the 65th Scientific Conference*, Chelyabinsk, April 23–25, 2013. – Chelyabinsk : SUSU Publishing Center [Primenenie gibridnykh ustanovok v gruzovykh avtomobilyakh. Opyt zarubezhnykh stran / R. Yu. Ilimbetov, A. M. Astapenko, V. V. Popov // *Nauka YuUrGU : materialy 65-oj Nauchnoj konferentsii*, Chelyabinsk, 23–25 aprelya 2013 goda. – Chelyabinsk : Izdatel'skiy tsentr YuUrGU], 2013. – Pp. 15–18. ISBN 978-5-696-04454-5.
 12. Sarykulov S. Zh. Hybrid cars – solving the environmental problem of road transport / S. Zh. Sarykulov // *News of Science and Education* [Gibridnye avtomobili – reshenie ehkologicheskoy problemy avtomobil'nogo transporta / S. Zh. Sarykulov]. – 2017. – Vol. 3. – № 10. Pp. 018-022. ISSN 2312-2773.
 13. Statistics of sales of electric vehicles worldwide // IEA.ORG : International Energy Agency [Statistika prodazh ehlektromobilej po vsemu miru // IEA.ORG : Mezhdunarodnoe ehnergeticheskoe agentstvo]. 2022. URL: <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales> (accessed on: 03.19.2022).
 14. Sales of electric vehicles in Russia // AUTOSTAT.EN : analytical agency [Prodazhi ehlektromobilej v Rossii // AUTOSTAT.RU : analiticheskoe agentstvo]. 2022. URL: <https://www.autostat.ru/news/50525/> (accessed on: 03.19.2022).

Статья сдана в редакцию 8 сентября 2022 года

УДК 656.073:004.023:004.891.2

*А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов,
П. Н. Мишуков, Д. В. Александрин*

Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов

UDC 656.073:004.023:004.891.2

*A. N. Rakhmangulov, S. N. Kornilov,
P. N. Mishkurov, D. V. Alexandrin*

Simulation models in digital twins of railway junctions

Аннотация

Развитие информационных технологий и технических средств регистрации данных создает условия для наполнения имитационных моделей железнодорожного транспорта реальными данными. Это позволяет использовать имитационные модели для создания цифровых двойников железнодорожных станций и узлов. Проанализирован опыт применения имитационных моделей для решения задач проектирования и

оперативного планирования работы систем железнодорожного транспорта различной сложности. Представлен обзор современных компьютерных программ имитационного моделирования железнодорожного транспорта, показаны достоинства и недостатки специализированных программных инструментов. Авторы предлагают подход к построению цифрового двойника железнодорожного узла на основе универсального инструмента имитационного

моделирования AnyLogic. Систематизированы проблемы и ограничения использования имитационных моделей в цифровых двойниках для оперативного управления работой железнодорожных станций и узлов. Предложены программные решения, реализация которых позволяет обеспечить адекватное представление в цифровом двойнике оперативной ситуации на железнодорожной станции. Разработана трехуровневая архитектура цифрового

Статья рекомендована к публикации Д. С. Завалишным, канд. физ.-мат. наук, УрГУПС. E-mail: Zavalishin@usurt.ru.

Александр Нельевич Рахмангулов, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова); г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ran@magtu.ru. ORCID0000-0002-6419-2561.

Сергей Николаевич Корнилов, д-р техн. наук, профессор; кафедра «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова); г. Магнитогорск, Россия. E-mail: kornilov_sn@magtu.ru. ORCID0000-0001-5549-2610.

Павел Николаевич Мишуков, канд. техн. наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова); г. Магнитогорск, Россия. E-mail: p.mishkurov@magtu.ru. ORCID0000-0001-9886-0575.

Дмитрий Викторович Александрин, директор Дирекции по управлению производством ПАО «Ураласбест»; г. Асбест, Свердловская обл., Россия. E-mail: aledv800@gmail.com. ORCID0000-0002-6188-647X.

The article is recommended for publishing D. S. Zavalishin, PhD, associate professor, USURT. E-mail: Zavalishin@usurt.ru.

Alexander Nelevich Rakhmangulov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of «Logistics and Management of Transport Systems» Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMGTU); Magnitogorsk, Russia. E-mail: ran@magtu.ru. ORCID0000-0002-6419-2561.

Sergey Nikolaevich Kornilov, Doctor of Technical Sciences, Professor; of «Logistics and Management of Transport Systems» Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMGTU); Magnitogorsk, Russia. E-mail: kornilov_sn@magtu.ru. ORCID0000-0001-5549-2610.

Pavel Nikolayevich Mishkurov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of «Logistics and Management of Transport Systems» Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMGTU); Magnitogorsk, Russia. E-mail: p.mishkurov@magtu.ru. ORCID0000-0001-9886-0575.

Dmitry Viktorovich Alexandrin, Director of Production Management Directorate of PJSC «Uralasbest»; Asbest town, Sverdlovsk Region, Russia. E-mail: aledv800@gmail.com. ORCID0000-0002-6188-647X.

двойника железнодорожного узла, включающая описание схемы путевого развития, технологии перевозочного процесса, а также способа синхронизации модельных и реальных данных. Показаны примеры интерфейса цифрового двойника железнодорожных путей необщего пользования.

Реализация разработанного двойника на горнодобывающем предприятии позволила повысить оперативность принимаемых решений по согласованию работы производственных подразделений и транспорта, сократить простои и повысить производительность обогатительной фабрики в результате снабжения ее сырьем потребного сортамента в заданное время.

Ключевые слова: цифровой двойник, железнодорожный узел, железнодорожная станция, имитационное моделирование, AnyLogic, транспортная сеть, схема путевого развития, технологические карты, синхронизация, оптимизация.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59

Abstract

The development of information technologies and technical means of data registration creates conditions for filling simulation models of railway transport with actual data. It allows us to use simulation models to create digital counterparts of railway stations and junctions. The experience of using simulation models to perform the tasks of designing and operational planning of railway transport systems of various complexity is analyzed. An overview of modern computer programs for simulation of railway transport is presented, the advantages and disadvantages of the specialized software tools are illustrated. The authors propose an approach to build a digital twin of a railway junction based on the universal simulation tool AnyLogic. The problems and limitations of using simulation models in digital twins for operational management of railway stations and junctions are systematized. Software solutions are proposed, the implementation of which makes it possible to provide an ade-

quate representation of the operational situation at the railway station in the digital twin. A three-level architecture of a digital twin of a railway junction has been developed, including a description of the track development scheme, the technology of the transportation process, as well as a method for synchronizing model and actual data. Examples of the interface of a digital twin of non-public railway tracks are presented.

The implementation of the developed twin at the mining enterprise allowed to increase the efficiency of decisions taken to coordinate the work of production units and transport, reduce idle time and increase the productivity of the ore-processing mill as a result of supplying it with raw materials of the required range at a given time.

Keywords: digital twin, railway junction, railway station, simulation modeling, AnyLogic, transport network, track development scheme, technological maps, synchronization, optimization.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59

Развитие цифровых двойников – элементов концепции «Индустрия 4.0» [1] связано с совершенствованием информационных технологий, в частности, блокчейна [2] и распространением «интернета вещей» [3]. Как результат, появляется возможность получать оперативные данные о параметрах перевозочного процесса, что создает предпосылки для использования текущих данных для принятия управленческих решений.

Цифровые двойники на железнодорожном транспорте применяются для решения задач, связанных с контролем состояния железнодорожной инфраструктуры, подвижного состава и с

управлением перевозочным процессом. Развитие цифровых двойников сделало возможным применение разнообразных математических методов и моделей в оперативном управлении перевозочным процессом. Такие методы разделяются на аналитические, имитационные и комбинированные группы [4, 5]. Все эти методы традиционно применяются для решения задач планирования, стратегического управления, а также развития транспортной инфраструктуры.

Инструменты имитационного моделирования обладают необходимым потенциалом для создания цифровых двойников динамических производственных и транспортных объектов [6].

Однако их использование для построения цифровых двойников требует решения основной проблемы: обеспечение надежной синхронизации имитационной модели с реальными данными. Во-первых, параметры случайных процессов в имитационной модели описываются с использованием законов распределения случайных величин, поэтому через некоторое время ситуация в модели может отличаться от реальной. Второе ограничение использования цифрового двойника железнодорожного узла в рамках интеллектуальной транспортной системы (ИТС) – необходимость синхронизации управленческих решений, принимаемых оперативным руководителем и формируемых моделью.

Большинство известных инструментов имитационного моделирования железнодорожного транспорта асинхронные; они используются в основном для оценки пропускной способности железнодорожной сети по заранее заданному расписанию движения поездов [5]. Примеры асинхронного подхода к моделированию железнодорожного транспорта: система RTC – Rail Traffic Controller [7, 4], RailSys [8, 9], OpenTrack [10] и SYSTRA's RAILSIM X [11], ИСТРА [12].

Асинхронные имитационные модели на железнодорожном транспорте используются для планирования и контроля графика движения поездов, оптимизации работы сортировочных горок, промежуточных и участковых станций на сети железных дорог общего пользования. Обработка поездов на таких станциях включает в себя, как правило, несложные маневровые операции, которые представлены ограниченным и заранее известным списком. Оптимизация очередности и состава этих операций не относится к категории NP-сложных задач.

Синхронные инструменты имитационного моделирования, в отличие от асинхронных, требуют дополнительных технических или программных средств синхронизации реальных и модельных событий [4]. Синхронное моделирование

применяется, например, для контроля графика движения поездов [13] или оптимизации маршрутов движения грузовых поездов [14].

Железнодорожные узлы, включая пути необщего пользования, функционируют в условиях высокой неопределенности. Это связано с необходимостью обслуживания множества грузовых фронтов, потребителей транспортных услуг, грузовладельцев со стохастическим спросом на перевозки. Сложные маневровые операции выполняются в железнодорожных узлах для подачи вагонов на грузовые фронты. Такие операции выполняются методом осаживания с использованием вытяжных путей, которые предусматривают множество вариантов их выполнения, что, в свою очередь, делает задачу оптимального планирования функционирования железнодорожного узла NP-сложной.

С одной стороны, такая отличительная особенность железнодорожных узлов повышает актуальность задачи создания цифровых двойников для поддержки решений по управлению перевозочным процессом в узлах. С другой, возникает необходимость решения ряда принципиальных проблем, связанных со сложностью структуры и функций железнодорожных узлов.

Мы предлагаем выделять три уровня проблем создания цифровых двойников железнодорожных узлов.

Проблемы первого уровня связаны с описанием схемы путевого развития железнодорожных узлов. Формализованное описание транспортной сети железнодорожного узла должно предусматривать возможность определения оптимального маршрута движения маневрового поезда.

Проблема второго уровня заключается в создании механизма оперативного планирования последовательности операций технологического процесса работы железнодорожного узла.

Проблема третьего уровня – синхронизация модельной ситуации с реальными данными информационной системы железнодорожного узла.

В настоящей статье описаны конкретные решения проблем первого и второго уровней с использованием универсального инструмента имитационного моделирования AnyLogic. Кроме того, представлена концепция интеграции цифрового двойника железнодорожного узла в интеллектуальную транспортную систему.

К сожалению, количество публикаций в области цифровых двойников работы железнодорожных сетей, станций и узлов невелико. Большая часть исследований в области применения цифровых двойников на железнодорожном транспорте описывает теорию и практику использования цифровых двойников для контроля технического состояния железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава. Тем не менее ведутся исследования в области построения цифровых двойников железнодорожной инфраструктуры в форме двухуровневой архитектуры (микро- и макроуровень) [15] или многоуровневой архитектуры [16]. Известны цифровые двойники грузовых станций [17] и диспетчерского управления [18].

Имитационные модели на железнодорожном транспорте применяются для решения задач стратегического и тактического планирования, выявления узких мест и обоснования решений по развитию или реконструкции транспортной инфраструктуры. Для построения таких моделей используются специализированные и универсальные инструменты имитационного моделирования.

Системы OpenTrack [19, 10], FRISO [20], YardSim [21], DEVS [22] ориентированы на моделирование работы магистральных железнодорожных станций на микроуровне. Такие системы обеспечивают разрешение конфликтных ситуаций по одновременному занятию путей и стрелочных переводов при движении поезда в одном направлении, то есть без смены направления движения. Достаточно простая логика выполнения сортировочной работы на таких станциях моделируется диаграммами процесса (дискретно-событийный

подход) или с применением математических методов, в частности, нейронных сетей [23]. Обзоры систем микромоделирования железнодорожных станций с анализом проблем их использования представлены в [24, 25].

Инструмент моделирования Villon компании SIMCON [26] позволяет имитировать как работу сортировочных и пассажирских станций, так и путей необщего пользования, контейнерных терминалов и других объектов транспортной инфраструктуры. Villon основан на объектном подходе к моделированию [27], обеспечивает интеграцию с различными программами оптимизации работы транспорта, например, OptiYard [28, 29].

Железнодорожные узлы в большинстве случаев моделируются на макроуровне. Для таких целей используются как универсальные инструменты моделирования, например, AnyLogic [30, 31], SIMUL'8 [32] Arena [33], Plant Simulation [34], FlexSim [35], так и специализированные инструменты, например, IMETRA [36] и ИСТРА [12]. Нам удалось обнаружить единственное исследование [37], в котором железнодорожный узел рассматривается одновременно на макро- и микроуровнях. Авторы [37] комбинируют тактический и оперативный уровни управления железнодорожным узлом.

Во всех рассмотренных системах каждая железнодорожная станция или парк путей моделируются отдельным набором объектов дискретно-событийной имитационной модели. Однако в последнее время возрастает популярность агентного подхода к построению имитационных моделей, в том числе железнодорожного транспорта, на микроуровне [38].

Универсальные среды, инструменты и языки программирования для создания многоагентных имитационных моделей [39] могут быть использованы при создании цифровых двойников железнодорожных станций и узлов. Однако это требует создания специализированных программных библиотек, моделирующих работу транспорта. Тем не менее

некоторые инструменты, например, AnyLogic содержат готовые библиотеки агентного моделирования железнодорожного транспорта. AnyLogic поддерживает все известные подходы к имитационному моделированию, включая агентный, дискретно-событийный и системно-динамический. Кроме того, AnyLogic – это универсальный и доступный программный инструмент с развитой поддержкой, что способствует более широкому распространению построенных с его использованием моделей по сравнению со специализированными инструментами.

Разработанная авторами структура цифрового двойника железнодорожного узла в терминах агентного подхода AnyLogic представляет собой иерархию агентов, описывающих инфраструктуру, технологию и систему управления узла. Предлагается трехуровневая архитектура цифрового двойника железнодорожного узла, которая служит развитием многоуровневой модели [40].

Традиционный подход к построению имитационных моделей работы железнодорожных станций заключается в детальном описании технологии работы станции, обычно в форме графа – последовательности операций перевозочного процесса. Основное отличие нашей модели заключается в автоматическом построении последовательности маневровых полурейсов в составе технологической карты. В нашей модели разделяются работы, выполняемые локомотиво-составительскими бригадами, и команды диспетчерского управления, уровни «Схема путевого развития» и «Диспетчерское управление» (рис. 1).

Первый уровень предлагаемой архитектуры цифрового двойника железнодорожного узла основан на оригинальном способе описания путевого развития железнодорожного узла, который позволяет реализовывать низкоуровневую оптимизацию принимаемых решений, например, выбор маршрутов движения поездов и маневровых составов.

На втором уровне в терминах агентного и дискретно-событийного подходов описывается управление перевозочным процессом, вагоно- и поездопотоками железнодорожного узла. Управление заключается в выборе состава и последовательности операций технологического процесса.

Третий уровень цифрового двойника железнодорожной станции обеспечивает синхронизацию модельных данных с реальными данными интеллектуальной транспортной системы, а также обучение имитационной модели.

Проблема использования универсальных инструментов имитационного моделирования для описания сложных систем на микроуровне заключается в недостаточном учете специфики их функционирования. Несмотря на наличие в AnyLogic специализированной железнодорожной библиотеки, в ней до сих пор не решена проблема разрешения конфликтов при занятии поездами одних и тех же путей и стрелочных переводов. Выделяют три подхода к решению этой проблемы.

Первый подход основан на представлении отдельных путей и стрелочных переводов в качестве ресурсов, которые последовательно занимаются и освобождаются при движении поезда.



Рис. 1. Структура цифрового двойника железнодорожного узла

Такая схема используется, например, в Arena [41] и в AnyLogic [42]. Недостаток такого подхода – трудоемкость создания множества потоковых диаграмм для каждого маршрута движения поезда и сложность последующей оптимизации этих маршрутов.

Новый подход, предлагаемый AnyLogic [43], основан на использовании марковского процесса принятия решений [44]. Стрелочный перевод, к которому подъезжают два поезда, автоматически переключается для пропуска приоритетного. Однако такой подход, предполагающий динамическое построение маршрута, противоречит требованиям безопасности перевозок. Кроме того, потоковая диаграмма в имитационной модели должна содержать дополнительные блоки сравнения скоростей движения поездов.

Оба рассмотренных подхода не позволяют оптимизировать низкоуровневые операции по выбору оптимальных маршрутов движения, состоящие из нескольких полурейсов. Схема стрелочного перевода, представленного в форме неориентированного графа, дана на рис. 2.

Ребра графа характеризуются номерами начальной (i), конечной (j) вершин и длиной L (таблица 1).

Движение поезда из вершины 1 в вершину 4 выполняется по маршруту $M1 = \{1; 2; 3; 2; 4\}$, который состоит из двух полурейсов. Первый полурейс выполняется по маршруту $\{1; 2; 3\}$. Затем происходит изменение направления движения и поезд движется по

Таблица 1

Пример представления данных неориентированного графа

i	j	L_{ij}
1	2	L_1
2	1	L_1
2	3	L_2
3	2	L_2
2	4	L_3
4	2	L_3

маршруту $\{3; 2; 4\}$. Длина такого реального маршрута $M1$ будет равна $L_{1,4} = L_1 + 2 \cdot L_2 + L_3$.

Однако маршрут из вершины 3 в вершину 4 не входит в состав оптимального маршрута $M2 = \{1; 2; 4\}$ в случае, если схема путевого развития описывается традиционным неориентированным графом. Длина маршрута $M2$ будет равна $L_{1,4} = L_1 + L_3$. В таблице оптимальных маршрутов (таблица 2) величина λ_i – это номер вершины, которая предшествует i -й, а $L_{\lambda_i, i}$ – длина ребра между вершинами λ_i и i . На рис. 2 маршрут $M2$ показан красными стрелками. Кроме того, как видно из рис. 2 и таблицы 2, на графе имеется еще один маршрут: $M3 = \{1, 2, 3\}$ длиной $L_{1,3} = L_1 + L_2$ до альтернативной конечной вершины 3.

Таким образом, поиск оптимального маршрута из вершины 1 в вершину 4 с использованием традиционного подхода приведет к ошибочной имитации движения поезда в модели. Такое описание схемы путевого развития не

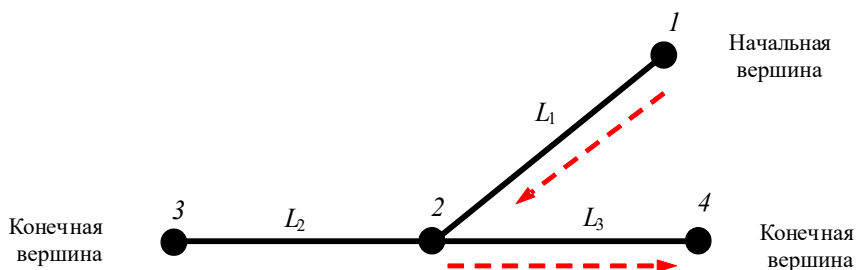


Рис. 2. Традиционный способ описания стрелочного перевода в виде части неориентированного графа

Таблица 2

Таблица оптимальных маршрутов для схемы стрелочного перевода, представленной традиционным неориентированным графом

i	λ_i	$L_{\lambda_i,i}$
1	0	0
2	1	L_1
3	2	$L_1 + L_2$
4	2	$L_1 + L_3$

позволяет планировать и оптимизировать сложные маршруты движения поездов по железнодорожной станции и маневровые операции с изменением направления движения поездов.

Разработанный нами подход основан на использовании так называемого виртуального графа, особенность которого заключается в том, что каждой вершине графа – стрелочному переводу ставятся в соответствие две вершины – реальная и виртуальная, например, реальная вершина 2 и виртуальная вершина 5 (рис. 3).

Виртуальная вершина соединяется с главным железнодорожным путем стрелочного перевода и виртуальным ребром (5,3). Реальный путь, представленный ребром (1,2), в схему виртуального графа не включается. Набор данных полученного виртуального графа (рис. 3) представлен в таблице 3.

В результате такого преобразования в имитационной модели формируется корректный и единственный

Таблица 3

Пример представления данных виртуального графа

i	j	L_{ij}
1	5	L_1
5	1	L_1
5	3	L_2
3	5	L_2
3	2	L_2
2	3	L_2
2	4	L_3
4	2	L_3

Таблица 4

Таблица оптимальных маршрутов для схемы стрелочного перевода, представленной виртуальным графом

i	λ_i	$L_{\lambda_i,i}$
1	0	0
2	3	$L_1 + L_2 + L_2$
3	5	$L_1 + L_2$
4	2	$L_1 + L_2 + L_2 + L_3$
5	1	L_1

оптимальный маршрут $M1 = \{1; 5; 3; 2; 4\}$ корректно рассчитанной длины $L_{1,4} = L_1 + L_2 + L_2 + L_3$ (таблица 4).

Впервые идея графа с двумя вершинами для описания железнодорожного путевого развития предложена в работе [45]. Представленный авторами граф позволяет определять оптимальные

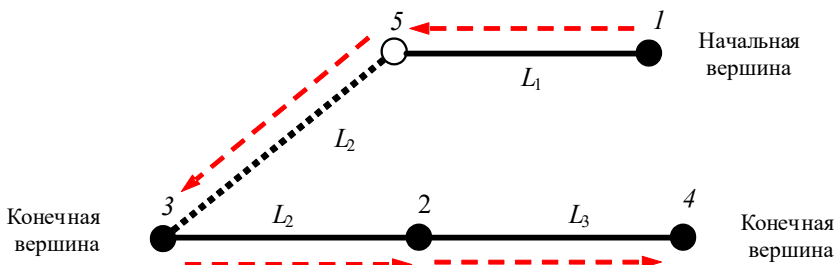


Рис. 3. Предлагаемый способ описания стрелочного перевода как части виртуального графа

маршруты движения поездов по железнодорожной станции со сложной схемой путевого развития, когда требуется изменять направление движения поезда для достижения заданной конечной точки маршрута.

Оптимальный маршрут движения поезда по транспортной сети может быть рассчитан с использованием различных методов [46]. Для маршрутизации перевозок мы предлагаем использовать быстрый эвристический «sweep algorithm» [47], идея которого основана на последовательной проверке для каждой i -й вершины графа условия

$$L_{i=0,i} < L_{i=\lambda_i},$$

где $L_{i=0,i} < L_{i=\lambda_i}$ – длина маршрута от вершины $i = 0$ до последующей i -й и предшествующей λ_i .

Вершина i включается в состав оптимального маршрута только в случае выполнения указанного условия; алгоритм позволяет находить все оптимальные маршруты от одной или нескольких начальных вершин транспортной сети до всех остальных вершин [48]. В свою очередь, результаты алгоритма служат исходными данными для оптимизации приоритетов движения поездов путем сравнения показателей их маршрутов на втором уровне цифрового двойника – уровне диспетчерского управления. Ребра графа, входящие в выбранный и запланированный маршрут движения поезда, исключаются из расчета маршрутов для других поездов. Так исключается возникновение в модели конфликтов при имитации движения поездов.

Технологию работы железнодорожной станции или узла в модели мы предлагаем проводить в форме очереди задач. Тогда диспетчерское управление сводится к выбору оптимальной последовательности выполнения этих задач. Задачи предлагается описывать универсальным набором следующих данных: место (дуга транспортной сети), время (желаемый момент

времени завершения задачи), качество (вагоны определенного типа или с заданным родом груза), количество (число вагонов). Задачи приписываются динамическим объектам имитационной модели – вагонам или группам вагонов, маневровым составам, локомотивам, поездам. Параметры задач одинаковы для всех вагонов, входящих в состав маршрутного поезда, но различны для сборных поездов.

Наборы данных, описывающие задачи, передаются между агентами модели – руководителями разного уровня в форме сообщений. В цифровом двойнике железнодорожного узла, в котором обслуживаются несколько промышленных предприятий, грузополучателей, грузоотправителей или грузовых фронтов, предусмотрены следующие уровни управления: производственный диспетчер или грузовладелец, грузовой диспетчер, поездной диспетчер, дежурный по станции или маневровый диспетчер.

Основная функция производственного диспетчера заключается в формировании задач для железнодорожных диспетчеров в виде заявок на подачу вагонов с определенными грузами. Параметры заявок производственного диспетчера определяются динамикой потребления грузов на основе данных, например, систем управления запасами или данных производственных информационных систем. Грузовой диспетчер составляет оперативный план распределения вагонов в узле, то есть определяет параметры задачи для каждого вагона в цифровом двойнике. Функции поездного диспетчера заключаются в составлении расписания движения поездов и формировании их составов на основе плана распределения вагонов. Распределение и продвижение вагоно- и поездопотоков происходит с использованием укрупненной транспортной сети железнодорожного узла, в которой вершины соответствуют грузовым фронтам, грузополучателям, грузоотправителям и целым железнодорожным станциям, а дуги – перегонам между станциями. Поездной диспетчер

формирует задачи для групп вагонов, локомотивов и поездов. Маневровый диспетчер формирует задачи по обработке поездов внутри отдельной станции железнодорожного узла.

Определение состава очереди задач и изменение очередности их выполнения – основа модели диспетчерского управления в составе цифрового двойника. Предлагаемая модель предусматривает три способа формирования и изменения очереди задач.

Первый способ предусматривает автоматическое формирование очереди заданий на основании графика движения и плана формирования поездов, технологических карт, а также плановых объемов погрузки/выгрузки (применяется в асинхронных имитационных моделях железнодорожного транспорта).

Второй способ допускает ручную корректировку содержания и последовательности задач на каждом уровне управления в зависимости от фактической ситуации. Для реализации этого способа интерфейс цифрового двойника должен предусматривать возможность изменения очередей задач при отклонении расчетных и фактических параметров перевозочного процесса от средних или нормативных значений. Диспетчеры могут получать фактические данные как с использованием традиционных средств связи, так и из интеллектуальной транспортной системы.

Третий способ позволяет корректировать технологический процесс обработки вагонопотоков на основе использования оптимизационных алгоритмов, например, методов распределения порожних вагонов [49, 50], управления маневровой работой на станциях железнодорожного узла [51] и т.д. Реализация третьего способа предусматривает интеграцию цифрового двойника железнодорожного узла и действующей интеллектуальной транспортной системы для получения оперативных данных.

Интеллектуальная транспортная система, в отличие от информационных, обеспечивает поддержку управленческих решений. Функционал интеллек-

туальной транспортной системы железнодорожных транспортных узлов достаточно подробно представлен в [52]. Цифровые двойники способны формировать оптимальные управленческие решения на всех уровнях управления железнодорожным узлом.

Предлагаемый подход к интеграции цифрового двойника железнодорожного узла с интеллектуальной транспортной системой основан на выделении трех функциональных блоков: синхронизация данных, обучение и блок поддержки принятия управленческих решений.

Блок синхронизации обеспечивает обмен оперативными данными о местонахождении вагонов, локомотивов и поездов между ИТС и цифровым двойником. Использование имитационной модели в цифровом двойнике позволяет прогнозировать положение подвижного состава после выполнения операций технологического процесса, что может быть полезным для снижения затрат на развертывание систем оперативного контроля за движением поездов и локомотивов, например, технологии RFID [53].

Сравнение прогнозов с данными ИТС, с одной стороны, позволяет выявлять возможные ошибки регистрации данных, с другой, используется для повышения точности имитационного моделирования в предлагаемом блоке обучения [54, 55].

Третий блок предлагаемой модели интеграции – поддержка управленческих решений, которые представляют собой результаты корректировки задач на основе изменения состава и/или последовательности выполнения операций перевозочного процесса. Управленческие решения могут формироваться человеком или оптимизационными алгоритмами с последующим подтверждением со стороны диспетчера. Однако универсальным решением становится реализация в составе данного модуля возможности сравнения прогнозов имитационной модели для различных управленческих решений.

Интерфейс цифрового двойника железнодорожного узла должен

обеспечивать оперативный контроль, корректировку и планирование перевозочного процесса на всех уровнях управления железнодорожного узла. Для реализации оперативного управления предлагается в структуру интерфейса цифрового двойника включать контроль, корректировку, оперативное планирование.

Блок контроля визуализирует перевозочный процесс как в форме различ-

ных графиков и показателей (рис. 4–6), так и форме динамической двумерной (рис. 7) или трехмерной презентации работы отдельной станции или всего железнодорожного узла.

Блок корректировки перевозочного процесса визуализирует очередь операций перевозочного процесса и позволяет изменять состав, параметры и очередность этих операций. Результат корректировки может быть сразу реализован

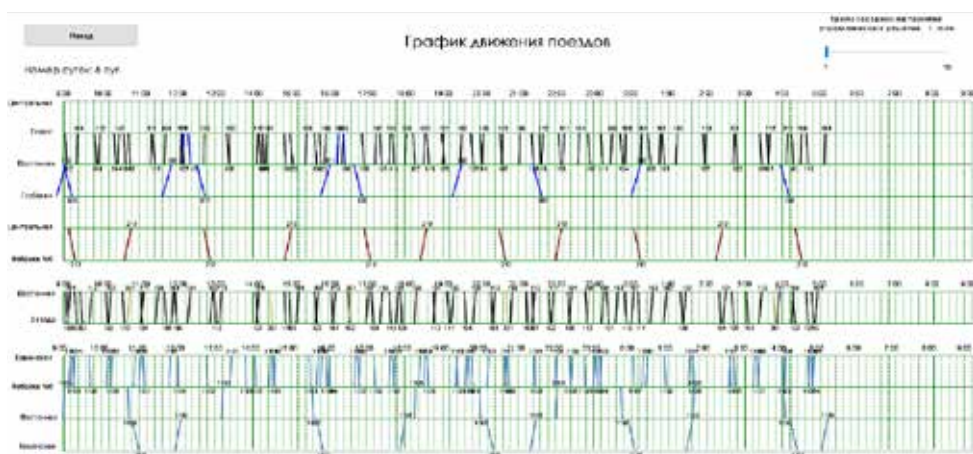


Рис. 4. Фрагмент графика движения поездов в цифровом двойнике железнодорожного узла

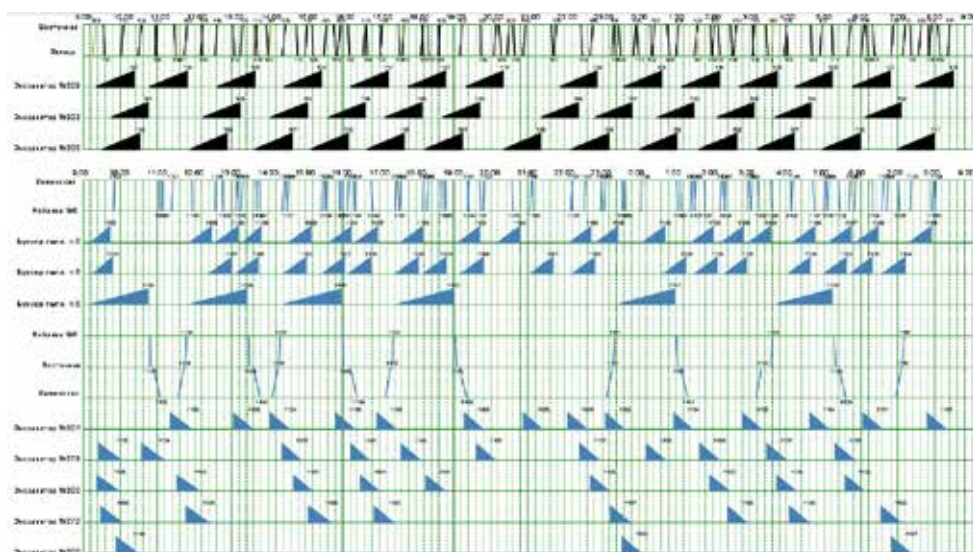


Рис. 5. Фрагмент графика исполненной работы в цифровом двойнике железнодорожного узла

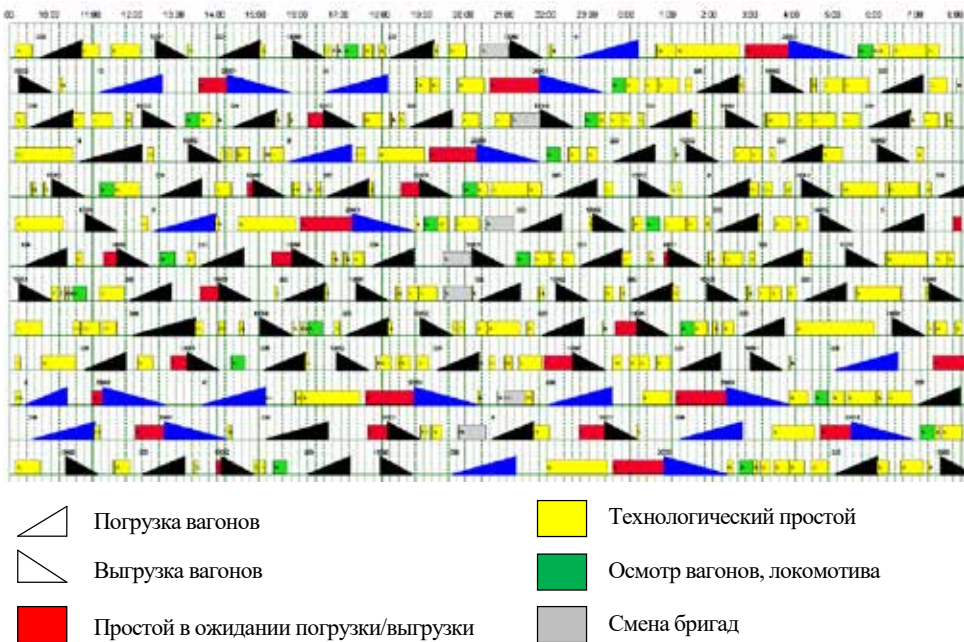


Рис. 6. Фрагмент графика работы локомотиво-составов в цифровом двойнике железнодорожного узла

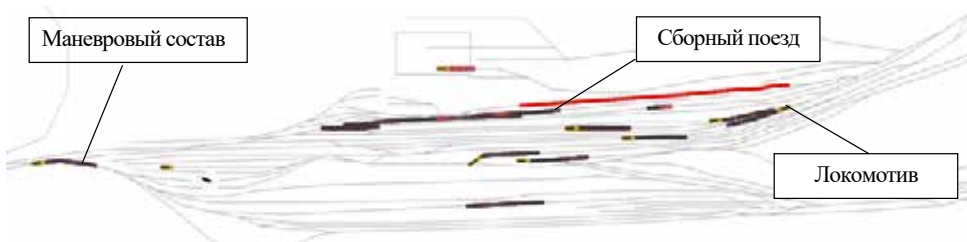


Рис. 7. Фрагмент представления схемы путевого развития в цифровом двойнике железнодорожного узла

путем выдачи соответствующих команд на более низкие уровни управления, например, на уровень локомотивной и составительской бригад. Кроме того, он позволяет диспетчерам в случае аварий или остановок интерактивно блокировать в модели доступность или работоспособность отдельных технических средств и устройств.

Блок оперативного планирования основан на сравнении прогонов имитационной модели. Параметрами каждого прогона служат состав очереди операций

перевозочного процесса и параметры этих операций. Параметры прогонов задаются с использованием того же алгоритма, на котором построен блок корректировки перевозочного процесса, однако не передаются в реальную систему управления перевозками, а используются в качестве исходных данных для прогонов. Блок предоставляет диспетчерам возможность выбора одного или нескольких показателей, сравниваемых в процессе имитационного прогона. Выбранный вариант очереди

операций передается в блок корректировки перевозочного процесса для последующей реализации.

Анализ специализированных и универсальных инструментов имитационного моделирования железнодорожного транспорта позволяет говорить о преимуществах универсальных инструментов. Это связано как с качественной поддержкой этих инструментов производителем, так и с реализацией в них различных инструментов поддержки управленческих решений,

включая, например, инструменты оптимизации и искусственного интеллекта. Выбор универсального инструмента имитационного моделирования AnyLogic обусловлен возможностью использования многоподходного моделирования в рамках одной имитационной модели. Это позволяет имитировать многоуровневые модели управления: от уровня путевого развития до уровня управления расписанием движения поездов и распределения вагонов в железнодорожном узле. ■

Литература

1. hobakhloo M., Fathi M., Iranmanesh M., Maroufkhani P., Morales M. E. Industry 4.0 ten years on: A bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 302. P. 127052. ISSN 0959-6526.
2. Sahal R., Alsamhi S. H., Brown K. N., O'Shea D., McCarthy C., Guizani M. Blockchain-Empowered Digital Twins Collaboration: Smart Transportation Use Case // *Machines*. 2021. Vol. 9 (9). P. 193. ISSN 2075-1702.
3. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 108952–108971. ISSN 2169-3536.
4. Pouryousef H., Lautala P., White T. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe // *Journal of Modern Transportation*. 2015. Vol. 23 (1). Pp. 30–42. ISSN 2662-4753; 2662-4745.
5. Pachl J. Railway operation and control / 4-е изд. Mountlake Terrace WA: VTD Rail Pub, 2018. 302 p. ISBN 978-0-9719915-9-0.
6. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. Digital Twins: State-of-the-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications // *ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg*. 2020. Vol. 6 (3). P. 030901. ISSN 2332-9025; 2332-9017.
7. RTC – Rail Traffic Controller. URL: <https://berkeleysimulation.com/rtc.php> (дата обращения: 3.08.2022).
8. RailSys® Software Suite. URL: <https://www.rmcon-int.de/railsys-en/railsys-suite/> (дата обращения: 12.03.2022).
9. Medeossi G., Fabris S. de Simulation of Rail Operations. // *Handbook of Optimization in the Railway Industry* / R. Borndörfer [and others]. Cham: Springer International Publishing, 2018. P. 1–24 ISBN 978-3-319-72152-1; 978-3-030-10160-2; 978-3-319-72153-8.
10. OpenTrack Railway Technology. URL: <http://www.opentrack.ch/> (дата обращения: 14.04.2022).
11. SYSTRA's RAILSIM X® Software Suite. URL: https://www.systracanada.com/IMG/pdf/systra_brochure_railsim_x.pdf (дата обращения: 23.09.2021).
12. ИСТРА – система автоматизированного построения имитационных моделей железнодорожных станций и узлов. URL: <http://trans-expert.ru/istra> (дата обращения: 22.03.2022).
13. Никитин А. Б., Грошев В. А. Автоматизация управления станционным технологическим процессом в режиме реального времени // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2016. Т. 2 (13). С. 229–238. ISSN 1815-588X; 2658-6851.
14. Mancera A., Bruckman D., Weidmann U. Single Wagonload Production Schemes Improvements Using GüterSim (Agent-based Simulation Tool) // *Transportation Research Procedia*. 2015. Vol. 10. P. 615–624. ISSN 2352-1457; 2352-1465.
15. Novotny R., Kavicka A. Scalable simulation models of railway traffic // *28th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2016*. Genova: University of Genoa, 2016. P. 25–31.
16. Gély L., Dessagne G., Pesneau P., Vanderbeck F. A multi scalable model based on a connexity graph representation // *COMPRAIL 2010* / Ed. B. Ning, C. A. Brebbia: WIT

- Transactions on The Built Environment. Beijing, China: WIT PressSouthampton, UK, 31.08.2010–2.09.2010. P. 193–204.
17. Shabelnikov A. N., Olgeyzer I. A. Technology and Mathematical Basis of Digital Twin Creation in Railway Infrastructure // Proceedings of the Fourth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'19) / S. Kovalev [and others]. Cham: Springer International Publishing, 2020. Pp. 688–695. ISSN 2194-5365; 2194-5357.
18. He S., Song R., Chaudhry S. S. An integrated dispatching model for rail yards operations // Computers & Operations Research. 2003. Vol. 30 (7). Pp. 939–966. ISSN 0305-0548.
19. Nash A., Huerlimann D. Railroad simulation using OpenTrack. // Computers in Railways IX / J. Allan [and others]. Southampton: WIT Press, 2004. Pp. 45–54.
20. Middelkoop A. D., Loeve L. Simulation of traffic management with FRISO // COMPRAIL 2006. / Под ред. J. Allan, C. A. Brebbia, A. F. Rumsey, G. Sciutto, S. Sone, C. J. Goodman. Prague, Czech Republic: WIT Press, 10.07.2006–12.07.2006. Pp. 501–509.
21. Lin E., Cheng C. YardSim: A rail yard simulation framework and its implementation in a major railroad in the U.S // 2009 Winter Simulation Conference (WSC 2009). Austin, TX, USA: IEEE, 13.12.2009–16.12.2009. C. 2532–2541.
22. Huang Y., Seck M. D., Verbraeck A. Component-based light-rail modeling in discrete event systems specification (DEVS) // SIMULATION. 2015. Vol. 91 (12). Pp. 1027–1051. ISSN 0037-5497.
23. Wang X., Rong L. Marshalling Yard Simulation Based on BP Neural Network Model // Fourth International Conference on Transportation Engineering. / Ed. Qiyuan Peng, Kelvin C. P. Wang. Chengdu, China: American Society of Civil Engineers, October 19–20, 2013. Pp. 1117–1122.
24. Roungas B., Meijer S., Verbraeck A. Validity of railway microscopic simulations under the microscope: two case studies // International Journal of System of Systems Engineering. 2018. Vol. 8 (4). P. 346. ISSN 2041-9031; 2041-904X.
25. Baugher R. W. Simulation of Yard and Terminal Operations / Handbook of Operations Research Applications at Railroads / B. W. Patty. Boston, MA: Springer US, 2015. Pp. 219–242. ISBN 978-1-4899-7570-6; 978-1-4899-7571-3.
26. Villon simulation tool. URL: <https://www.simcon.sk/en/tools> (дата обращения: 13.06.2022).
27. Adamko N., Kavicka A., Klima V. Agent based simulation of transportation logistic systems / DAAAM International Scientific Book 2007 / Katalinic. DAAAM International Publishing, 2007. Pp. 407–422. ISBN 3-901509-60-7.
28. Licciardello R., Adamko N., Deleplanque S., Hosteins P., Liu R., Pellegrini P., Peterson A., Wahlborg M., Zatkan M. Integrating yards, network and optimisation models towards real-time rail freight yard operations // Ingegneria Ferroviaria. 2020. Vol. 75 (6). Pp. 417–447. ISSN 0020-0956.
29. Adamko N., Zatkan M. Optimised Real-time Yard and Network Management: D 4.2 Yard simulation software for WP6. URL: <https://projects.shift2rail.org/download.aspx?id=ac5f4396-3841-4825-bfbb-4bcb4f91eb55> (дата обращения: 8.07.2022).
30. AnyLogic Simulation Software. URL: <https://www.anylogic.com> (дата обращения: 4.03.2022).
31. Lyubchenko A., Bartosh S., Kopytov E., Shiler A., Kildibekov A. AnyLogic-Based Discrete Event Simulation Model of Railway Junction / Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems / R. Silhavy [and others]. Cham: Springer International Publishing, 2017. Pp. 141–149. ISBN 978-3-319-57263-5; 978-3-319-57264-2.
32. Marinov M., Viegas J. A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations / Simulation Modelling Practice and Theory. 2009. Vol. 17 (6). Pp. 1106–1129. ISSN 1569-190X.
33. Arena Simulation Software. URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html> (дата обращения: 13.05.2022).
34. Plant Simulation. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html> (дата обращения: 3.08.2022).
35. FlexSim 3D Simulation Modeling and Analysis Software. URL: <https://www.flexsim.com/> (дата обращения: 6.07.2021).
36. Borodin A., Kozlov P., Kolokolnikov V., Osokin O. Construction of Efficient Railway Operating Domains Based on a Simulation Examination / VIII International Scientific Siberian

- Transport Forum / Z. Popovic [and others]. Cham: Springer International Publishing, 2020. Pp. 1143–1151. ISBN 978-3-030-37918-6; 978-3-030-37919-3.
37. Marinov M., Şahin İ., Ricci S., Vasic-Franklin G. Railway operations, time-tabling and control // *Research in Transportation Economics*. 2013. Vol. 41 (1). Pp. 59–75. ISSN 0739-8859.
38. Cenani Ş. Emergence and complexity in agent-based modeling: Review of state-of-the-art research // *Journal of Computational Design*. 2021. Vol. 2 (2). Pp. 1–24. ISSN 2687-4318.
39. Abar S., Theodoropoulos G. K., Lemarini P., O'Hare G. M. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software // *Computer Science Review*. 2017. Vol. 24. Pp. 13–33. ISSN 1574-0137.
40. Schedit M. Proposal for a Railway Layer Model // *COMPRAIL 2018* / Под ред. G. Passerini, J. M. Mera, N. Tomii, P. Tzieropoulos: WIT Transactions on The Built Environment. Lisbon, Portugal: WIT PressSouthampton UK, 2.07.2018–4.07.2018. Pp. 157–168.
41. Woroniuk C., Marinov M. Simulation modelling to analyse the current level of utilisation of sections along a rail route // *Journal of Transport Literature*. 2013. Vol. 7 (2). Pp. 235–252. ISSN 2238-1031.
42. Рахмангулов А. Н., Мишкурков П. Н. Особенности построения имитационной модели технологии работы железнодорожной станции в системе AnyLogic / *Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании*, 2012 : Научные труды SWorld. М-лы международн. науч.-практ. конф. – Вып. 3. – Т. 2. – Одесса : «Куприяненко», 2012. С. 7–13.
43. Rail Library webinar: case studies, library elements, and AI. URL: https://www.youtube.com/watch?v=RVeeqZ99wx0&ab_channel=AnyLogic (дата обращения: 13.08.2021).
44. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement learning: An introduction / Richard S. Sutton and Andrew G. Barto. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2018. 526 p. ISBN 978-0262039246.
45. Montigel M. Formal Representation of Track Topologies by Double Vertex Graphs // *Computers in Railways III* / T. Murthy [and others]. Washington, DC, 1992. Pp. 359–370.
46. Shekhar S., Singh A., Belur M. N., Rangaraj N. Development of a railway junction simulator for evaluation of control strategies and capacity utilization optimization / 2019 Fifth Indian Control Conference (ICC). New Delhi, India: IEEE, 09.01.2019–11.01.2019. Pp. 260–265.
47. Gillet B. E., Miller L. E., Johnson J. G. Vehicle dispatching – Sweep algorithm and extensions / *Disaggregation* / L. P. Ritzman [and others]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1979. Pp. 471–483. ISBN 978-94-015-7638-3; 978-94-015-7636-9.
48. Мишкурков П. Н., Рахмангулов А. Н., Фридрихсон О. В. Методика формирования транспортной сети железнодорожной станции // *Вестник УрГУПС*. 2021. № 3 (51). С. 50–64. ISSN 2079-0392.
49. Rakhmangulov A., Kolga A., Osintsev N., Stolpovskikh I., Sladkowski A. Mathematical model of optimal empty rail car distribution at railway transport nodes / *Transport Problems*. 2014. Vol. 9 (3). Pp. 125–132. ISSN 2300-861X.
50. Rakhmangulov A., Osintsev N., Muravev D., Legusov A. An Optimal Management Model for Empty Freight Railcars in Transport Nodes / *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*. 2019. Vol. 2 (1). Pp. 51–71. ISSN 2620-1607; 2620-1747.
51. Трофимов С. В., Рахмангулов А. Н. Выбор оптимальных методов оперативного управления работой промышленных транспортных систем : монография. – Магнитогорск : МГТУ, 2000. 145 с. ISBN 5-89514-166-8.
52. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N. Design of an ITS for Industrial Enterprises / *Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives* / A. Sladkowski [and others]. Cham: Springer International Publishing, 2016. Pp. 161–215. ISBN 978-3319191492.
53. Рахмангулов А. Н., Корнилов С. Н., Антонов А. Н. Выбор устройств идентификации и позиционирования железнодорожного подвижного состава для условий металлургических предприятий / *Современные проблемы транспортного комплекса России*. – 2014. – Т. 4. – № 1. – С. 16–20. ISSN 2222-9396.
54. Training AI-agents with Microsoft Project Bonsai. URL: <https://www.anylogic.com/features/artificial-intelligence/microsoft-bonsai/> (дата обращения: 20.06.2021).
55. Boost Performance over Your Baseline with Pathmind AI. URL: <https://www.anylogic.com/features/artificial-intelligence/pathmind/> (дата обращения: 13.06.2022).

List of references

1. Ghobakhloo M., Fathi M., Iranmanesh M., Maroufkhani P., Morales M. E. Industry 4.0 ten years on: A bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 302. P. 127052. ISSN 0959-6526.
2. Sahal R., Alsamhi S. H., Brown K. N., O'Shea D., McCarthy C., Guizani M. Blockchain-Empowered Digital Twins Collaboration: Smart Transportation Use Case // *Machines*. 2021. Vol. 9 (9). P. 193. ISSN 2075-1702.
3. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 108952–108971. ISSN 2169-3536.
4. Pouryousef H., Lautala P., White T. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe // *Journal of Modern Transportation*. 2015. Vol. 23 (1). Pp. 30–42. ISSN 2662-4753; 2662-4745.
5. Pachl J. Railway operation and control / 4-е изд. Mountlake Terrace WA: VTD Rail Pub, 2018. 302 p. ISBN 978-0-9719915-9-0.
6. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. Digital Twins: State-of-the-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications // *ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg*. 2020. Vol. 6 (3). P. 030901. ISSN 2332-9025; 2332-9017.
7. RTC – Rail Traffic Controller. URL: <https://berkeleysimulation.com/rtc.php> (accessed on: 3.08.2022).
8. RailSys® Software Suite. URL: <https://www.rmcon-int.de/railsys-en/railsys-suite/> (accessed on: 12.03.2022).
9. Medeossi G., Fabris S. de Simulation of Rail Operations. // *Handbook of Optimization in the Railway Industry* / R. Borndörfer [and others]. Cham: Springer International Publishing, 2018. P. 1–24. ISBN 978-3-319-72152-1; 978-3-030-10160-2; 978-3-319-72153-8.
10. OpenTrack Railway Technology. URL: <http://www.opentrack.ch/> (accessed on: 14.04.2022).
11. SYSTRA's RAILSIM X® Software Suite. URL: https://www.systracanada.com/IMG/pdf/systra_brochure_railsim_x.pdf (accessed on: 23.09.2021).
12. ISTRa – a system for automated construction of simulation models of railway stations and junctions. [ISTRa – sistema avtomatizirovannogo postroeniya imitatsionnykh modelej zheleznodorozhnykh stantsij i uzlov] URL: <http://trans-expert.ru/istra> (accessed on: 22.03.2022).
13. Nikitin A. B., Groshev V. A. Automation of control of the station technological process in real time mode // *News bulletin of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University [Avtomatizatsiya upravleniya stantsionnym tekhnologicheskim protsessom v rezhime real'nogo vremeni]* // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya* 2016. V. 2 (13). Pp. 229–238. ISSN 1815-588X; 2658-6851.
14. Mancera A., Bruckman D., Weidmann U. Single Wagonload Production Schemes Improvements Using GüterSim (Agent-based Simulation Tool) // *Transportation Research Procedia*. 2015. Vol. 10. P. 615–624. ISSN 2352-1457; 2352-1465.
15. Novotny R., Kavicka A. Scalable simulation models of railway traffic // 28th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2016. Genova: University of Genoa, 2016. P. 25–31.
16. Gély L., Dessagne G., Pesneau P., Vanderbeck F. A multi scalable model based on a connexity graph representation // *COMPRAIL 2010* / Ed. B. Ning, C. A. Brebbia: WIT Transactions on The Built Environment. Beijing, China: WIT PressSouthampton, UK, 31.08.2010–2.09.2010. P. 193–204.
17. Shabelnikov A. N., Olgeyzer I. A. Technology and Mathematical Basis of Digital Twin Creation in Railway Infrastructure // *Proceedings of the Fourth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (ITI'19)* / S. Kovalev [and others]. Cham: Springer International Publishing, 2020. Pp. 688–695. ISSN 2194-5365; 2194-5357.
18. He S., Song R., Chaudhry S. S. An integrated dispatching model for rail yards operations // *Computers & Operations Research*. 2003. Vol. 30 (7). Pp. 939–966. ISSN 0305-0548.
19. Nash A., Huerlimann D. Railroad simulation using OpenTrack // *Computers in Railways IX* / J. Allan [and others]. Southampton: WIT Press, 2004. Pp. 45–54.
20. Middelkoop A. D., Loeve L. Simulation of traffic management with FRISO // *COMPRAIL 2006*. / Под ред. J. Allan, C. A. Brebbia, A. F. Rumsey, G. Sciutto, S. Sone, C. J. Goodman. Prague, Czech Republic: WIT Press, 10.07.2006–12.07.2006. Pp. 501–509.

21. Lin E., Cheng C. YardSim: A rail yard simulation framework and its implementation in a major railroad in the U.S // 2009 Winter Simulation Conference (WSC 2009). Austin, TX, USA: IEEE, 13.12.2009–16.12.2009. С. 2532–2541.
22. Huang Y., Seck M. D., Verbraeck A. Component-based light-rail modeling in discrete event systems specification (DEVS) // SIMULATION. 2015. Vol. 91 (12). Pp. 1027–1051. ISSN 0037-5497.
23. Wang X., Rong L. Marshalling Yard Simulation Based on BP Neural Network Model // Fourth International Conference on Transportation Engineering. / Ed. Qiyuan Peng, Kelvin C. P. Wang. Chengdu, China: American Society of Civil Engineers, October 19–20, 2013. Pp. 1117–1122.
24. Roungas B., Meijer S., Verbraeck A. Validity of railway microscopic simulations under the microscope: two case studies // International Journal of System of Systems Engineering. 2018. Vol. 8 (4). P. 346. ISSN 2041-9031; 2041-904X.
25. Baugher R. W. Simulation of Yard and Terminal Operations / Handbook of Operations Research Applications at Railroads / B. W. Patty. Boston, MA: Springer US, 2015. Pp. 219–242. ISBN 978-1-4899-7570-6; 978-1-4899-7571-3.
26. Villon simulation tool. URL: <https://www.simcon.sk/en/tools> (accessed on: 13.06.2022).
27. Adamko N., Kavicka A., Klima V. Agent based simulation of transportation logistic systems / DAAAM International Scientific Book 2007 / Katalinic. DAAAM International Publishing, 2007. Pp. 407–422. ISBN 3-901509-60-7.
28. Licciardello R., Adamko N., Deleplanque S., Hosteins P., Liu R., Pellegrini P., Peterson A., Wahlborg M., Zatko M. Integrating yards, network and optimisation models towards real-time rail freight yard operations // Ingegneria Ferroviaria. 2020. Vol. 75 (6). Pp. 417–447. ISSN 0020-0956.
29. Adamko N., Zatko M. Optimised Real-time Yard and Network Management: D 4.2 Yard simulation software for WP6. URL: <https://projects.shift2rail.org/download.aspx?id=ac5f4396-3841-4825-bfbb-4bcb4f91eb55> (accessed on: 8.07.2022).
30. AnyLogic Simulation Software. URL: <https://www.anylogic.com> (дата обращения: 4.03.2022).
31. Lyubchenko A., Bartosh S., Kopytov E., Shiler A., Kildibekov A. AnyLogic-Based Discrete Event Simulation Model of Railway Junction / Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems / R. Silhavy [and others]. Cham: Springer International Publishing, 2017. Pp. 141–149. ISBN 978-3-319-57263-5; 978-3-319-57264-2.
32. Marinov M., Viegas J. A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations / Simulation Modelling Practice and Theory. 2009. Vol. 17 (6). Pp. 1106–1129. ISSN 1569-190X.
33. Arena Simulation Software. URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html> (accessed on: 13.05.2022).
34. Plant Simulation. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html> (дата обращения: 3.08.2022).
35. FlexSim 3D Simulation Modeling and Analysis Software. URL: <https://www.flexsim.com/> (accessed on: 6.07.2021).
36. Borodin A., Kozlov P., Kolokolnikov V., Osokin O. Construction of Efficient Railway Operating Domains Based on a Simulation Examination / VIII International Scientific Siberian Transport Forum / Z. Popovic [and others]. Cham: Springer International Publishing, 2020. Pp. 1143–1151. ISBN 978-3-030-37918-6; 978-3-030-37919-3.
37. Marinov M., Şahin İ., Ricci S., Vasic-Franklin G. Railway operations, time-tabling and control // Research in Transportation Economics. 2013. Vol. 41 (1). Pp. 59–75. ISSN 0739-8859.
38. Cenani Ş. Emergence and complexity in agent-based modeling: Review of state-of-the-art research // Journal of Computational Design. 2021. Vol. 2 (2). Pp. 1–24. ISSN 2687-4318.
39. Abar S., Theodoropoulos G. K., Lemarinier P., O'Hare G. M. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software // Computer Science Review. 2017. Vol. 24. Pp. 13–33. ISSN 1574-0137.
40. Schedit M. Proposal for a Railway Layer Model // COMPRAIL 2018 / Под ред. G. Passerini, J. M. Mera, N. Tomii, P. Tzieropoulos: WIT Transactions on The Built Environment. Lisbon, Portugal: WIT PressSouthampton UK, 2.07.2018–4.07.2018. Pp. 157–168.

41. Woroniuk C., Marinov M. Simulation modelling to analyse the current level of utilisation of sections along a rail route // *Journal of Transport Literature*. 2013. Vol. 7 (2). Pp. 235–252. ISSN 2238-1031.
42. Rakhmangulov A. N., Mishkurov P. N. Peculiarities of building a simulation model of railway station operation technology in the AnyLogic system / *Modern problems and solutions in science, transport, production and education*, 2012 : Scientific papers of SWorld. Moscow International Research to Practice Conference – Issue 3. – Vol. 2. – Odessa : «Kuprienko» [Osobennosti postroeniya imitatsionnoj modeli tekhnologii raboty zheleznodorozhnoj stantsii v sisteme AnyLogic / *Sovremennye problemy i puti ikh resheniya v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii*, 2012 : Nauchnye trudy SWorld. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii – Vypusk 3. – T. 2. – Odessa : «Kuprienko»] 2012. Pp. 7–13.
43. Rail Library webinar: case studies, library elements, and AI. URL: https://www.youtube.com/watch?v=RVeeqZ99wx0&ab_channel=AnyLogic (accessed on: 13.08.2021).
44. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement learning: An introduction / Richard S. Sutton and Andrew G. Barto. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2018. 526 p. ISBN 978-0262039246.
45. Montigel M. Formal Representation of Track Topologies by Double Vertex Graphs // *Computers in Railways III* / T. Murthy [and others]. Washington, DC, 1992. Pp. 359–370.
46. Shekhar S., Singh A., Belur M. N., Rangaraj N. Development of a railway junction simulator for evaluation of control strategies and capacity utilization optimization / 2019 Fifth Indian Control Conference (ICC). New Delhi, India: IEEE, 09.01.2019–11.01.2019. Pp. 260–265.
47. Gillet B. E., Miller L. E., Johnson J. G. Vehicle dispatching – Sweep algorithm and extensions / *Disaggregation* / L. P. Ritzman [and others]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1979. Pp. 471–483. ISBN 978-94-015-7638-3; 978-94-015-7636-9.
48. Mishkurov P. N., Rakhmangulov A. N., Friedrichson O. V. Methodology for shaping the transport network of a railway station // *Bulletin of USURT*. [Metodika formirovaniya transportnoj seti zheleznodorozhnoj stantsii // *Vestnik UrGUPS*] 2021. № 3 (51). pp. 50–64. ISSN 2079-0392.
49. Rakhmangulov A., Kolga A., Osintsev N., Stolpovskikh I., Sladkowski A. Mathematical model of optimal empty rail car distribution at railway transport nodes / *Transport Problems*. 2014. Vol. 9 (3). Pp. 125–132. ISSN 2300-861X.
50. Rakhmangulov A., Osintsev N., Muravev D., Legusov A. An Optimal Management Model for Empty Freight Railcars in Transport Nodes / *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*. 2019. Vol. 2 (1). Pp. 51–71. ISSN 2620-1607; 2620-1747.
51. Trofimov S. V., Rakhmangulov A. N. Selecting the optimal methods of operational management of industrial transport systems : monograph. – Magnitogorsk : NMSTU, [Vybor optimal'nykh metodov operativnogo upravleniya rabotoj promyshlennykh transportnykh sistem : monografiya. – Magnitogorsk : MGTU] 2000. 145 p. ISBN 5-89514-166-8.
52. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N. Design of an ITS for Industrial Enterprises / *Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives* / A. Sladkowski [and others]. Cham: Springer International Publishing, 2016. Pp. 161–215. ISBN 978-3319191492.
53. Rakhmangulov A. N., Kornilov S. N., Antonov A. N. Selection of identification and positioning devices for railway rolling stock for the conditions of metallurgical enterprises / *Current issues of transport complex of Russia*. [Vybor ustroystv identifikatsii i pozitsionirovaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava dlya uslovij metallurgicheskikh predpriyatij / *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii*] – 2014. – V.4. – № 1. – pp. 16–20. ISSN 2222-9396.
54. Training AI-agents with Microsoft Project Bonsai. URL: <https://www.anylogic.com/features/artificial-intelligence/microsoft-bonsai/> (accessed on: 20.06.2021).
55. Boost Performance over Your Baseline with Pathmind AI. URL: <https://www.anylogic.com/features/artificial-intelligence/pathmind/> (accessed on: 13.06.2022).

Статья сдана в редакцию 18 августа 2022 года

Управление в технических системах

УДК 656.02

Ю. В. Горелов, Т. Н. Ткачева

Подходы к определению коэффициента геометрии сетевых организационных структур

UDC 656.02

Yu. V. Gorelov, T. N. Tkacheva

Approaches to determining the geometry coefficient of network organizational structures

Аннотация

В статье проанализированы методики определения коэффициента геометрии в сетевых организационных структурах и предложены свои способы его вычисления. Коэффициент геометрии представлен в виде интегрального показателя, консолидирующего коэффициенты заполнения орбит, связности и критичности связей. Коэффициент заполнения орбит характеризует организационную сеть через резервные производственные мощности, реализуемые предприятиями организационной сети на свободном рынке. Коэффициент

связности характеризует избыточный пробег, транспортную загрузку, расход топлива и удаленность элементов организационных сетей от интегратора. Коэффициент критичности связей характеризует организационную сеть через наличие субпоставщиков у элементов, принадлежащих первой от интегратора орбите сетевой структуры. Разработанная методика определения коэффициента геометрии организационной сети позволяет оценить работу сети со стороны геометрических показателей. Также проанализированы существующие методики определения

коэффициента геометрии сетевых организационных структурах. Выявлены недостатки и особенности вычисления геометрических характеристик организационных сетей. Предложены авторские методы определения показателей, входящих в коэффициент геометрии сетевых структур.

Коэффициент геометрии представлен в виде интегрального показателя, консолидирующего коэффициенты заполнения орбит, связности и критичности связей. Коэффициент заполнения орбит характеризует организационную сеть через резервные производственные мощности,

Статья рекомендована к публикации П. М. Тихоновым, канд. техн. наук, доцентом Уральского государственного университета путей сообщения. E-mail: tikhonov.p.m@gmail.com.

Юрий Викторович Горелов, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Мосты и транспортные тоннели» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: YGorelov@usurt.ru. ORCID 0000-0003-0645-8082.

Татьяна Николаевна Ткачева, доцент; кафедра «Мосты и транспортные тоннели» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: TTKacheva@usurt.ru. ORCID 0000-0001-5040-9582.

© Ю. В. Горелов, Т. Н. Ткачева, 2022

The article is recommended for publishing P. M. Tikhonov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Ural State University of Railway Transport. E-mail: tikhonov.p.m@gmail.com.

Yuri Viktorovich Gorelov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; «Bridges and Transport Tunnels» Department of the Ural State University of Railway Transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: YGorelov@usurt.ru. ORCID 0000-0003-0645-8082.

Tatiana Nikolayevna Tkacheva, Associate Professor; «Bridges and Transport Tunnels» Department of the Ural State University of Railway Transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: TTKacheva@usurt.ru. ORCID 0000-0001-5040-9582.

© Y. V. Gorelov, T. N. Tkacheva, 2022

реализуемые предприятиями организационной сети на свободном рынке. Чем большим объемом резервных производственных мощностей обладают предприятия первой от интегратора орбиты, тем больше наполнение организационной сети в целом. Коэффициент связности характеризует избыточный пробег, транспортную загрузку, расход топлива и удаленность элементов организационных сетей от интегратора. Коэффициент критичности связей характеризует организационную сеть через наличие субпоставщиков у элементов, принадлежащих первой от интегратора орбите сетевой структуры.

Разработанная методика определения коэффициента геометрии организационной сети позволяет оценить работу сети со стороны геометрических характеристик. Методика может быть применена при формировании сетевой организационной структуры и количественной оценки ее элементов.

Ключевые слова: организационная сеть, математическая модель, производственные фонды, геометрия организационной сети, коэффициент геометрии, коэффициент наполнения, коэффициент связности, коэффициент критичности связей.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-61-66

Abstract

The article analyzes the methods of determining the geometry coefficient in net-

work organizational structures and offers its own ways of calculating it. The geometry coefficient is presented as an integral indicator which consolidates the coefficients of filling orbits, connectivity and criticality of connections. The orbit filling coefficient characterizes the organizational network through the reserve production capacities realized by the enterprises of the organizational network in the free market. The connectivity coefficient characterizes excess mileage, transport load, fuel consumption and the remoteness of organizational network elements from the integrator. The coefficient of criticality of connections characterizes the organizational network through availability of sub-suppliers in the elements belonging to the first from the integrator orbit of the network structure. The developed methodology for determining the organizational network geometry coefficient makes it possible to evaluate the work of the network from the side of geometric indicators. The existing methods of determining the coefficient in network organizational structures are also analyzed. The disadvantages and features of calculating the geometric characteristics of organizational networks are revealed. The author's methods for determining the indicators included in the coefficient of the geometry of network structures are proposed.

The geometry coefficient is presented as an integral

indicator that consolidates the filling coefficients of orbits, connectivity and criticality of connections. The orbit filling coefficient characterizes the organizational network through the reserve production capacities realized by the enterprises of the organizational network in the free market. The greater the volume of reserve production capacities possessed by enterprises of the first orbit integrator, the greater the filling of the organizational network as a whole. The connectivity coefficient characterizes excess mileage, transport load, fuel consumption and the remoteness of organizational network elements from the integrator. The coefficient of criticality of connections characterizes the organizational network through availability of sub-suppliers in the elements belonging to the first from the integrator orbit of the network structure.

The developed methodology for determining the organizational network geometry coefficient allows us to evaluate the work of the network from the geometric characteristics side. The methodology can be applied when forming a network organizational structure and quantifying its elements.

Keywords: organizational network, mathematical model, production assets, geometry of the organizational network, geometry coefficient, filling coefficient, connectivity coefficient, coefficient of criticality of connections.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-61-66

Эффективное функционирование сетевых организационных структур обусловлено их взаимозависимыми показателями надежности и устойчивости, сохраняемыми при бесперебой-

ном функционировании хозяйствующих субъектов сетевой структуры, и неизменной способности элементов противостоять пагубному внешнему и внутреннему воздействию.

Необходимость постоянно отслеживать состояние элементов организационных сетей, оценивая их способность к устойчивому функционированию, подтверждает актуальность исследования.

Чтобы оценить устойчивость функционирования организационных сетей, предлагается ряд геометрических и технико-экономических показателей, характеризующих надежность сетевых организационных структур [1–4].

Функциональную надежность элементов организационных сетей предлагается оценивать комплексным показателем геометрии сети $K_{г.с}$ [5, 6]. Способность сетевых структур приспосабливаться к изменениям во внешней экономической среде оценивает предложенный показатель геометрии сети, включающий в себя три дополнительных показателя:

$$K_{г.с} = \sqrt{\frac{(\eta^{(k)})^2 + s^2 + m^2}{3}}, \quad (1)$$

где $\eta^{(k)}$ – коэффициент наполнения орбит; s – коэффициент связности; m – коэффициент критичности связей.

Надежное и устойчивое функционирование организационных сетей зависит от эффективности их геометрических структур, оцениваемых коэффициентом геометрии сети.

Рассмотрим каждый из показателей геометрии сети в отдельности и предложим собственное видение исследуемых показателей. Коэффициент наполнения орбит $\eta^{(k)}$ исследован в работах [1, 2, 5, 6]. В работах [5, 6] коэффициент наполнения орбит $\eta^{(k)}$ определяется так:

$$\eta^{(k)} = \frac{\sum_1^i C_{\text{опф}}(i) \cdot C_{\text{фо}}(i)}{\sum_1^j \sum_1^i C_{\text{опф}}(i) \cdot C_{\text{фо}}(i)}, \quad (2)$$

где $C_{\text{опф}}$ – стоимость основных производственных фондов, руб.; $C_{\text{фо}}$ – фондоотдача, руб.

Однако если рассмотреть данный показатель подробно, то в представленной

трактовке коэффициент наполнения орбит представляет собой некую долю исследуемого параметра одной орбиты по отношению к сумме всех орбит. То есть независимо от стоимости основных производственных фондов и фондоотдачи наполнение одной орбиты будет

всегда выражено как $\eta^{(k)} = \frac{1}{n}$, где n –

количество орбит в организационной сети. При этом коэффициент наполнения организационной сети в сумме всегда будет равен единице. Таким образом, этот показатель является неинформативным.

Кроме того, стоимость основных производственных фондов и фондоотдача – показатели, скорее, экономические, чем геометрические. Геометрически данный показатель определяется как отношение количества ($N^{(k)}$) узлов-элементов сети, расположенных на орбите k организационной сети, к суммарному количеству узлов-элементов в организационной сети в целом [7].

Чтобы оценить наполнение организационных сетей, предлагается оценивать этот показатель через наполнение элементов, непосредственно связанных с интегратором, так как эти элементы поставляют продукцию интегратору организационной сети напрямую, а связанные с ними элементы являются субпоставщиками.

Кроме того, необходимо учесть такой аспект, как резервирование организационной сети, потому что объем зарезервированных производственных мощностей предприятий-элементов сетевых структур в большей мере отвечает за устойчивое функционирование сетевых структур и их способность изменять свои геометрические и экономические характеристики под внешним воздействием. Чем большим объемом зарезервированных производственных мощностей обладает организационная сеть, тем лучше ее геометрические характеристики. Под резервированием понимается объем производственных мощностей элементов

сетевых структур – дочерних предприятий, зависимых предприятий и предприятий на договорном праве, не вошедших в структуру организационных сетей по директивным показателям [5, 6, 8]. Мы будем понимать под резервом производственные мощности предприятий-элементов сети на вещном и договорном праве, реализуемые на свободном рынке.

Таким образом, наполнение организационной сети целесообразно характеризовать через резервы производственных мощностей предприятий, непосредственно связанных с интегратором:

$$\eta = \frac{R_{\text{доч.и}} + R_{\text{зав.и}} + R_{\text{дог.и}}}{\sum_1^i R_{\text{доч}} + R_{\text{зав}} + R_{\text{дог}}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{доч.и}}$, $R_{\text{зав.и}}$, $R_{\text{дог.и}}$ – резервные производственные мощности дочерних предприятий, зависимых предприятий и предприятий на договорном праве, непосредственно связанных с интегратором; $R_{\text{доч}}$, $R_{\text{зав}}$, $R_{\text{дог}}$ – резервные производственные мощности дочерних предприятий, зависимых предприятий и предприятий на договорном праве всех элементов организационной сети.

Таким образом, наполнение предприятий-элементов организационных сетей, непосредственно взаимодействующих с интегратором, характеризует наполнение сетевых структур в целом.

Следующий показатель, характеризующий геометрическую устойчивость функционирования организационных сетей, – коэффициент связности s [1, 2, 6, 7].

Связность элементов принято оценивать как исключительно геометрическую характеристику. Связность сетевой структуры определяется как отношение фактического количества циклов в организационной сети $N_{\text{ц.ф}}$ к максимально возможному $N_{\text{ц.в}}$ [6]. Аналогично предложенному определению связности в работе [7] определяется авартия

(самообеспечение) элементов сетевой организационной структуры. Коэффициент связности определен так [7]:

$$s^{(k)} = 2 \cdot \frac{R^{(k)}}{N^{(k)}}, \quad (4)$$

где $R^{(k)}$ – общее число дуг между различными узлами орбиты с номером k (число ребер, вершинами которого служат только предприятия орбиты k); $N^{(k)}$ – число узлов сети G , находящихся на орбите с номером k .

Одно из направлений повышения эффективности функционирования сетевой организационной структуры – достижение необходимой связности между ее элементами и интегратором, который можно рассматривать как коэффициент связности. Связность i -й цепи поставок в организационной сети может быть выражена как

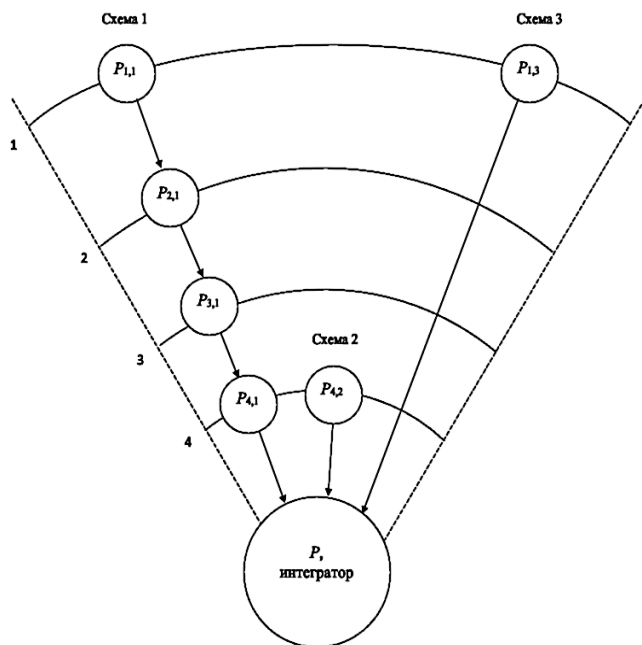
$$s(i) = \frac{N_{\text{орб}}(i)}{l_{\text{ф}}(i)} \cdot i_{\text{тр}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{орб}}$ – номер орбиты, на которой расположен элемент сети, поставляющий продукцию интегратору (нумерация начинается с дальней орбиты от интегратора); $l_{\text{ф}}$ – фактическая удаленность от интегратора (количество промежуточных звеньев – субпоставщиков); $i_{\text{тр}}$ – интенсивность транспортного сообщения между элементами, измеряемая от 0 до 1.

Такие показатели, как избыточный пробег, транспортная загрузка, расход топлива и аварийность напрямую влияют на связность организационных сетей и должны учитываться в показателе, характеризующем интенсивность транспортного сообщения $i_{\text{тр}}$ [10].

Расчеты коэффициентов связности для схем поставок 1–3 при интенсивности транспортного сообщения, равного 0,6 (рис.), представлены в таблице.

Таким образом, связность организационной сети в целом можно оценивать как среднее геометрическое:



Пример поставок в организационной сети

Расчеты коэффициентов связности для схем поставок 1–3

	Схема 1	Схема 2	Схема 3
Связность $s(i)$	0,15	0,6	2,4

$$S = \sqrt{\frac{(s(1))^2 + (s(2))^2 + \dots + (s(i))^2}{i}}. \quad (5)$$

Например, для организационной сети (см. рис.) коэффициент связности $s = 1,431$.

Показатель критичности связей характеризует, насколько предприятия-элементы сети, не взаимодействующие с интегратором напрямую, задействованы в кооперации организационной сети в целом. Для определения коэффициента критичности пути авторами предложено выражение [5, 6]:

$$m = 1 - \frac{\sum I(v)}{\sum R(e)}, \quad (6)$$

где $\sum I(v)$ – суммарное количество вхождений точек в маршруты до ин-

тегратора, не являющихся окончательными в организационной сети; $\sum N(e)$ – общее число маршрутов в организационной сети.

Появление в структуре организационных сетей критичных узлов говорит, что в сети недостаточно развиты кооперация, и при потере производственных мощностей поставщика (обозначенных как «критичный») велик риск потерять и производственные мощности всех его субпоставщиков. Однако при простейшей конфигурации сетевой структуры типа «звезда» определение критичности пути перестает быть актуальным, так как применимо только к сетям сложных конфигураций, а в данной структуре критичность пути $m = 1$.

Однако отсутствие в сетевой организационной структуре субпоставщиков, напротив, должно понижать значение оценочных характеристик. Таким образом, принято вычислять критичность связей организационных сетей формулой

$$m = 1 - \frac{N_{\text{инт}}}{N_{\text{орб}}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{инт}}$ – количество связей взаимодействия между интегратором и первой от него орбитой; $N_{\text{орб}}$ – количество связей взаимодействия на вышележащих орбитах.

Таким образом, увеличение количества субпоставщиков, выраженное в количестве связей с вышележащими орбитами, повлечет за собой увеличение показателя критичности связей во всей организационной сети.

Выводы

1. Коэффициент геометрии организационной сети является интегральным показателем, основывающемся на трех коэффициентах: наполнение орбит, связность, критичность связей.

2. Коэффициент наполнения орбит характеризует наполненность организационных сетей резервами. В качестве резервов организационных сетей рассматриваются производственные мощности элементов сети, которые реализуются на свободном рынке.

3. Коэффициент связности характеризует сложность транспортировки и удаленность продукции элементов организационных сетей от интегратора.

4. Коэффициент критичности связей изменяется от 0 до 1, где нулевое значение говорит о недостаточном количестве субпоставщиков в организационной сети. ■

Литература

1. Горелова Д. Ю. Методологические подходы определения коэффициента устойчивости в сетевых организационных структурах // Вестник УрГУПС. 2020. № 2 (46). С. 110–119. ISSN 2079-0392.
2. Горелова Д. Ю. Математическая формализация показателей оценки организационной сети // Транспорт Урала. – 2020. – № 3. – С. 94–99. ISSN 1815-9400.
3. Сай В. М., Сизый С. В. Организационные структуры как мультиоператорные сети. Задачи прочности и устойчивости // Транспорт Урала. 2009. № 2 (21). С. 5–9. ISSN 1815-9400.
4. Сизый С. В. Устойчивость и стабильность предприятий в организационных сетях // Вестник РГУПС. 2010. № 3. С. 122–127. ISSN 0201-7272.
5. Say V. M., Gorelova D. Yu., Yakimov M. R. Economic and Mathematical Model of Substantiation of Organizational Network Elements // Transportation Research Procedia; Vol. 61. – 2022. – Pp. 36–45.
6. Горелова Д. Ю. Оценка устойчивого развития и функционирования сетевых организационных структур : дисс. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Екатеринбург : УрГУПС, 2022, 170 с.
7. Сай В. М. Методология построения сетевых организационных структур на железнодорожном транспорте : дисс. ... на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. 389 с.
8. Горелова Д. Ю. Методика определения коэффициента эластичности организационной сети // Вестник УрГУПС. 2021. № 3 (51). С. 116–126. ISSN 2079-0392.
9. Поляков А. С. Связность улично-дорожной сети городов как фактор социально-экономического развития города // Современная научная мысль. 2019. № 6. С. 214–219. ISSN 2308-264X.
10. Поляков А. С., Жанказиев С. В. Повышение эффективности функционирования транспортного комплекса города // Наука и техника в дорожной отрасли. 2016. № 4. С. 3–6. ISSN 1993-8543.

List of references

1. Gorelova D. Yu. Methodological approaches to determining the coefficient of stability in network organizational structures // Herald of USURT [Metodologicheskie podkhody opredeleniya koefitsienta ustojchivosti v setevykh organizatsionnykh strukturakh // Vestnik UrGUPS]. 2020. № 2 (46). Pp. 110–119. ISSN 2079-0392.
2. Gorelova D. Yu. Mathematical formalization of organizational network evaluation indicators // Transport of the Urals [Matematicheskaya formalizatsiya pokazatelej otsenki organizatsionnoj seti // Transport Urala]. – 2020. – № 3. – Pp. 94–99. ISSN 1815-9400.
3. Sai V. M., Sizy S. V. Organizational structures as multi-operator networks. Problems of strength and stability // Transport of the Urals [Organizatsionnye struktury kak multioperatornye seti. Zadachi prochnosti i ustojchivosti // Transport Urala]. 2009. № 2 (21). Pp. 5–9. ISSN 1815-9400.
4. Sizy S. V. Steadiness and stability of enterprises in organizational networks // Bulletin of RSURT [Ustojchivost' i stabil'nost' predpriyatij v organizatsionnykh setyakh // Vestnik RGUPS]. 2010. № 3. Pp. 122–127. ISSN 0201-7272.
5. Sai V. M., Gorelova D. Yu., Yakimov M. R. Economic and Mathematical Model of Substantiation of Organizational Network Elements // Transportation Research Procedia; Vol. 61. – 2022. – Pp. 36–45.
6. Gorelova D. Yu. Assessment of sustainable development and functioning of network organizational structures: diss. ... for the degree of Candidate of Technical Sciences. – Yekaterinburg : USURT [Otsenka ustojchivogo razvitiya i funktsionirovaniya setevykh organizatsionnykh struktur : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. – Ekaterinburg : UrGUPS], 2022, 170 p.
7. Sai V. M. Methodology of building network organizational structures in railway transport : diss. ... for the degree of Doctor of Technical Sciences. – Yekaterinburg : USURT [Metodologiya postroeniya setevykh organizatsionnykh struktur na zheleznodorozhnom transporte : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. – Ekaterinburg : UrGUPS], 2003. 389 p.
8. Gorelova D. Yu. Methodology for determining the coefficient of elasticity of the organizational network // Herald of USURT [Metodika opredeleniya koefitsienta ehlastichnosti organizatsionnoj seti // Vestnik UrGUPS]. 2021. № 3 (51). Pp. 116–126. ISSN 2079-0392.
9. Polyakov A. S. Connectivity of the street and road network of cities as a factor of socio-economic development of the city // Modern scientific thought [Svyaznost' ulichno-dorozhnoj seti gorodov kak faktor sotsial'no-ehkonomicheskogo razvitiya goroda // Sovremennaya nauchnaya mysl']. 2019. № 6. Pp. 214–219. ISSN 2308-264X.
10. Polyakov A. S., Zhankaziev S. V. Improving the efficiency of functioning of the transport complex of the city // Science and Technology in the road industry [Povyshenie ehffektivnosti funktsionirovaniya transportnogo kompleksa goroda // Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli]. 2016. № 4. Pp. 3–6. ISSN 1993-8543.

Статья сдана в редакцию 30 мая 2022 года

УДК 629+519.711.3

А. С. Космодамианский, А. И. Ивахин, Д. В. Котяев

Математическая модель тягового электропривода колесной пары тепловоза с электрической системой повышения сцепных качеств

UDC 629+519.711.3

A. S. Kosmodamianskiy, A. I. Ivakhin, D. V. Katayev

Mathematical model of traction electric drive of a diesel locomotive wheelset with electric boost system of coupling qualities

Аннотация

Разработана математическая модель тягового электропривода колесной пары тепловоза, позволяющая проводить теоретический анализ повышения сцепных качеств при воздействии электрическим током на контакты колес с рельсами. Для математического описания процессов, происходящих в электродвигателе, использован классический метод расчета, в основу которого положена обобщенная электрическая машина. При исследовании электропривода не требуется учет упругих связей в механической части,

поэтому она представлена в виде одномассовой расчетной схемы.

На процессы, происходящие в системе электропривода, влияют разные факторы. Касательная сила тяги, определяющая момент статической нагрузки, может иметь различные значения, определяемые сопротивлением движению состава. Наибольшая по сцеплению сила тяги зависит от уменьшения нагрузки на колесную пару в тяговом режиме и от расчетного коэффициента сцепления колес с рельсами, который имеет нелинейный падающий характер, особенно

в зоне малых скоростей движения. Загрязнение поверхностей катания колес и рельсов приводит к уменьшению физического коэффициента сцепления. Подача электрического тока в зоны контакта колес с рельсами увеличивает коэффициент сцепления, предельные значения которого в различных состояниях контакта по степени загрязнения описаны соответствующими регрессионными математическими моделями.

При анализе тяговых свойств колесной пары кроме основных параметров электропривода необходимо учитывать ее разгрузку,

Статья рекомендована к публикации А. П. Буйновым, д-ром техн. наук, профессором кафедры «Электрическая тяга» УрГУПС. E-mail: ABuinosov@usurt.ru.

Андрей Сергеевич Космодамианский, д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)); Москва, Россия. E-mail: askosm@mail.ru. ORCID 0000-0002-7835-3039.

Александр Иванович Ивахин, канд. тех. наук, доцент; кафедра «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета; г. Брянск, Россия. E-mail: nivahina@inbox.ru. ORCID 0000-0002-0306-016X.

Дмитрий Викторович Котяев, заместитель главного инженера АО ВНИКТИ (Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава); г. Коломна, Россия. E-mail: kotyaev-dv@vnikti.com. ORCID 0000-0001-6837-9051.

© А. С. Космодамианский, А. И. Ивахин, Д. В. Котяев, 2022

The article is recommended for publishing A. P. Buinov, Dr. Tekhn. Sciences, Professor of the Department of Electric Traction, UrGUPS. E-mail: ABuinosov@usurt.ru.

Andrey Sergeevich Kosmodamianskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department «Traction Rolling Stock» of the Russian University of Transport (RUT (MIIT)); Moscow, Russia. E-mail: askosm@mail.ru. ORCID 0000-0002-7835-3039.

Alexander Ivanovich Ivakhin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Department of «Rolling stock of Railways» of Bryansk State Technical University; Bryansk, Russia. E-mail: nivahina@inbox.ru. ORCID 0000-0002-0306-016X.

Dmitriy Viktorovich Konyayev, Deputy Chief Engineer of JSC VNIKTI (Scientific-Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock); Kolomna, Russia. E-mail: kotyaev-dv@vnikti.com. ORCID 0000-0001-6837-9051.

© A. S. Kosmodamianskiy, A. I. Ivakhin, D. V. Kotyaev, 2022

определяемую коэффициентами разгрузки и использования сцепного веса, а также повышение коэффициента сцепления при воздействии электрическим током на зоны тяговых контактов. Исследования математической модели следует проводить с учетом различных состояний контактов по степени загрязнения.

Ключевые слова: тепловоз, повышение сцепных качеств, электрический ток, колесная пара, математическая модель.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-67-73

Abstract

A mathematical model of the traction electric drive of a diesel locomotive wheel-set has been developed, which allows for theoretical analysis of the increase in coupling

qualities when exposed to electric current on the contacts of wheels with rails. For mathematical description of the processes occurring in the electric motor, a classical calculation method is used, which is based on a generalized electric machine. When studying the electric drive, it is not necessary to take into account elastic bonds in the mechanical part, therefore it is presented in the form of a one-mass calculation scheme.

The processes occurring in the electric drive system are influenced by various factors. The tangential thrust force, which determines the moment of static load, can have different values determined by resistance to the movement of the train. The greatest traction force depends on reduction of the load on the wheelset

in traction mode and on the calculated coefficient of adhesion of the wheels to the rails, which has a non-linear falling character, especially in the zone of low speeds. Contamination of the rolling surfaces of wheels and rails leads to decrease in the physical coefficient of adhesion. The supply of electric current to the contact zones of wheels with rails increases the coefficient of adhesion, the limit values of which in various contact states according to the degree of contamination are described by the corresponding regression mathematical models.

Keywords: diesel locomotive, improvement of coupling performance characteristics, electric current, wheelset, mathematical model.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-67-73

Воздействием электрического тока на зоны контакта колес с рельсами можно существенно повысить сцепные качества локомотива [1, 2]. Для этого на тепловозах с электрической передачей предложены системы, основанные на подаче в контактные зоны тока тягового генератора [3]. Для теоретического анализа, направленного на изучение повышения сцепления и, следовательно, тяговых свойств многоосного тепловоза, выполнено математическое моделирование электрического привода наиболее разгруженной колесной пары.

Такая колесная пара в многодвигательном электроприводе чаще подвержена срыву в боксование и поэтому ограничивает силу тяги локомотива.

Электромеханическая система тягового привода колесной пары содержит тяговый генератор Г, выпрямительную установку ВУ, тяговый электродвигатель постоянного тока ТЭД и механическую часть МЧ. Управление электроприводом осуществляется системой автоматического регулирования САР (рис. 1).

Параметры каждого элемента привода влияют на процессы во всей системе.

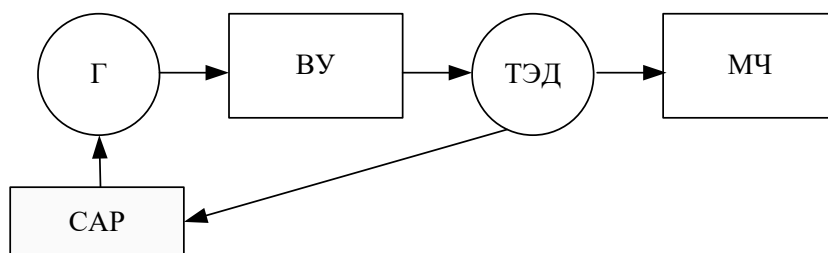


Рис. 1. Функциональная система электропривода

Для решения задач исследований при моделировании учтены только свойства ТЭД, напряжения питания и МЧ. При этом тяговый электродвигатель представлен в виде системы катушек индуктивности, связанных друг с другом. Он работает без насыщения стали магнитопровода и питается от тягового генератора, обладающего бесконечно большой мощностью. Механическая часть рассмотрена как абсолютно жесткая система с сосредоточенной массой.

Математическую модель электропривода во многом определяет модель ТЭД. Для теоретического изучения процессов в электрических машинах используется численный анализ электромагнитных полей, в основу которого положен метод конечных элементов [4]. С его помощью оценивают влияние на работу машины большинства внутренних и внешних факторов. Однако при исследованиях электромеханических систем из-за проведения расчетов затруднено применение моделей, разработанных на основе этого метода. Существуют математические модели, полученные на базе метода проводимостей зубцовых контуров [5]. Особенность использования таких моделей заключается в численном определении магнитного поля в небольшой зоне машины и в последующем суммировании результатов расчета для всей обмотки. Этот метод сходен с методом конечных элементов.

Для математического описания процессов, происходящих в ТЭД, выбран классический метод расчета с использованием обобщенной электрической машины. В качестве последней принята двухфазная двухполюсная идеализированная модель электрической машины [6]. Двигатель постоянного тока имеет неподвижное относительно статора магнитное поле. Поэтому для получения математического описания динамических процессов в модели применены неподвижные в пространстве оси α и β . В этом случае уравнения электрического равновесия относительно потокоцеплений Ψ_i и уравнение электромеханического

преобразования энергии машины имеют вид [6]

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= i_{1\alpha} R_1 + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}, \\ u_{1\beta} &= i_{1\beta} R_1 + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt}, \\ u_{2\alpha} &= i_{2\alpha} R_2 + \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} + \omega_{эл} \Psi_{2\beta}, \\ u_{2\beta} &= i_{2\beta} R_2 + \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} - \omega_{эл} \Psi_{2\alpha}, \\ M &= p_n L_{12} (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Двигателю постоянного тока с последовательным возбуждением в системе осей α, β соответствует схема, содержащая одну якорную обмотку (ОЯ), по которой протекает постоянный ток $i_{я}$. Она создает неподвижное в пространстве поле, направленное по оси щеток машины α . По этой оси также направлена магнитодвижущая сила (МДС) обмоток дополнительных полюсов (ДП). Кроме того, в цепь якоря включено общее контактное сопротивление R_k токоподводящих устройств, обеспечивающих подачу тока на ось колесной пары, и контактов колес с рельсами. МДС статора создает обмотка возбуждения ОВ, ориентированная по оси β и включенная последовательно в цепь якоря (рис. 2).

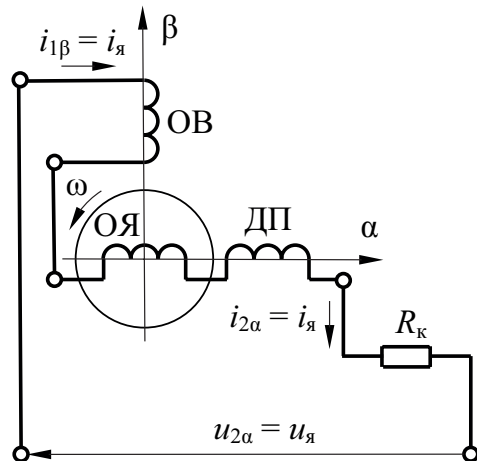


Рис. 2. Схема модели двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Для модели (рис. 2) система уравнений (1) принимает вид

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{я}} &= i_{\text{я}} R_{\text{я}\Sigma} + L_{\text{я}\Sigma} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + p_{\text{п}} L_{12} i_{\text{я}} \omega \\ M &= p_{\text{п}} L_{12} i_{\text{я}}^2 \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

В уравнениях (2) суммарное сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}\Sigma}$ содержит сопротивления обмоток якоря $R_{\text{я}}$ и $R_{\text{дп}}$, обмотки возбуждения $R_{\text{в}}$ и общее контактное сопротивление $R_{\text{к}}$. Суммарная индуктивность якорной цепи $L_{\text{я}\Sigma}$ составлена из индуктивностей рассеяния обмоток ОЯ, ДП и полной индуктивности обмотки возбуждения $L_{\text{в}}$. Параметр L_{12} определяет взаимную индуктивность катушек.

Механическая часть привода содержит ротор ТЭД, зубчатую передачу и колесную пару, установленную на рельсах. К основным параметрам кинематической схемы относятся моменты инерции ротора J_1 , шестерни J_2 , зубчатого колеса J_3 и колесной пары с учетом инерционности поезда J_4 . К ротору ТЭД при скорости ω_1 приложен электромагнитный момент M , под действием которого механическая часть приводится в движение. При этом колесная пара вращается со скоростью ω_2 , а к поверхностям катания колес с линейной скоростью v приложена касательная сила тяги $F_{\text{к}}$ (рис. 3).

Рассматриваемые теоретические исследования не требуют детального анализа движения масс системы МЧ. Поэтому влиянием упругих связей целесообразно пренебречь и представить механическую часть в виде одностепенной

расчетной схемы (жесткого приведенного звена).

В результате получено уравнение движения системы:

$$M - M_{\text{с}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \quad (3)$$

Приведенный к валу двигателя момент статической нагрузки $M_{\text{с}} = F_{\text{к}} \rho$ определен касательной силой тяги $F_{\text{к}}$ и радиусом приведения к валу двигателя

$\rho = \frac{v}{\omega_1}$. Для нахождения суммарного приведенного момента инерции J_{Σ} необходимо сложить моменты инерции всех элементов МЧ с учетом передаточного числа $i = \frac{\omega_1}{\omega_2}$:

$J_{\Sigma} = J_1 + J_2 + \frac{J_3}{i^2} + \frac{J_4}{i^2}$.

Таким образом, совокупность уравнений (2) и (3) дает систему уравнений движения, представляющих собой математическую модель тягового привода колесной пары при принятых допущениях:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{я}} &= i_{\text{я}} R_{\text{я}\Sigma} + L_{\text{я}\Sigma} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + p_{\text{п}} L_{12} i_{\text{я}} \omega, \\ M &= p_{\text{п}} L_{12} i_{\text{я}}^2, \\ M - M_{\text{с}} &= J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Касательная сила тяги $F_{\text{к}}$ может иметь различные значения, определяемые сопротивлением движению состава W . Наибольшая по сцеплению сила тяги $F_{\text{сц}}$ зависит от нагрузки на колесную пару в статическом режиме 2П, статического коэффициента использования

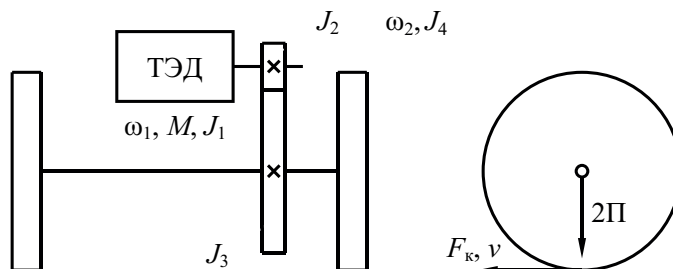


Рис. 3. Кинематическая схема электропривода

сцепного веса $\eta_{и}$ и расчетного коэффициента сцепления колес с рельсами ψ_p :

$$F_{сц} = 2\Pi\eta_{и}\psi_p. \quad (5)$$

Для вычисления коэффициента $\eta_{и}$ определяют коэффициент разгрузки

$$K_p = \frac{\Delta\Pi}{F_k},$$

представляющий собой фак-

тор, учитывающий уменьшение нагрузки на колесную пару $\Delta\Pi$:

$$\eta_{и} = \frac{1}{1 + K_p\psi_p}. \quad (6)$$

Для определения максимального значения K_p необходимо найти изменения нагрузок $\Delta\Pi_i$ на всех колесных парах тепловоза в режиме тяги. Используем расчетную схему тепловоза 2ТЭ116 (рис. 4), часть которой, относящаяся к кузову локомотива, представляет собой статически определимую систему. Это позволяет выразить разгрузку передней походу движения тележки T_1 и догрузку задней T_2 через высоту от уровня головок рельсов до уровня приложения силы тяги в автосцепке H и высоту от уровня головок рельсов до уровня приложения силы тяги в шкворневом устройстве $h_{ш}$:

$$T_1 = T_2 = 6F_k \frac{H - h_{ш}}{2l_k}. \quad (7)$$

К каждой колесной паре на уровне поверхности катания приложена сила F_k , а на шкворни в противоположном направлении действуют реакции кузова $3F_k = W/2$. Внешние силы обуславливают изменения нагрузок $\Delta\Pi_1 - \Delta\Pi_6$ колесных пар тележек на рельсы (на рис. 4 приведены реакции рельсов на изменения нагрузок).

По результатам расчета наиболее разгруженной является первая колесная пара, коэффициент разгрузки ко-

торой $K_{p\max} = K_{p1} = \frac{\Delta\Pi_1}{F_k}$ представляет собой ограничивающий фактор по силе тяги тепловоза.

Зависимость коэффициента ψ_p от скорости движения для тепловоза 2ТЭ116 определяют по формуле $\psi_p = 0,118 + 5/(27,5 + v)$ [7]. Она имеет нелинейный падающий характер, особенно в зоне малых скоростей движения, что необходимо учитывать при исследовании режима пуска и разгона локомотива. Коэффициенты этой эмпирической зависимости получены с помощью методов математической статистики на основе

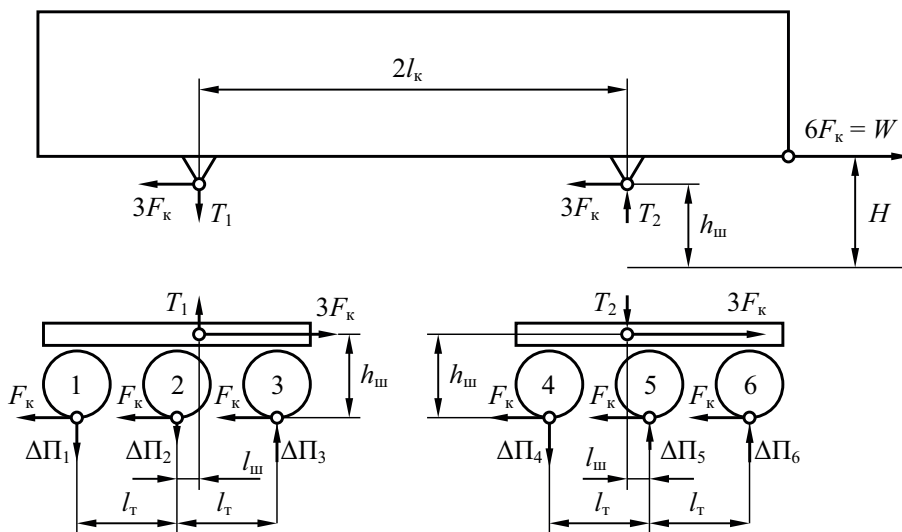


Рис. 4. Расчетная схема экипажной части тепловоза 2ТЭ116

результатов множества опытов в условиях эксплуатации на железнодорожных путях. Поэтому значения коэффициента ψ_p имеют усредненный характер, что не всегда соответствует конкретным условиям работы локомотива. Так, попадание на поверхности катания колес и рельсов машинного масла уменьшает физический коэффициент сцепления ψ до 0,2 и менее. К снижению ψ приводит также наличие в зоне контакта колеса и рельса воды и другие факторы.

Увеличить коэффициент сцепления локомотива можно внешним энергетическим воздействием на тяговые контакты электрическим током. В результате экспериментальных исследований [1, 2] были построены регрессионные математические модели, отражающие повышение предельного коэффициента сцепления колеса тепловоза с рельсом ψ_0 при подаче в область их контакта электрического тока и при различных состояниях контакта по степени загрязнения. Для теоретического анализа на первом этапе достаточно воспользоваться зависимостями предельного коэффициента сцепления от силы постоянного тока I для чистого контакта (8) и при наличии в контакте воды (9):

$$\psi_0 = 0,36 + 2,82 \cdot 10^{-5} I + 1,47 \cdot 10^{-8} I^2, \quad (8)$$

$$\psi_0 = 0,26 + 2,36 \cdot 10^{-5} I + 1,29 \cdot 10^{-8} I^2. \quad (9)$$

Воздействия тока на коэффициент ψ при загрязнении тяговых контактов тонким слоем машинного масла и при наличии в контактах воды не имеют существенных отличий в диапазоне больших значений I (рис. 5). Поэтому анализ тяговых качеств при загрязнении контактов маслом можно проводить с использованием зависимости (9).

Выводы

1. Построена математическая модель тягового электропривода колесной пары тепловоза, позволяющая проводить теоретические исследования его тяговых качеств при воздействии электрическим током на зоны контакта колес с рельсами.
2. При анализе тяговых свойств колесной пары необходимо учитывать ее разгрузку, определяемую коэффициентами разгрузки и использования сцепного веса.
3. Увеличение касательной силы тяги связано с ростом коэффициента сцепления, который зависит от силы тока, подаваемого в контакты колес с рельсами.
4. Исследования математической модели следует проводить с учетом различных состояний тяговых контактов по степени загрязнения. ■

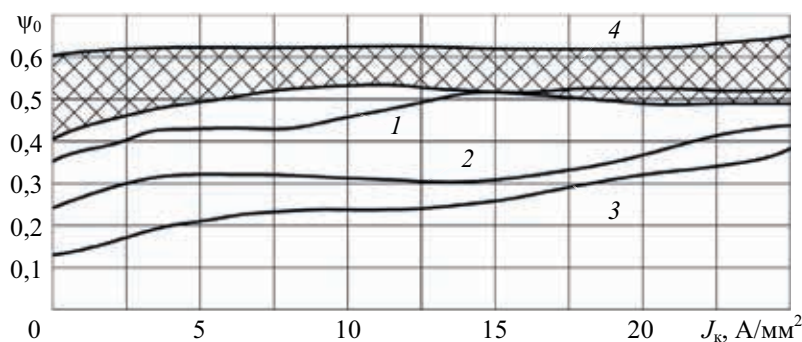


Рис. 5. Зависимости физического коэффициента сцепления колеса и рельса от плотности тока через контакт [1]

1 – для сухого обезжиренного контакта; 2 – при наличии в контакте воды; 3 – при наличии в контакте тонкого слоя смазки; 4 – при наличии в контакте песка

Литература

1. Ткаченко В. П. Кинематическое сопротивление движению рельсовых экипажей : монография. – Луганск : Изд-во ВУГУ, 1996. 200 с.
2. Ивахин А. И., Петраков Д. И. Экспериментальные исследования влияния электрического тока на сцепные качества локомотивов // Тяжелое машиностроение. 2013. № 1. С. 31–38. ISSN 1024-7106.
3. Ивахин А. И., Бабков Ю. В., Котяев Д. В., Клименко Ю. И. Системы повышения сцепления тепловозов с электропередачей // Тяжелое машиностроение. 2021. № 1–2. С. 39–44. ISSN 1024-7106.
4. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. – М. : Энергия, 1970. – 376 с.
5. Иванов-Смоленский А. В., Абрамкин Ю. В., Власов А. И. [и др.] Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / под ред. А. В. Иванова-Смоленского. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
6. Ключев В. И. Теория электропривода. М. : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
7. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М. : Транспорт, 1985. – 287 с.

List of references

1. Tkachenko V. P. Kinematic resistance to movement of rail carriages : monograph. – Lugansk : VUGU Publishing House [Kinematicheskoe soprotivlenie dvizheniyu rel'sovykh ehkipazhej : monografiya. – Lugansk : Izdatelstvo VUGU], 1996. 200 p.
2. Ivakhin A. I., Petrakov D. I. Experimental studies of the influence of electric current on coupling qualities of locomotives // Heavy engineering [Ehksperimental'nye issledovaniya vliyaniya ehlektricheskogo toka na stsepnye kachestva lokomotivov // Tyazheloe mashinostroenie]. 2013. № 1. Pp. 31–38. ISSN 1024-7106.
3. Ivakhin A. I., Babkov Yu. V., Katayev D. V., Klimenko Yu. I. Systems for increasing coupling of locomotives with electric transmission // Heavy engineering [Sistemy povysheniya stsepleniya teplovozov s ehlektroperedachej // Tyazheloe mashinostroenie]. 2021. № 1–2. Pp. 39–44. ISSN 1024-7106.
4. Bins K., Laurenson P. Analysis and calculation of electric and magnetic fields. – M. : Energiya [Analiz i raschet ehlektricheskikh i magnitnykh polej. – M. : Ehnergiya], 1970. – 376 p.
5. Ivanov-Smolensky A. V., Abramkin Yu. V., Vlasov A. I. [et al.] Universal method for calculating electromagnetic processes in electric machines / edited by A. V. Ivanov-Smolensky. – M. : Energoatomizdat [Universal'nyj metod rascheta ehlektromagnitnykh protsessov v ehlektricheskikh mashinakh / pod red. A. V. Ivanova-Smolenskogo. – M. : EHnergoatomizdat], 1986. – 216 p.
6. Klyuchev V. I. Theory of electric drive. M. : Energoatomizdat [Teoriya ehlektroprivoda. M. : Ehnergoatomizdat], 1985. – 560 p.
7. Rules of traction calculations for train work. M. : Transport [Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoj raboty. M. : Transport], 1985. – 287 p.

Статья сдана в редакцию 6 июня 2022 года

УДК 656.259

А. К. Табунщиков, В. С. Кузьмин

Оценка влияния электромагнитной обстановки многопутных участков железных дорог на функционирование приемников сигналов автоматической локомотивной сигнализации

UDC 656.259

A. K. Tabunshchikov, V. S. Kuzmin

Assessment of the impact of the electromagnetic environment of multi-track rail sections on functioning of automatic cab signaling receivers

Аннотация

Повышение помехоустойчивости работы приемников сигналов автоматической локомотивной сигнализации основных локомотивных устройств безопасности, использующих канал индуктивной связи «путь-локомотив», представляет собой комплексную задачу, которую, в частности, можно решить оценкой степени влияния отдельных факторов, приводящих к сбоям в работе оборудования в пути следования. Настоящая работа посвящена оценке влияния асимметрии, возникающей под действием тягового тока, протекающего в рельсовых нитях смежных

путей на многопутных участках железных дорог.

На основе закона Био – Савара – Лапласа составлена система уравнений для расчета величины коэффициента асимметрии на входе локомотивного приемника. Полученная система учитывает асимметрию в рельсовой линии каждого из путей, смещение приемных катушек относительно осей и уровней головок соответствующих ходовых рельсов.

Анализ показал, что в условиях асимметрии геометрического положения приемных катушек асимметрия на входе локомотивного приемника при движении по

многопутному электрифицированному участку может составлять пять и более процентов. В случае размещения испытательных участков контрольных пунктов автоматической локомотивной сигнализации на путях, смежных с путями, предназначенными для пропуска поездов, коэффициент асимметрии на входе локомотивного приемника доходит до сорока процентов, что может приводить к существенным искажениям результатов проводимых испытаний.

Предложенная система уравнения и полученные результаты могут быть использованы для анализа

Статья рекомендована к публикации А. Н. Поповым, канд. техн. наук; Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: ANPopov@usurt.ru.

Александр Константинович Табунщиков, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта; Москва, Россия. E-mail: tabunshikov1@mail.ru. ORCID 0000-0002-2207-6511.

Владислав Сергеевич Кузьмин, аспирант, ассистент; кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта; Москва, Россия. E-mail: vs.kuzmin@bk.ru. ORCID 0000-0001-9181-0145.

© В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, 2022

The article is recommended for publishing by A. N. Popov, Candidate of Technology. sciences; Ural State University of Railways. E-mail: ANPopov@usurt.ru.

Alexander Konstantinovich Tabunshchikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Department of «Railway Automation, Telemechanics and Communication» of the Russian University of Transport; Moscow, Russia. E-mail: tabunshikov1@mail.ru. ORCID 0000-0002-2207-6511.

Vladislav Sergeyevich Kuzmin, Post-graduate Student, Assistant; Department of «Railway Automation, Telemechanics and Communication» of the Russian University of Transport; Moscow, Russia. E-mail: vs.kuzmin@bk.ru. ORCID 0000-0001-9181-0145.

© V. S. Kuzmin, A. K. Tabunshchikov, 2022

электромагнитной обстановки на многопутных участках электрифицированных железнодорожных линий.

Ключевые слова: автоматическая локомотивная сигнализация, устройство безопасности, тяговый ток, асимметрия, помеха, электромагнитная совместимость.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-74-82

Abstract

Increasing the interference immunity of automatic cab signaling receivers of the main locomotive safety devices using the path-locomotive inductive communication channel is a complex task which, in particular, can be solved by assessing the degree of influence of individual factors leading to equipment malfunctions en route. The pre-

sent work is devoted to assessing the effect of asymmetry arising under the action of traction current flowing in the rail threads of adjacent tracks on multi-track sections of railways.

Based on the Bio – Savard – Laplace law, a system of equations has been compiled to calculate the value of the asymmetry coefficient at the input of the cab receiver. The resulting system takes into account the asymmetry in the rail line of each of the tracks, displacement of the receiving coils relative to the axes and levels of the heads of the corresponding running rails.

The analysis showed that in conditions of the receiving coils geometric position asymmetry, the asymmetry at the input of the cab receiver when

moving along a multi-track electrified section can be five percent or more. In case of placing test sections of automatic cab signaling checkpoints on tracks adjacent to tracks intended for passing trains, the asymmetry coefficient at the input of the cab receiver reaches forty percent, which can lead to significant distortions of the results of the tests.

The proposed equation system and the results obtained can be used to analyze the electromagnetic situation on multi-track sections of electrified railway lines.

Keywords: automatic cab signaling, safety device, traction current, asymmetry, interference, electromagnetic compatibility.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-74-82

На прием основными локомотивными устройствами безопасности сигналов из рельсовой линии могут влиять различные источники электромагнитных помех. Оценка этого влияния позволяет повышать помехоустойчивость работы устройств и внедрять новые алгоритмы обработки смеси сигнала и помехи, совершенствовать технологию обслуживания и ремонта за счет разработки соответствующего сервисного оборудования и тестовых воздействий.

Исследования электромагнитной обстановки, в которой функционируют устройства железнодорожной автоматики и телемеханики, в том числе основные локомотивные устройства безопасности, описаны, в частности, в работах [1–3]. Но в них практически не анализировалось влияние на работу локомотивного приемника основных локомотивных устройств безопасности такого источника помехи, как рельсовые нити смежных путей на многопутных участках электрифицированных железных дорог.

Индуктивная связь локомотивных приемных катушек с источниками сигналов и помех, а также электромагнитная совместимость основных локомотивных устройств безопасности с источниками помех рассматривается в [4–7]. Общие сведения об индуктивной связи на магистральных железных дорогах и метрополитенах, экспериментальные кривые взаимных индуктивностей между ходовым рельсом и соответствующей приемной катушкой представлены в [8–10]. Однако эти материалы не позволяют сформировать оценку влияния асимметрии, связанной с тяговыми токами в рельсовых нитях смежных путей, на работу приемника основных локомотивных устройств безопасности.

С учетом этого требуется разработать аналитическую модель для оценки доли помехи на входе локомотивного приемника, вызванной тяговыми токами, протекающими в рельсовых нитях смежных путей. Полученные с помощью такой модели результаты позволят разработать технические меры для

повышения качества технического обслуживания основных локомотивных устройств безопасности.

Нескомпенсированная часть помехи, поступающая на вход локомотивного приемника, будет определяться коэффициентом асимметрии K_{AC} . Элементы модели: первая и вторая рельсовые нити первого железнодорожного пути, первая и вторая рельсовые нити второго железнодорожного пути, первая приемная катушка, размещенная над первой рельсовой нитью первого железнодорожного пути, вторая приемная катушка, размещенная над второй рельсовой нитью первого железнодорожного пути.

Будем полагать, что первая рельсовая нить любого пути расположена слева от второй нити соответствующего пути, а нумерация путей идет слева направо.

Параметры модели: номер пути p , над которым расположены рассматриваемые приемные катушки, номер r рассматриваемого рельса, номер m рассматриваемого пути, номер k рассматриваемой приемной катушки, количество R рельсовых нитей пути m (может быть не равно двум в случаях, когда в колее размещены рельсы, например, для будущей их установки и т.п.), количество M путей на многопутном участке, количество K рассматриваемых приемных катушек (как правило, равно двум), высота h_p подвеса первой приемной катушки относительно уровня головки первого ходового рельса пути p (по уровню размещения центра сердечника приемной катушки относительно уровня головки первого ходового рельса), разность высот Δh подвеса первой и второй приемных катушек, смещение $l_{p,r}$ центра первой приемной катушки относительно оси ходового рельса r пути p , сумма I_m тяговых токов, протекающих в рельсовых нитях железнодорожного пути m , коэффициент асимметрии K_m^{AC} тяговых токов в рельсовых нитях железнодорожного пути m , тип рельса (Р50, Р65, Р75 и др.), направления тяговых токов в рельсовых нитях первого и второго

пути, разность высот $h_{m,r}^e$ уровней головок рельсов первой рельсовой нити первого пути и рельсовой нити r пути m , расстояние $l_{m,r}^t$ между осями первой рельсовой нити первого пути и рельсовой нити r пути m , площадь сечения рамки, образованной одним витком k -й приемной катушки S_k , магнитная проницаемость материала сердечника k -й приемной катушки μ_k , число витков k -й приемной катушки n_k .

При построении модели воспользуемся допущениями: рельсовые нити будем считать тонкими, бесконечно длинными прямолинейными проводниками с током, которые будем располагать на расстоянии h_m ниже уровня их головок, что соответствует центрам силовых магнитных линий рельсовых нитей, несущественные параметры приемных катушек будем считать одинаковыми для первой и второй приемных катушек.

Параметр $l_{p,r}$ будем считать положительным при смещении центра сердечника приемной катушки от оси соответствующего ходового рельса вправо, отрицательным – при смещении в противоположную сторону. Параметр $h_{m,r}^e$ будем принимать положительным в случаях, когда уровень головки рельса рельсовой нити r пути m будет выше, чем уровень головки рельса первой рельсовой нити первого пути и отрицательными в противоположном случае. Параметр K_m^{AC} будем считать положительным, если ток в рельсовой нити R пути m больше, чем ток в первой рельсовой нити данного пути и отрицательным в обратном случае.

Взаимное расположение элементов модели для случая двухпутного участка железной дороги и $p = 1$ приведено на рис. 1.

Выведем выражение, описывающее величину ЭДС, наводимой в приемной катушке. Для этого воспользуемся законом Био – Савара – Лапласа, будем полагать, что ток описывается синусоидальной функцией с круговой частотой ω , нулевой начальной фазой и амплитудным значением $I_{m,r}^{\max}$. Выражение, описывающее амплитудное значение

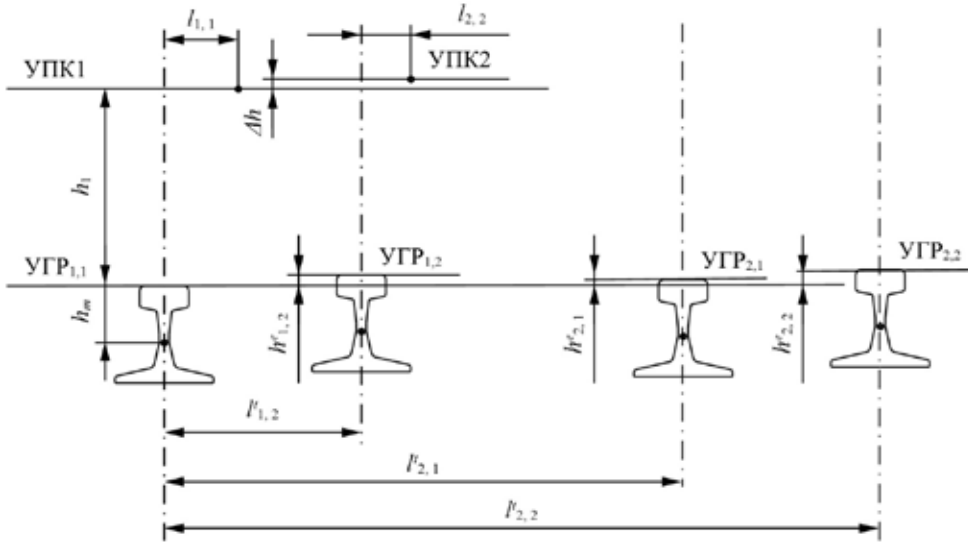


Рис. 1. Взаимное расположение элементов модели

УПК₁ – уровень подвеса первой приемной катушки; УПК₂ – уровень подвеса второй приемной катушки; УГР_{1,1} – уровень головки рельса первой рельсовой нити первого пути; УГР_{1,2} – уровень головки рельса второй рельсовой нити первого пути; УГР_{2,1} – уровень головки рельса первой рельсовой нити второго пути; УГР_{2,2} – уровень головки рельса второй рельсовой нити второго пути. Центры силовых магнитных линий рельсовых нитей и центры сердечников приемных катушек обозначены точками

ЭДС, наведенное от тока в рельсовой нити r пути m в приемной катушке k , имеет вид (1)

$$E_{m,r,k}^{\max} = -\omega \cdot \frac{\mu_0 \mu_k n_k S_k \cos \alpha_{m,r,k}}{2\pi A_{m,r,k}} \cdot I_{m,r}^{\max}, \quad (1)$$

где $\cos \alpha_{m,r,k}$ – косинус угла между нормалью рамки, образованной одним витком приемной катушки и вектором индукции магнитного поля; $A_{m,r,k}$ – расстояние от проводника с током, соответствующего рельсовой нити r пути m до центра сердечника приемной катушки k .

Далее перейдем от амплитудных значений к действующим. При этом для учета направления тока в рельсовой нити введем коэффициент $k_{m,r}$, который принимает значение, равное 1, если ток в рельсовой нити r пути m направлен от наблюдателя, и -1 , если ток направлен к наблюдателю. Коэффициент асимметрии на входе локомотивного

приемника может быть определен при помощи выражения (2):

$$K_{AC} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R I_{m,r} \cdot \left[\frac{k_{m,r} \cos \alpha_{m,r,1}}{A_{m,r,1}} - \frac{k_{m,r} \cos \alpha_{m,r,2}}{A_{m,r,2}} \right]}{\sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K \frac{I_{m,r} k_{m,r} \cos \alpha_{m,r,k}}{A_{m,r,k}}}. \quad (2)$$

Угол $\alpha_{m,r,k}$ в зависимости от направления тока в рельсовой нити может принимать два значения: $\alpha_{m,r,k}$ и $\alpha'_{m,r,k}$. В соответствии с формулами приведения $\cos \alpha_{m,r,k} = -\cos \alpha'_{m,r,k}$. Введенный ранее $k_{m,r}$ позволяет учесть такое изменение знака.

Далее необходимо определить $\cos \alpha_{m,r,k}$ и $A_{m,r,k}$ с использованием выражений (3) и (4):

$$\cos \alpha_{m,r,k} = \frac{h_{m,r,k}}{A_{m,r,k}}, \quad (3)$$

$$A_{m,r,k} = \sqrt{(h_{m,r,k})^2 + (l_{m,r,k})^2}. \quad (4)$$

Подставим (3) и (4) в (2) и получим выражение вида (5):

$$K_{AC} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R I_{m,r} \cdot \left[\frac{k_{m,r} h_{m,r,1}}{(h_{m,r,1})^2 + (l_{m,r,1})^2} - \frac{k_{m,r} h_{m,r,2}}{(h_{m,r,2})^2 + (l_{m,r,2})^2} \right]}{\sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K \frac{I_{m,r} k_{m,r} h_{m,r,k}}{(h_{m,r,k})^2 + (l_{m,r,k})^2}}. \quad (5)$$

Далее для завершения построения модели необходимо определить величины $h_{m,r,k}$, $l_{m,r,k}$ и $I_{m,r}$. Для $h_{m,r,k}$ и $l_{m,r,k}$ справедливы следующие выражения:

$$h_{m,r,k} = \begin{cases} h_1 + h_m - h_{m,r}^e, & \text{если } k = 1, \\ h_1 + h_m + \Delta h - h_{m,r}^e, & \text{если } k = 2; \end{cases} \quad (6)$$

$$l_{m,r,k} = \begin{cases} l_{m,r}^t + l_{k,k}, & \text{если } r \leq k \text{ и } m = p, \\ l_{m,r}^t - l_{k,k}, & \text{если } k > r \text{ и } m > p. \end{cases} \quad (7)$$

Ток в рельсовой нити r пути m может быть определен по формуле (8):

$$I_{m,r} = \begin{cases} I_m \cdot \left(1 - \frac{K_m^{AC}}{100} \right), & \text{если } r = 1, \\ I_m \cdot \left(1 + \frac{K_m^{AC}}{100} \right), & \text{если } r = 2. \end{cases} \quad (8)$$

Так как мы рассматриваем наиболее простой случай – двухпутный участок железной дороги, то ограничим сверху количество путей (9), количество рельсовых нитей (10), количество рассматриваемых катушек (11) и номер пути, над которым расположены приемные катушки (12):

$$M = 2, \quad (9)$$

$$R = 2, \quad (10)$$

$$K = 2, \quad (11)$$

$$p = 1. \quad (12)$$

Уравнения (5)–(12) следует поставить под знак системы. На этом построение аналитической модели можно считать завершенным. Если необходимо изменить количество путей, приемных катушек, рельсовых нитей и номер пути, над которым расположены приемные

катушки, достаточно внести изменения в уравнения (9)–(12) системы.

Для анализа влияния тягового тока, протекающего в рельсовых нитях двухпутного участка железной дороги, построим несколько зависимостей: зависимость коэффициента асимметрии на входе локомотивного приемника K_{AC} от высоты подвеса приемных катушек (диапазон принят равным 0,100–0,240 м, что соответствует диапазону высот подвеса приемных катушек типа КПУ-1 при использовании КЛУБ-П и перекрывает другие диапазоны высот подвеса приемных катушек [11]) при различном коэффициенте асимметрии тягового тока в рельсовых нитях второго пути (при этом тяговый ток в рельсовых нитях первого пути отсутствует), зависимость коэффициента асимметрии на входе локомотивного приемника K_{AC} при отсутствии асимметрии токов в рельсовых нитях второго пути (суммарный тяговый ток принят равным 100 А) в зависимости от суммарного тока в рельсовых нитях второго пути (0–30 А) при различной величине коэффициента асимметрии тягового тока в рельсовых нитях первого пути при высоте подвеса приемных катушек 0,15 м, зависимость коэффициента асимметрии на входе локомотивного приемника K_{AC} при различной разности высот подвеса приемных катушек Δh при одинаковых суммарных токах в рельсовых нитях первого и второго пути и отсутствии асимметрии тяговых токов в рельсовых нитях первого и второго пути (рис. 2–4).

Ширина междупутья при моделировании принималась минимально возможной для прямых двухпутных участков железных дорог и равной 4,1 м [12]. Тип рельсов – Р65, h_m определена как разность высоты рельса типа Р65 по [13] и высоты подвеса испытательного шлейфа контрольного пункта автоматической локомотивной сигнализации относительно подошвы рельса (что соответствует центру силовых магнитных линий рельса) по [14] и равна 0,126 м. Напомним, что знак «минус» перед

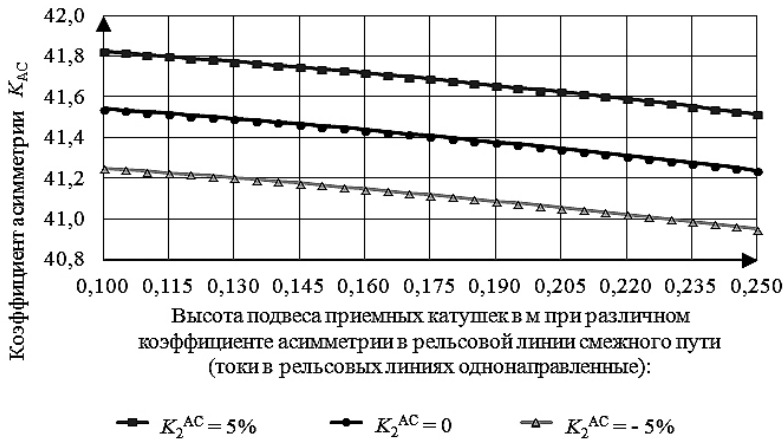


Рис. 2. Зависимость коэффициента асимметрии на входе локомотивного приемника при различной высоте подвеса приемных катушек

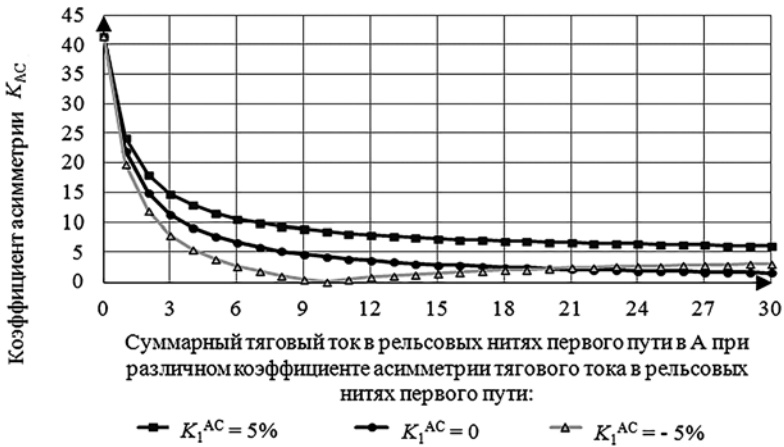


Рис. 3. Зависимость коэффициента асимметрии на входе локомотивного приемника при различных величинах суммарного тягового тока в рельсовых нитях первого пути

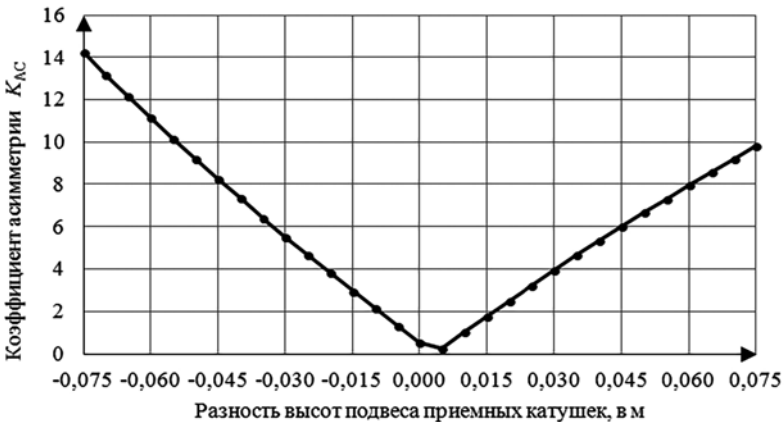


Рис. 4. Зависимость коэффициента асимметрии на входе локомотивного приемника от разности высот подвеса приемных катушек

коэффициентом асимметрии означает, что ток в первой рельсовой нити пути больше, чем во второй рельсовой нити того же пути.

При анализе графиков следует отметить, что полученные результаты могут быть отнесены как к магистральным участкам железной дороги, так и к случаям, когда испытательные участки контрольных пунктов автоматической локомотивной сигнализации размещены на путях, смежных с путями безостановочного пропуска поездов. Во втором случае асимметрия, возникающая от тяговых токов в рельсовых нитях смежного пути, может влиять на получаемые результаты оценки и измерений технико-эксплуатационных характеристик основных локомотивных устройств безопасности.

При отсутствии тягового тока в рельсовых нитях первого пути (соответствует условиям испытательных участков контрольных пунктов автоматической локомотивной сигнализации, ограниченных изолирующими стыками) асимметрия на входе локомотивного приемника может достигать 40 % и более. И при малых – до 5 А – величинах суммарного тягового тока в рельсовых нитях первого пути (что может рассматриваться как условие при проведении испытаний основных локомотивных устройств безопасности на контрольных пунктах депо и пунктов технического обслуживания, не ограниченных изолирующими стыками) коэффициент асимметрии даже при асимметрии тягового тока в рельсовых нитях первого пути, равного 5 %, оказывается не менее 3,8 %, что может влиять на результаты проводимых испытаний с учетом того, что уровень сигнального тока в применяемых линиях индуктивной связи, как правило, составляет 1,0–2,0 А.

При уровне суммарного тягового тока в рельсовых нитях первого пути 30 % и более от суммарного тягового тока в рельсовых нитях второго пути коэффициент асимметрии на входе локомотивного приемника остается практически неизменным и равным

(в случае отсутствия асимметрии тяговых токов в рельсовых нитях первого пути) 1,5 %.

При разности высот подвеса приемных катушек всего 3–4 см (что вполне может быть следствием движения в кривой или явления боковой качки кузова локомотива) коэффициент асимметрии на входе локомотивного приемника равен 5 %, что может быть причиной сбоя в работе основных локомотивных устройств безопасности в пути следования.

Итак, разработана модель, описывающая величину коэффициента асимметрии на входе приемника основных локомотивных устройств безопасности на многопутных участках железных дорог. Модель позволяет получать результаты при различном положении приемных катушек, различных коэффициентах асимметрии тяговых токов в рельсовых нитях путей, различных величинах суммарных тяговых токов в рельсовых нитях. Модель учитывает возможную разность высот уровня головки рельсов у различных путей и различные типы рельсов.

Результаты моделирования показали, что при малых величинах суммарного тока в рельсовых нитях пути, над которым размещены приемные катушки (что соответствует условиям проверки основных локомотивных устройств безопасности на контрольных пунктах депо и пунктов технического обслуживания), тяговые токи в рельсовых нитях смежных путей способны приводить к асимметрии на входе локомотивного приемника в 5 % и более, что может существенно искажать получаемые результаты оценки или измерения технико-эксплуатационных характеристик оборудования. Если же величина суммарного тягового тока в рельсовых нитях первого пути составляет 30 % и более от суммарной величины тягового тока в рельсовых нитях второго пути, то коэффициент асимметрии на входе локомотивного приемника изменяется незначительно и в случае отсутствия асимметрии тяговых токов в рельсовых нитях первого пути составляет 1,5 %,

при асимметрии тяговых токов в рельсовых нитях первого пути в 5 % может составлять уже до 6 %. Кроме того, незначительная разность высот подвеса приемных катушек также способна на

многопутных линиях приводить к асимметрии на входе локомотивного приемника 5 %, что может служить причиной сбоев в работе основных локомотивных устройств безопасности. ■

Литература

1. Бестемьянов П. Ф., Кравцов Ю. А., Шаманов В. И. Исследование электромагнитной обстановки на электрифицированных участках железных дорог // *Электротехника*. – 2019. – № 9. – С. 3–7. ISSN 0013-5860.
2. Кравцов Ю. А., Щербина Е. Г., Мищенко П. Е. Расчёт влияния тягового тока на токовые рельсовые цепи без изолирующих стыков // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2007. – № 2 (26). – С. 47–57. ISSN 0201-727X.
3. Кравцов Ю. А., Сафро В. М., Чегуров А. Б. Интервальное регулирование при наличии помех // *Мир транспорта*. – 2012. – Т. 10. – № 4 (42). – С. 66–70. ISSN 1992-3252.
4. Шаманов В. И. Защищенность локомотивных приемников АЛС от помех // *Автоматика, связь, информатика*. – 2013. – № 4. – С. 14–19. ISSN 0005-2329.
5. Шаманов В. И., Ваньшин А. Е., Тасболаторва Л. Косвенные измерения соотношения тяговых токов под катушками АЛС // *Автоматика, связь, информатика*. – 2018. – № 8. – С. 2–5. ISSN 0005-2329.
6. Шаманов В. И., Трофимов Ю. А. Асимметрия тяговых токов под катушками // *Автоматика, связь, информатика*. – 2008. – № 11. – С. 37–39. ISSN 0005-2329.
7. Шаманов В. И. Индуктивная связь локомотивных катушек АЛС с рельсовыми линиями // *Автоматика, связь, информатика*. – 2011. – № 11. – С. 2–5. ISSN 0005-2329.
8. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения с линиями связи, устройствами железнодорожной автоматики и питающими электросетями : специальность 05.22.09 : дисс... на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / Михаил Петрович Бадер. – М., 1999. – 475 с.
9. Семерник М. Л., Шишляков А. В. Быстродействующая автоматическая локомотивная сигнализация для метрополитенов. – М. : Транспорт, 1970. – 128 с.
10. Бородин А. В., Овсянников С. А., Косьяненко В. В. Улучшать качество ремонта и обслуживания приемных катушек // *Локомотив*. – 2021. – № 12 (780). – С. 15–17.
11. Инструкция по содержанию локомотивных приемных катушек. Технологическая инструкция ПКБ ЦТ.25.0115 [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс» (БД АСПИЖТ).
12. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений (с поправками) [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
13. ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с изменением № 1) [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
14. Инструкция по оборудованию, техническому обслуживанию и ремонту испытательных шлейфов и путевых устройств АЛС контрольного пункта АЛСН № 35002-000-00 [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 12 марта 2021 г. № 1510/р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс» (БД АСПИЖТ).

List of references

1. Bestemyanov P. F., Kravtsov Yu. A., Shamanov V. I. Investigation of the electromagnetic situation on electrified railway sections // *Electrical Engineering [Issledovanie ehlektricheskoy obstanovki na ehlektrifitsirovannykh uchastkakh zheleznnykh dorog // Ehlektrrotekhnika]*. – 2019. – № 9. – Pp. 3–7. ISSN 0013-5860.
2. Kravtsov Yu. A., Shcherbina E. G., Mishchenko P. E. Calculation of the effect of traction current on tonal rail circuits without insulating joints // *Bulletin of the Rostov State Transport University [Raschyot vliyaniya tyagovogo toka na tonal'nye rel'sovye tsepi bez izoliruyushhih stykov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshheniya]*. – 2007. – № 2 (26). – Pp. 47–57. ISSN 0201-727X.

3. Kravtsov Yu. A., Safro V. M., Chekurov A. B. Interval regulation in case of interference // *Mir transporta* (The world of transport) [Interval'noe regulirovanie pri nalichii pomekh // *Mir transporta*]. – 2012. – Т. 10. – № 4 (42). – Pp. 66–70. ISSN 1992-3252.
4. Shamanov V. I. Protection of automatic cab signaling receivers from interference // *Automation, communications, informatics* [Zashhishhennost' lokomotivnykh priemnikov ALS ot pomekh // *Avtomatika, svyaz', informatika*]. – 2013. – № 4. – Pp. 14–19. ISSN 0005-2329.
5. Shamanov V. I., Vanshin A. E., Tasbolatova L. Indirect measurements of the ratio of traction currents under ACS (automatic cab signaling) coils // *Automation, communications, informatics*. – 2018. – № 8. – С. 2–5. ISSN 0005-2329.
6. Shamanov V. I., Trofimov Yu. A. Asymmetry of traction currents under coils // *Automation, communications, informatics* [Kosvennye izmereniya sootnosheniya tyagovykh tokov pod katushkami ALS // *Avtomatika, svyaz', informatika*]. – 2008. – № 11. – Pp. 37–39. ISSN 0005-2329.
7. Shamanov V. I. Inductive coupling of ACS locomotive coils with rail lines // *Automation, communications, informatics* [Induktivnaya svyaz' lokomotivnykh katushek ALSN s rel'sovymi liniyami // *Avtomatika, svyaz', informatika*]. – 2011. – № 11. – Pp. 2–5. ISSN 0005-2329.
8. Bader M. P. Electromagnetic compatibility of traction electrical equipment with communication lines, railway automation devices and power grids : specialty 05.22.09 : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Mikhail Petrovich Bader [Ehlektronnaya sovmestimost' tyagovogo ehlektrosnabzheniya s liniyami svyazi, ustroystvami zheleznodorozhnoj avtomatiki i pitayushimi ehlektrosetyami : spetsial'nost' 05.22.09 : dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Mikhail Petrovich Bader]. – М., 1999. – 475 p.
9. Semernik M. L., Shishlyakov A.V. High-speed automatic cab signaling for subways. – М. : Transport [Bystrodeystviyushhaya avtomaticheskaya lokomotivnaya signalizatsiya dlya metropolitenov. – М. : Transport], 1970. – 128 p.
10. Borodkin A. V., Ovsyannikov S. A., Kasyanenko V. V. Improving the quality of repair and maintenance of receiving coils // *Locomotive* [Uluchshat' kachestvo remonta i obsluzhivaniya priemnykh katushek // *Lokomotiv*]. – 2021. – № 12 (780). – Pp. 15–17.
11. Instructions for maintenance of locomotive receiving coils. Technological instruction of the PCB CT.25.0115 [Electronic resource]. Access from «ConsultantPlus» (BD ASPIZHT) [Instruktsiya po sodержaniyu lokomotivnykh priemnykh katushek. Tekhnologicheskaya instruktsiya PKB TST.25.0115 [Ehlektronnyj resurs]. Dostup iz spravочно-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus» (BD ASPIZHT)].
12. GOST 9238–2013. Dimensions of railway rolling stock and approximations of buildings (with amendments) [Electronic resource]. Access from «ConsultantPlus» [GOST 9238-2013. Gabarity zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i priblizheniya stroenij (s popravkami) [Ehlektronnyj resurs]. Dostup iz spravочно-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus»].
13. GOST R 51685-2013. Railway rails. General technical conditions (with amendment № 1) [Electronic resource]. Access from «ConsultantPlus» [GOST R 51685-2013. Rel'sy zheleznodorozhnye. Obshhie tekhnicheskie usloviya (s izmeneniem № 1) [Ehlektronnyj resurs]. Dostup iz spravочно-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus»].
14. Instructions for equipment, maintenance and repair of test loops and track devices of ACS control point № 35002-000-00 [Electronic resource]: Order of JSC «Russian Railways» dated March 12, 2021 № 1510/R. Access from «Consultantplus» (DB ASPIZHT) [Instruktsiya po oborudovaniyu, tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ispytatel'nykh shlejfov i putevykh ustroystv ALS kontrol'nogo punkta ALSN № 35002-000-00 [Ehlektronnyj resurs]: rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 12 marta 2021 g. № 1510/r. Dostup iz spravочно-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus» (BD ASPIZHT)].

Статья сдана в редакцию 13 апреля 2022 года

Организация и логистика

УДК 339.9

М. Б. Петров, М. Л. Хазин, Д. Р. Кричкер

Альтернативные направления экспорта-импорта по МТК «Север – Юг» в условиях экономических санкций

UDC 339.9

M. B. Petrov, M. L. Khazin, D. R. Krichker

Alternative export-import directions through the International North – South Transport Corridor under conditions of the economic sanctions

Аннотация

Из-за экономических антироссийских санкций происходит масштабная переориентация европейских и балтийских маршрутов на восток (с резким ростом нагрузки на восточный полигон российских железных дорог) и пересматривается роль формируемого транспортно-логистического коридора «Север – Юг». Такие коридоры модернизируют глобальную логистику, особенно в отношении перевозок сырья, энергоносителей, полуфабрикатов

и продовольственных товаров. Освоение всех маршрутов коридора «Север – Юг» даст прямой выход производителям продукции экспортно ориентированных отраслей Евразийского экономического союза на растущие рынки Ирана, Пакистана, Индии, Ближнего Востока и Восточной Африки.

В статье даны обзор и анализ экономических и логистических преимуществ новых маршрутов, тяготеющих к Международному транспортному коридору «Север –

Юг» (МТК СЮ), для обоснования новых тенденций макрологистики экспортно ориентированных логистических потоков специализированной продукции отраслей Урала и Сибири.

Освоение новых направлений экспорта сырья и готовой продукции в сочетании с современными логистическими технологиями позволит экспортерам Урала и Сибири увеличить объемы экспорта и его доходность, нивелировать негативное воздействие антироссийских

Статья рекомендована к публикации В. М. Самуйловым, д-ром техн. наук, профессором, УрГУПС. E-mail: samuilov-sv@convex.ru.

Михаил Борисович Петров, д-р техн. наук, руководитель Центра развития и размещения производительных сил Института экономики УрО РАН; Екатеринбург, Россия. E-mail: michpetrov@mail.ru. ORCID 0000-0002-3043-6302.

Марк Леонтьевич Хазин, д-р техн. наук, профессор Уральского государственного горного университета; Екатеринбург, Россия. E-mail: Khasin@ursmu.ru. ORCID 0000-0002-6081-4474.

Давид Романович Кричкер, аспирант Уральского государственного аграрного университета, помощник министра транспорта и дорожного хозяйства Свердловской области; Екатеринбург, Россия. E-mail: vetkek@mail.ru. ORCID 0000-0001-9284-3950.

© М. Б. Петров, М. Л. Хазин, Д. Р. Кричкер, 2022

The article is recommended for publishing by V. M. Samoilov, Doctor of Technical Sciences, Professor, USURT. E-mail: samuilov-sv@convex.ru.

Mikhail Borisovich Petrov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Center for the Development and Placement of Productive Forces of the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Yekaterinburg, Russia. E-mail: michpetrov@mail.ru. ORCID 0000-0002-3043-6302.

Mark Leontievich Khazin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Ural State Mining University; Yekaterinburg, Russia. E-mail: Khasin@ursmu.ru. ORCID 0000-0002-6081-4474.

David Romanovich Krichker, postgraduate student of the Ural State Agricultural University, Assistant to the Minister of Transport and Road Management of the Sverdlovsk Region; Yekaterinburg, Russia. E-mail: vetkek@mail.ru. ORCID 0000-0001-9284-3950.

© M. B. Petrov, M. L. Khazin, D. R. Krichker, 2022

экономических санкций. Особенно перспективным для уральских и западносибирских экспортеров минерального сырья и готовой продукции будет маршрут Казахстан – Туркменистан – Иран с возможностью дальнейшей транспортировки продукции в Пакистан и Индию через строящийся порт Чабахар и действующие порты Бендер-Аббас и Гвадар.

Ключевые слова: международные транспортные коридоры, маршруты перевозок в международном сообщении, «Север – Юг».

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-83-94

Abstract

Due to economic anti-Russian sanctions, there is a large-scale reorientation of European and Baltic routes to the east (with a sharp increase in the load on the eastern polygon of Russian railways) and the role of

the North – South transport and logistics corridor being formed is being revised. Such corridors modernize global logistics, especially with regard to transportation of raw materials, energy, semi-finished products and food products. The development of all routes of the North – South corridor will provide direct access to the producers of goods of export-oriented industries of the Eurasian Economic Union to the growing markets of Iran, Pakistan, India, the Middle East and East Africa.

The article provides the overview and analysis of economic and logistical advantages of new routes tending to the International transport corridor «North – South» (ITC NS), to substantiate new trends in macro-statistics of export-oriented logistics flows of specialized products of the Urals and Siberia industries.

The development of new directions for the export of raw materials and finished products in combination with modern logistics technologies will allow exporters of the Urals and Siberia to increase export volumes and its profitability, neutralize the negative impact of anti-Russian economic sanctions. The Kazakhstan – Turkmenistan – Iran route with the possibility of further transportation of products to Pakistan and India through the Chabahar port under construction and the existing ports of Bandar Abbas and Gwadar will be especially promising for Ural and West Siberian exporters of mineral raw materials and finished products.

Keywords: international transport corridors, international transportation routes, North – South direction.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-83-94

Очередной пакет санкций против России (апрель 2022 г.), введенный Евросоюзом, запрещает покупку, импорт или транзитные перевозки угля и других твердых ископаемых видов топлива (горючий сланец, торф и т.п.) из России, налагает вето на заход в порты ЕС кораблям под российским флагом (исключение – перевозка сельскохозяйственной продукции, продовольствия, гуманитарной помощи), российским и белорусским компаниям, ограничивает транспортировку и транзит товаров по территории ЕС (исключение – лекарства, медицинские товары, сельскохозяйственные и пищевые продукты, а также автотранспорт в гуманитарных целях).

Вводятся и новые экспортные ограничения на топливо для ракетных двигателей, квантовые компьютеры и полупроводники, высокотехнологичную электронику, программное обеспечение,

транспортное оборудование и др. на общую сумму 10 млрд евро. Ограничен импорт древесины, цемента, удобрений, морепродуктов и спиртных напитков на общую сумму 5,5 млрд евро [1].

Ограничения экспортно-импортных и валютных операций на крупнейших рынках и по основным товарным позициям (от 40 до 70 % общего объема внешней торговли по разной номенклатуре) стимулируют Россию ускорить достижение импортонезависимости страны.

И здесь новую роль может сыграть МТК СЮ, активное освоение которого переконфигурирует мировой рынок сырья, продовольственных товаров и транспортных услуг. Для поддержания такого рынка не нужны западные (главным образом американские и британские) трансокеанские перевозчики, так как основной грузопоток перейдет на железные дороги и внутренние водные пути.

МТК СЮ – мультимодальный маршрут транспортировки пассажиров и грузов, общая протяженность от Санкт-Петербурга до порта Мумбаи (Бомбей) составляет 7200 км. МТК СЮ начал создаваться для привлечения транзитных грузопотоков из Индии, Ирана и других стран Персидского залива (в том числе через Каспийское море) на российскую территорию и далее, в Северную и Западную Европу (рис. 1).

В 2002 г. межправительственное соглашение о МТК СЮ, подписанное Россией, Индией и Ираном (12.09.2000), вступило в силу.

В состав МТК СЮ вошли международные транспортные коридоры № 9 (Финляндия – Санкт-Петербург – Москва с ответвлениями на Астрахань и Новороссийск) и № 2 (Берлин – Варшава – Минск – Москва – Нижний Нов-

город – Екатеринбург), транспортная инфраструктура Волги и Дона, в том числе Волго-Балтийский и Волго-Донской каналы.

Формирование МТК СЮ рассматривается Россией в качестве важного транзитного направления между странами Северо-Западной Европы, Каспийского бассейна, Персидского залива, Центральной, Южной и Юго-Восточной Азии, а также как возможность дальнейшего развития евроазиатских перевозок по более короткому и экономичному маршруту.

Основные преимущества МТК СЮ перед другими маршрутами, в частности, перед маршрутом через Суэцкий канал, заключаются в сокращении в два и более раз расстояния перевозок. При этом стоимость перевозки контейнеров из Санкт-Петербурга (а также



Рис. 1. Транспортная инфраструктура Ирана и МТК СЮ [2]

– МТК СЮ; --- перспективные линии МТК СЮ.

Варианты следования грузов в МТК СЮ:

- 1 – транскаспийский; -- 2 – западный через Астару; — 3 – западный через Джульфу;
- 4, 4, а – восточный через Саракс и Этрек; -- 5 – традиционный через Суэцкий канал;
- строящаяся линия Казвин – Решт – Астара; --- новая линия Узень – Берекет – Горган

из Германии или Финляндии) в Индию будет существенно меньше, чем стоимость транспортировки морем.

Развитие маршрутов экспорта российской продукции по МТК СЮ дает новые логистические возможности поставщикам Уральского и Сибирского регионов (чем севернее проходит маршрут, тем он короче). Поэтому тарифное расстояние перевозки из Петербурга через Москву, Поволжье и Астрахань в Актау сопоставимо с перевозкой из Петербурга через Вологду – Екатеринбург – Челябинск – Карталы – Орск. Да и Казахстан, и Туркмения развивали свои железные дороги с намерением встроить их в международные транспортные коридоры, в том числе создали новые погранпереходы на границах с Китаем и Ираном (рис. 2).

Кроме того, судам не надо заходить в европейские порты, нет необходимости

использовать трансокеанские контейнеровозы, т.к. морская часть маршрута проходит по Каспийскому морю, вдоль побережий Ирана, Пакистана и Индии (каботажное плавание) и может быть выполнено судами этих стран.

Значительная часть МТК СЮ пролегает по железным дорогам России, на которые приходится в зависимости от маршрута 33–53 % от общей протяженности сухопутной части коридора. Стержневое направление для российской стороны в рамках МТК: Бусловская – Санкт-Петербург – Москва – Рязань – Кочетовка – Ртищево – Саратов – Волгоград – Астрахань (2513 км) [2].

У России есть причины расширять свои проекты в Евразии на юг. Евразийский экономический союз представляет собой интегрированный рынок с общим населением около 180 млн чел. и совокупным ВВП более 5 трлн долл. Он



Рис. 2. Развитие железных дорог Средней Азии и Казахстана за 30 лет [3, 4]

— железные дороги, построенные до 1991 г.; — железные дороги, построенные после 1991 г.; — строящиеся железные дороги

Транспортные коридоры

- 1 – «Один пояс – один путь» (Китай – Казахстан – Россия – Западная Европа);
- 2 – транспортный коридор Китай – Иран; 3 – Малый шелковый путь (Индия – Казахстан –
- Азербайджан – Европа); 4 – «Север – Юг» (Россия – Иран)

способствует свободному перемещению товаров и услуг, проводит единую политику в таких ключевых сферах, как энергетика, сельское хозяйство, транспорт, внешняя торговля и инвестиции.

Иран с 2018 г. имеет Соглашение о свободной торговле с Евразийским экономическим союзом. В 2020 г. общий товарооборот между Ираном и ЕАЭС увеличился на 2 % и превысил 2 млрд долл. Большую часть этой торговли составляют продовольственные товары и сельскохозяйственное сырье (импорт Ирана из стран ЕАЭС составил 80 %, экспорт – 68 %).

Иран – очень перспективный для России партнер в регионе и пока единственный для России ключ к Индии, которую отрезают Пакистан и Афганистан. Наиболее удобный путь для грузов – через Иран, что нашло отражение в проекте транспортного коридора «Север – Юг». И в этом контексте присоединение Ирана к ЕАЭС упростит движение российских грузов (в первую очередь, угля и других видов сырья) к портам Бендер-Аббас и Чабахар – прямому морскому пути в Мумбаи. Торговые маршруты, помимо Индии, могут быть проложены в Ирак, Кувейт, Катар, ОАЭ, Саудовскую Аравию, Оман, Йемен,

Шри-Ланку. В относительной близости окажутся страны Восточной Африки и Индокитая.

Правительство Ирана планирует увеличить пропускную способность порта Чабахар с нынешних 2,5 млн т до 8,5; завершается строительство восточного железнодорожного коридора Чабахар – Захедан (см. рис. 1) [5, 6].

В 2021 г. Дели и Москва обсудили поставки до 40 млн т сырья в год стоимостью около 4,5 млрд долл. (цены 2021 г.). Сейчас Россия экспортирует в Индию менее 1 млн т металлургических углей из общего экспорта в 46 млн т. Индии необходимо 70 млн т коксующегося угля (только сталелитейной промышленностью потребляется 55 млн т). А самым коротким маршрутом из Кузбасса в Индию будет транзит по железным дорогам Казахстана, Туркмении и Ирана (из Кузбасса через Барнаул на Нурсултан – Бейнеу – Берекет – Этрек или через Семей (Семипалатинск) – Актогай – Алматы – Ташкент – Мары – Серакс с большим числом погранпереходов). То есть закаспийский (или сибирско-узбекский) маршрут МТК СЮ может получить стабильную грузовую базу основного продукта железнодорожных перевозок – угля (рис. 3). Для снижения

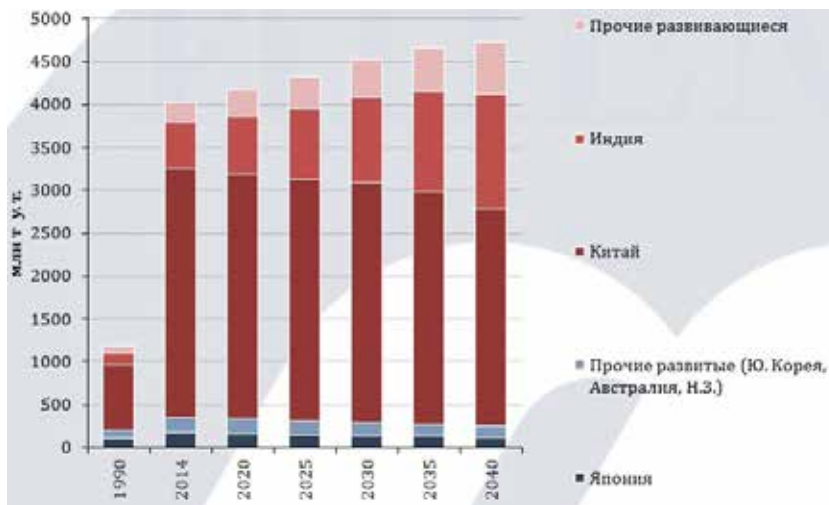


Рис. 3. Прогноз потребления угля в странах Азиатско-Тихоокеанского региона.
Источник: МЭА, China Energy Portal

затрат при переходе с колеи 1520 мм на 1435 мм и перегрузке на морской транспорт может быть актуальна новая технология перевозки угля – в контейнерах с верхней загрузкой.

По сравнению с традиционным маршрутом через порт в Тамани, проходящим через Босфор и Суэцкий канал, экономия времени и средств на новом маршруте достигнет 30–40 %. Как отмечают эксперты, срок доставки грузов из Москвы (или Кузбасса) в Мумбаи (Индия) сократится примерно на 20 дней. Если ранее, например, перевозка через Персидский залив, Суэцкий канал, Средиземное море в Хельсинки или Петербург длилась 45–60 дней, то по новому пути время доставки составит 20–25 дней. В перспективе, товары из Индии пройдут по территории Ирана в направлении России и Северной Европы всего за 14 дней. Более того, Иран уже объявил о скидке в 50 % от тарифа, которая должна привлечь грузы на новую магистраль. Предполагается, что ежегодный товарооборот МТК СЮ будет достигать 20–30 млн т.

Потенциальная грузовая база МТК СЮ не ограничивается только углем [7]. Сегодня по «длинным» морским маршрутам (вокруг всей Европы и через Суэцкий канал) идут поставки минеральных удобрений (Индия в 2018 г. – 1494 тыс. т), растительных масел в Иран (2019 г. – 539,1 тыс. т) и Индию (200,5 тыс. т). Активно отгружается и продукция тяжелого и транспортного машиностроения, оборонной промышленности. Иран поставляет в Россию орехи, тропические фрукты, а также продукцию легкой и текстильной промышленности. Идут переговоры о поставках машиностроительной и оборонной продукции.

Совокупный импорт в Россию продуктов растительного происхождения общим весом 11 560 тыс. т за 2019–

2020 гг. составил 10,9 млрд долл.; это в основном фрукты и орехи (46 %), овощи (16 %) в зимний период.

В структуре импорта продовольствия в Россию по странам первое место занимает Эквадор (11 %), второе – Турция (10 %), третье – Китай (8,6 %).

Иранские поставки могут составить альтернативу турецкому и китайскому импорту ширпотреба и фруктов; складывается встречная грузовая база, которая может лечь в основу формирования нового, более короткого и выгодного для уральских и сибирских экспортеров и импортеров «закаспийского» маршрута МТК СЮ.

В 2020 г. Россия экспортировала продовольствия на 30,3 млрд долл. (экспорт впервые превысил импорт). В натуральном выражении в 2020 г. за рубеж поставлено 785 млн т сельхозпродукции и продовольствия. Больше всего зерна (48,6 млн т на 10,1 млрд долл.). Вывоз масложировой продукции достиг 8 млн т на 4,8 млрд долл., мясной – 524,9 тыс. т на 885,3 млн долл., молочной – 206,7 тыс. т на 317,9 млн долл. Рыбы и морепродуктов экспортировано 2,2 млн т на 5,3 млрд долл., продукции пищевой и перерабатывающей промышленности – 9,4 млн т на 4,4 млрд долл. [8].

В числе главных покупателей российского зерна были Египет, Саудовская Аравия и Турция. Масложировая продукция экспортировалась в основном в Индию, Китай и Турцию, мясная – во Вьетнам, КНР и Украину. Среди основных покупателей российской экспортной продукции нефтегазового ассортимента широко представлены те страны, что окажутся более доступными при полноценном запуске МТК СЮ, а грузовая база перевозчиков пополнится агропромышленной номенклатурой.

В экспортных (в страны СНГ, Германию, Китай, Иран, Ирак и т.п.) постав-

* С учетом американских санкций против Ирана и России и уже имеющегося торгового сальдо экспорта-импорта Ирана и России с третьими странами возможна организация взаиморасчетов в китайских юанях или индийских рупиях.

ках 2019 г. продукция горно-металлургического комплекса из Свердловской обл. составила 59,9 %; это энергетический уголь, кокс, железная руда, минералы, нефть и нефтепродукты, металлы и изделия из металла и др. (рис. 4).

В 2019 г. основным экспортным товаром Свердловской обл. был черный металл, а во втором квартале 2020 г. на первое место поднялся товар, экспортируемый по секретному коду. Свердловская область отгружает за границу медь и медные изделия, металлокерамику, алюминий и алюминиевые изделия, продукцию лесной промышленности, реакторы, электрические машины и оборудование, пластмассы, жиры, химическую продукцию, локомотивы, продукцию оборонно-промышленного комплекса. Самым экспортируемым товаром в 2020 г. стали металл и метизы (60 %), машины, оборудование и транспортные средства (16 %), продукция химической промышленности и каучук (13,8 %), минеральные продукты (4,8 %), древесина и целлюлозно-бумажные изделия (2,5 %). Основные получатели экспортной продукции Свердловской области – Китай, США, Казахстан, Германия, Турция, Узбекистан. Среди партнеров много стран из азиатского региона, и их доля растет опережающими темпами [9].

Екатеринбургский железнодорожный узел (Свердловская обл.) расположен на основном ходе Транссиба. Но, когда мы рассматриваем основные грузопотоки из России на экспорт, то получается, что для азово-черноморских и для балтийских морских портов грузоотправители-экспортеры Уральского региона находятся дальше большинства других поставщиков продукции (например, АПК) из Центрального, Южного и Поволжского федеральных округов, а их транспортные издержки будут выше. Сегодня к этому добавились санкционные ограничения на перевозку продукции российскими судами из черноморских и балтийских морских портов и запрет на их обслуживание в портах стран ЕС и НАТО.

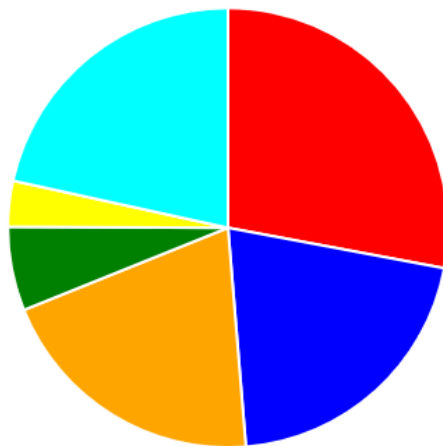


Рис. 4. Товарная структура экспорта Свердловской области, %

■ секретный код – 27,95; ■ медь и изделия из нее – 20,76; ■ сталь и чугун – 20,2; ■ прочие недрагоценные металлы – 6,18; ■ изделия из черных металлов – 3,37; ■ прочее – 21,56 [9]

Ранее для уральских предприятий было исключение по скорости и цене доставки-отправки в контейнерном поезде Екатеринбург – Хельсинки (по твердому расписанию через погранпереход станции Бусловская) или до балтийского порта Усть-Луга (Ленинградская обл.), если конечный грузополучатель находится в ЕС. В современных условиях его, возможно, придется заменить контейнерным поездом Нур-Султан – Хельсинки (или Костанай – Хельсинки) либо организовать прицепку вагонов (платформ с контейнерами) к транзитным контейнерным поездом, следующим из Китая в Европу, при их обработке на узловых сортировочных станциях.

Начало взрывному развитию грузовых железнодорожных перевозок из Китая в Европу положено в 2011 г., когда в рамках Таможенного союза между Россией, Казахстаном и Белоруссией были отменены таможенные процедуры. Это резко снизило затраты на документооборот и логистику, увеличило скорость доставки товаров между Китаем и Европой. В результате в 2020 г. побит рекорд по объему железнодорожных

перевозок между Китаем и Европой через Казахстан и Россию*.

По данным китайского государственного железнодорожного оператора China Railway Express, в 2021 г. по этому маршруту отправлено 12 400 поездов, что на 50 % больше, чем годом ранее**. Перевезено 1,13 млн ед. 20-футового контейнерного эквивалента (TEU), что на 56 % больше, чем годом ранее. Из них 800 тыс. TEU направлено на европейский рынок, а остальные 313 тыс. — на рынки стран Среднего и Ближнего Востока, включая Афганистан и Пакистан. Трансконтинентальные поезда, следующие на запад, отправляются в пункты назначения практически каждый час, а поезда на восток, в Китай — каждые два часа.

В условиях пандемии коронавируса объемы контейнерных перевозок железнодорожным транспортом по маршруту Китай — Россия — Центральная Азия — Европа не пострадали. По данным китайских СМИ, за десять лет из Китая в Европу и обратно проследовало свыше 50 тыс. контейнерных поездов, из них 53 % через пограничные переходы Достык — Алашанькоу и Алтынколь — Хоргос [10]***. Стоимость перевозимых товаров выросла с 8 млрд долл. (2016 г.) до 74,9 млрд (2021 г.). Среднегодовой рост количества отправок грузовых поездов Китай — Европа за последние шесть лет составил 55 %.

МТК СЮ пока находится в стадии формирования. В большинстве публикаций на эту тему, как правило, речь идет о водном маршруте Волга — Каспийское море — Иран (с проблемами по зимней навигации); на сегодня он представлен еще двумя железнодорожными маршрутами: западным (или кавказским) через Астрахань — Махачкалу — Баку

до ст. Астара (Азербайджанская ЖД) с перевалкой на автотранспорт в Иране [11] и восточным (или закаспийским) через Челябинск — Южноуральск — Карталы — Орск — Макат — Актау (Казахстан) — Бейнеу — Берекет (Туркмения) на Этрек и Амирабад (Иран) с переходом на железнодорожную колею Ирана (1435 мм) с возможностью дальнейшей транспортировки продукции в Пакистан и Индию через строящийся порт Чабахар либо действующие порты Бендер-Аббас или Гвадар (Пакистан) (рис. 5) [12].

Предлагается обсудить еще один маршрут в рамках МТК СЮ: из Кузбасса в Индию по железным дорогам Казахстана, Туркмении и Ирана (из Новокузнецка через Барнаул на Астану — Бейнеу — Берекет — Этрек) или через Семипалатинск (Актогай — Алматы — Ташкент — Мары — Серахс — Бендер-Аббас с множеством погранпереходов). У узбекских железнодорожников есть опыт отправки грузов по маршруту Ташкент — Мары — Серахс — Бендер-Аббас и далее в Дубай или Мумбаи, осталось лишь восстановить их взаимодействие с транспортными компаниями из России.

Освоение «закаспийского» и «сибирско-узбекского» маршрутов МТК СЮ дает прямой выход уральским и сибирским производителям на потребительские рынки Ирана (население 80 млн чел.), Пакистана (215 млн) Индии (1,5 млрд). Кроме этих стран, через порты Бендер-Аббас, Чабахар и Гвадар также возможны морские поставки по кратчайшему маршруту в ОАЭ, Катар, Саудовскую Аравию, страны Восточной Африки.

Рассмотрим теперь другое популярное направление — Китай, Южная Корея, Вьетнам, страны Юго-Восточной

* В ОАО «РЖД» фиксируют рост объемов перевозок по Новому шелковому пути // Официальный портал ОТЛК «Евразийский железнодорожный альянс». URL: <https://utlc.com/smi/rekordnyy tranzit> (дата обращения: 20.08.2021).

** Чжун'ю бань ле; Китайский железнодорожный экспресс. URL: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/354338082> (дата обращения: 12.09.2021).

*** Железнодорожные перевозки Китай — Европа. URL: <https://seanews.ru/2022/02/04/bole-50-tysjach-poezdov-kitaj-evropa/> (дата обращения: 22.04.2022).

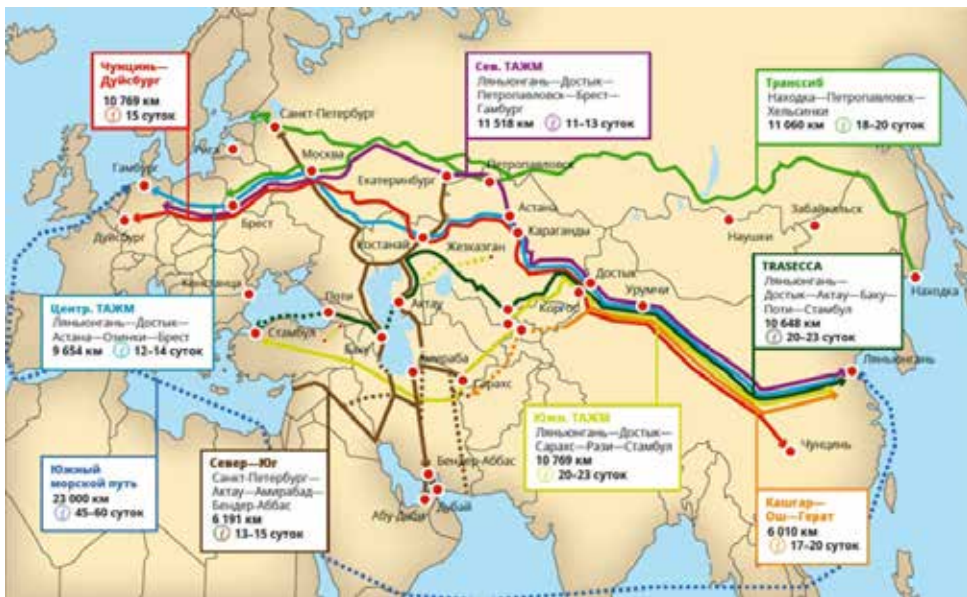


Рис. 5. Основные международные коридоры в Евразии [10]

Азии. К сожалению, ситуация во много похожая: для всех погранпереходов в Китай восточнее Красноярска или морских портов Приморья транспортное плечо доставки для грузов Уральского региона будет на 1–2 тыс. км больше, чем для сибирских экспортеров (Алтайский край, Омская, Новосибирская, Кемеровская области), не говоря уже о поставщиках нашего Дальнего Востока. Кроме того, практически все объемы заявленного РЖД увеличения пропускной способности БАМа и Транссибирской магистрали уже готовы занять своей продукцией экспортеры угля из Восточной Сибири (Эльгинское и Якутское месторождения) и Дальнего Востока.

Единственное исключение в восточном направлении – погранпереходы между Китаем и Казахстаном на ст. Достык (через Кустанай, Петропавловск и Астану) и Хоргос (через Астану, Алматы), где созданы современные транспортно-логистические центры. Китай субсидирует железнодорожные тарифы по своей территории для доставки продукции в центральные провинции [13]. Хотя и здесь у экспортеров из Южной Сибири, по сравнению с Уралом, выигрыш

в расстоянии составит почти 1 тыс. км.

По традиционным направлениям экспорта Урал может работать только с высокодоходной продукцией, где удельный вес транспортных расходов в цене продукта не критичен для конечного покупателя, или с использованием преимуществ ускоренных контейнерных поездов (включая флекситанки и рефконтейнеры), которые формируют «РЖД-логистика», «Трансконтейнер» и другие федеральные компании в крупных логистических центрах (в т.ч. в Екатеринбурге). Срок доставки сокращается примерно в три раза, стоимость – до четырех благодаря технологии контейнерных поездов, следующих по твердому расписанию.

МТК СЮ формирует новую конфигурацию глобального рынка сырья, продовольственных товаров и транспортных услуг.

Особенно удобен «восточный» (или «закаспийский») маршрут МТК СЮ для круглогодичного экспорта минеральных удобрений (производство «Уралкалия») по направлению Соликамск – Екатеринбург – Челябинск – Каргалы – Орск – Макат (Казахстан) – Бейнеу – Берекет

(Туркмения) на Этрек и Амирабад (Иран) с переходом на железнодорожную колею Ирана с возможностью транзпортировки в Пакистан и Индию через строящийся порт Чабахар либо действующие порты Бендер-Аббас или Гвадар (Пакистан) [14].

Для уральских и западносибирских экспортеров сельхозпродукции и продовольствия формирование основного поезда маршрута за счет поставщика минеральных удобрений позволяет организовать прицепку даже единичных вагонов (платформ с контейнерами) к транзитным контейнерным поездам, следующим из Соликамска в Иран или Индию при их обработке на узловых сортировочных станциях (Екатеринбург, Челябинск, Карталы), что резко снижает пороговые затраты производителя для стартовой отправки продукции на экспорт (помимо снижения стоимости самой продукции они смогут получить льготный тариф для маршрутной отправки груза).

Необходимы дополнительные логистические и технические решения на переходе с колеи 1520 мм на 1435 мм на погранпереходе Этрек – Горган (Туркмения – Иран). На многих железнодорожных погранпереходах со странами Восточной Европы и Китая эта техническая проблема уже решена и требуются только экономическая оценка и сравнение стоимости разных вариантов такого перехода.

Кроме поставщиков минеральных удобрений и продовольствия на этот же маршрут будут иметь прямой выход поставщики продукции нефте- и газопереработки из регионов их основной добычи и первичной переработки (Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий АО) на направлении Новый Уренгой – Сургут – Тобольск – Тюмень – Екатеринбург.

Экспортные поставки угля из Кузбасса в Индию тоже могут быть перенаправлены на новый маршрут МТК СЮ – транзитом по действующим железным дорогам Казахстана, Туркмении и Ирана с большим числом

погранпереходов (и далее, к иранским портам Аравийского моря). Эти направления смогут уже в ближайшие год-два принять на себя до 10 млн т угля, освободив тем самым провозные мощности на Транссибе и БАМе, что важно для организации перевозок угля из Якутии и с Дальнего Востока. Освоение новых маршрутов экспорта угля и другого минерального сырья в страны Южной Азии и Ближнего Востока позволит угольным предприятиям Кузбасса и Экибастуза наращивать поставки до 10–12 млн т в год независимо от сроков расширения пропускной способности БАМа и Транссиба и снизит остроту проблемы перекрытия портов и транзита на Черном и Балтийском морях для вывоза угля и другой российской продукции на экспорт.

Для выхода на оптимальные экономические показатели маршрутов МТК СЮ большое значение будет иметь освоение стабильной грузовой базы основного продукта железнодорожных перевозок – угля. Сегодня путь угля из Кузбасса до портов Тихого океана по железной дороге составляет около 5500 км, а до иранского порта Чабахар составит 6500 км. Однако морская часть маршрута до Индии короче в пять-шесть раз, чем из Совгавани или Находки, особенно если груз следует в Мумбаи или другие порты западного побережья Индии.

Иран планирует увеличить пропускную способность порта Чабахар с нынешних 2,5 млн т до 8,5; кроме того, объявленная Ираном 50%-ная скидка от тарифа должна привлечь грузы на новую магистраль. Предполагается, что ежегодный товарооборот МТК СЮ достигнет 20–30 млн т (сейчас по российскому участку через Астрахань и Баку проходит 6,5 млн т).

Для снижения эксплуатационных затрат на перевозках альтернативой электрификации этих маршрутов и применения на них дорогого дизельного топлива может стать организация второго «газовозного полигона» РЖД с использованием дешевого и экологичного

газотопного топлива*. Все страны по маршруту – газодобывающие, могут обеспечить сжиженным газом газозаправочную инфраструктуру железных дорог. Дочерние структуры ПАО «Газпром» готовы инвестировать в развитие сети для расширения использования газотопного топлива.

Маршруты МТК СЮ могут быть продлены на север, с выходом железной дороги к портам Северного морского пути – Сабетты, Архангельска, в перспективе к 2035 г. – к портам Индига, Игарка, Дудинка. ■

Литература

1. Официальный сайт агентства РБК. URL: <https://www.rbc.ru/politics/08/04/2022/624ffa9a79472856155ece> (дата обращения: 08.04.2022).
2. Кириллова А. Г. Актуальные аспекты развития международных транспортных коридоров на территории России // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 2 (75). С. 51–54. ISSN 1994-831X.
3. Lei Y., Huang C. Why Participate in the International North-South Transport Corridor? Analysis from a Transit Country Perspective // Solid State Technology. 2020. Vol. 63. № 1. Pp. 2353–2360.
4. Пак Е. Перспективы реализации транзитного потенциала РФ и Казахстана // Мировая экономика и международные отношения. 2020. № 11. Т. 64. С. 132–138. ISSN 0131-2227.
5. Наджафи Г., Малекан Ю. Железная дорога Исламской Республики Иран: новые перспективы // Бюллетень ОСЖД. 2017. № 1–2. С. 15–20. ISSN 0208-869X.
6. Назари А. Порт Чабахар: юго-восточные ворота международных маршрутов Ирана // Бюллетень ОСЖД. 2018. № 1. С. 6–9. ISSN 0208-869X.
7. Ахметжанов Б., Тажибекова К. Б., Шаметова А. А. Угольная промышленность Казахстана: проблемы и перспективы // Вестник Карагандинского университета. – Сер. : Экономика. 2018. Т. 92. № 4. С. 63–69. ISSN 0142-0843.
8. Аржанцев С. А., Гарист А. В., Цыпленкова Н. В. Инновационное развитие подотраслей АПК на основе Евразийской сельскохозяйственной технологической платформы // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2020. № 1. С. 59–72. ISSN 2077-3595.
9. Структура экспорта Свердловской области. URL: [http://www. https://66.ru/news/other/238807/](http://www.https://66.ru/news/other/238807/) (дата обращения: 17.09.2021). ISSN 2077-3595.
10. Железный каркас Евразии: достижения, проблемы и перспективы континентальной связанности : доклад Международного дискуссионного клуба «Валдай», сентябрь 2021 / Д. Оторбаев, Т. Бордачев, Ю. Белоус [и др.]. – М. : Фонд развития и поддержки Международного дискуссионного клуба «Валдай», 2021. – 32 с.
11. Прокофьев М. Н., Тохиров М. М. Перспективы транспортного коридора «Север – Юг» // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 5. С. 200–213. ISSN 1992-3252
12. Singh R. M. International North – South Transport Corridor: Re-energising India's Gateway to Eurasia. URL: https://idsa.in/system/files/issuebrief/IB_msroy_180815.pdf. (дата обращения: 22.10.2019).
13. Fedorenko R. V. Modern Issues of Development of the Customs and Logistics Infrastructure of the International North – South Transport Corridor // In: Sustainable Growth and Development of Economic Systems: Contradictions in the Era of Digitalization and Globalization. Springer Nature Switzerland AG 2019. Pp. 63–75.
14. Ullah N., Brohi M. A. International North – South Transport Corridor: Challenges and Opportunities for Pakistan // Stratagem. 2018. Vol. 1. № 1. Pp. 100–113.

List of references

1. The official website of the RBC agency [Ofitsial'nyj sayt agentstva RBK]. URL: <https://www.rbc.ru/politics/08/04/2022/624ffa9a79472856155ece> (accessed on: 08.04.2022).
2. Kirillova A. G. Actual aspects of the development of international transport corridors in Russia // Transport of the Russian Federation [Aktual'nye aspekty razvitiya mezhduнародnykh

* Первый «газовозный полигон» РЖД организован на маршруте Егоршино – Тюмень – Сургут – Новый Уренгой с продлением на Северный широтный ход.

- transportnykh koridorov na territorii Rossii // Transport Rossijskoj Federatsii]. 2018. № 2 (75). Pp. 51–54 ISSN 1994-831X.
3. Lei Y., Huang C. Why Participate in the International North-South Transport Corridor? Analysis from a Transit Country Perspective // Solid State Technology. 2020. Vol. 63. № 1. Pp. 2353–2360.
4. Pak E. Prospects for realization of the transit potential of the Russian Federation and Kazakhstan // World economy and international relations [Perspektivy realizatsii tranzitnogo potentsiala RF i Kazakhstana // Mirovaya ehkonomika i mezhdunarodnye otnosheniya]. 2020. № 11. Vol. 64. Pp. 132–138. ISSN 0131-2227.
5. Najafi G., Malekon Yu. The Railway of the Islamic Republic of Iran: new perspectives // Bulletin of OCR (Organization for Cooperation of Railways) [Zheleznaya doroga Islamskoj Respubliki Iran: novye perspektivy // Byulleten' OSZHD]. 2017. № 1–2. Pp. 15–20. ISSN 0208-869X.
6. Nazari A. Chabahar Port: the south-eastern gate of Iran's International Routes // Bulletin of OCR [Chabakhar: yugo-vostochnye vorota mezhdunarodnykh marshrutov Irana // Byulleten' OSZHD]. 2018. № 1. Pp. 6–9. ISSN 0208-869X.
7. Akhmetzhanov B., Tazhibekova K. B., Shemetova A. A. Coal industry of Kazakhstan: problems and prospects // Bulletin of Karaganda University. – Ser. : Economics [Ugol'naya promyshlennost' Kazakhstana: problemy i perspektivy // Vestnik Karagandinskogo universiteta. – Ser. : Ehkonomika]. 2018. Vol. 92. № 4. Pp. 63–69. ISSN 0142-0843.
8. Arzhantsev S. A., Garist A. V., Tsyplenkova N. V. Innovative development of agricultural sub-sectors based on the Eurasian agricultural technology platform // Economics, labor, management in agriculture [Innovatsionnoe razvitie podotraslej APK na osnove Evrazijskoj sel'skokhozyajstvennoj tekhnologicheskoy platformy // Ehkonomika, trud, upravlenie v sel'skom khozyajstve]. 2020. № 1. Pp. 59–72. ISSN 2077-3595.
9. Export structure of the Sverdlovsk region [Struktura ehksporta Sverdlovskoj oblasti]. URL: <http://www.https://66.ru/news/other/238807/> (accessed on: 17.09.2021). ISSN 2077-3595.
10. The Iron Frame of Eurasia: Achievements, problems and prospects of Continental Connectivity: Report of the Valdai International Discussion Club, September 2021 / D. Otorbayev, T. Bordachev, Y. Belous [et al.]. – M. : Foundation for the Development and Support of the Valdai International Discussion Club [Zheleznyj karkas Evrazii: dostizheniya, problemy i perspektivy kontinental'noj svyazannosti : doklad Mezhdunarodnogo diskussionnogo kluba «Valdaj», sentyabr' 2021 / D. Otorbaev, T. Bordachev, Yu. Belous [i dr.]. – M. : Fond razvitiya i podderzhki Mezhdunarodnogo diskussionnogo kluba «Valdaj»], 2021. – 32 p.
11. Prokofiev M. N., Tohirov M. M. Prospects of the transport corridor «North – South» // World of Transport [Perspektivy transportnogo koridora «Sever – Yug» // Mir transporta]. 2019. VOL. 17. № 5. Pp. 200–213. ISSN 1992-3252.
12. Singh R. M. International North – South Transport Corridor: Re-energising India's Gateway to Eurasia. URL: https://idsa.in/system/files/issuebrief/IB_msroy_180815.pdf/. (date of reference: 22.10.2019).
13. Fedorenko R. V. Modern Issues of Development of the Customs and Logistics Infrastructure of the International North – South Transport Corridor // In: Sustainable Growth and Development of Economic Systems: Contradictions in the Era of Digitalization and Globalization. Springer Nature Switzerland AG 2019. Pp. 63–75.
14. Ullah N., Brohi M. A. International North – South Transport Corridor: Challenges and Opportunities for Pakistan // Stratagem. 2018. Vol. 1. № 1. Pp. 100–113.

Статья сдана в редакцию 6 июня 2022 года

Н. А. Осинцев

Ранжирование элементов «зеленой» цепи поставок методом DEMATEL

UDC 656.07:004.896

N. A. Osintsev

Green supply chain elements ranking by DEMATEL method

Аннотация

Актуальность исследования вызвана повышением требований государства и общества к формированию цепей поставок в соответствии с целями устойчивого развития. Принятие решений по управлению цепями должно основываться на комплексной оценке всех элементов цепи с целью дальнейшего использования «зеленых» методов и технологий. Эффективным инструментом такой оценки является использование многокритериальных методов принятия решений (MCDM). Представлен обзор исследований применения MCDM (метод оценки и испытаний принятия решений (DEMATEL)) в «зеленой» логистике и управлении «зелеными» цепями поставок. Предложена методика оценки и ранжирования элементов «зеленой» цепи

поставок с использованием метода DEMATEL. Реализация предлагаемой методики позволяет оценить взаимосвязи между всеми элементами цепи поставок и силу их влияния друг на друга. Расчетный пример ранжирования элементов «зеленой» цепи поставок показал, что наибольшее число взаимосвязей в цепи поставок приходится на транспортный и накопительный элементы логистической системы. Результаты исследования могут быть использованы в качестве основы планирования и реализации решений по применению инструментов «зеленой» логистики.

Ключевые слова: многокритериальные методы принятия решений, DEMATEL, устойчивое развитие, «зеленая» логистика, управление «зелеными» цепями поставок, ранжирование.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-95-106

Abstract

The relevance of this study results from the increasing requirements of the state and society for the formation of supply chains in accordance with the goals of sustainable development. Decision-making on chain management should be based on a comprehensive assessment of all elements of the supply chain in order to further use green methods and technologies. An effective tool for such an assessment is the use of multi-criteria decision-making methods (MCDM). The article presents an overview of the research on application of the MCDM «Method of evaluation and testing of decision-making» (DEMATEL) in green logistics and management of green supply chains. A

Статья рекомендована к публикации Д. С. Завалишным, канд. физ.-мат. наук, УрГУПС. E-mail: Zavalishin@usurt.ru.

Никита Анатольевич Осинцев, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова; г. Магнитогорск, Россия. E-mail: osintsev@magtu.ru. ORCID 0000-0003-1168-6725.

© Н. А. Осинцев, 2022

The article is recommended for publishing D. S. Zavalishchin, PhD, associate professor, USURT. E-mail: Zavalishin@usurt.ru.

Nikita Anatolyevich Osintsev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; «Logistics and Transportation System Management» Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University; Magnitogorsk, Russia. E-mail: osintsev@magtu.ru. ORCID 0000-0003-1168-6725.

© N. A. Osintsev, 2022

methodology for evaluating and ranking elements of the green supply chain using the DEMATEL method is proposed. The implementation of the recommended methodology makes it possible to assess the relationship between all elements of the supply chain and the strength of their influence

on each other. A calculated example of ranking the elements of the green supply chain reveals that the largest number of interconnections in the supply chain is accounted for transport and storage elements of the logistics system. The results of the study may be used as a basis for planning and im-

plementation of decisions to use the green logistics tools.

Keywords: multi-criteria methods of decision-making, DEMATEL, sustainable development, green logistics, management of green supply chains, ranking.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-95-106

Цепи поставок и их основные элементы – транспортные и логистические системы – основа функционирования экономики. Компании по всему миру стремятся создать устойчивые цепи поставок, которые доставляют продукцию на рынок эффективнее, качественнее и экологичнее, чем их конкуренты [1].

С 2000 г. в мировой экономической системе наблюдается положительная динамика объемов торговых потоков [2]. Расширение мирового рынка логистических услуг с 2016 г. составляет 3,48 %, а к 2022 г. должна составить около 12,25 трлн долл. [3]. Требования к надежности, экологичности и социальной ответственности организаций – элементов цепей поставок постоянно повышаются [4]. Государство и общество контролируют соответствие организаций целям и принципам концепции устойчивого развития [5].

Настоящее исследование ставит целью разработку методики оценки и ранжирования элементов логистической системы для эффективной реализации инструментов «зеленой» логистики [6] и достижения целей концепции устойчивого развития при управлении цепями поставок.

Для управления «зелеными» цепями поставок требуются сложные модели принятия решений, которые учитывают множество аспектов формирования цепей поставок с учетом целей и принципов устойчивого развития [7]. Многокритериальные подходы к принятию решений (MCDM) могут использоваться для количественной оценки

компромиссов между экономическими, социальными и экологическими критериями устойчивого развития цепей поставок [8]. Чаще всего при MCDM используются аналитический иерархический процесс (АИП), аналитический сетевой процесс (АНП), метод упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением (TOPSIS), исключение и выбор в условиях реальности (ELECTRE), метод организации сортировки предпочтений для оценок альтернатив (PROMETHEE) и метод оценки и испытаний принятия решений (DEMATEL) [8, 9].

Сложность управления «зелеными» цепями поставок заключается в недостаточности изученных взаимосвязей показателей и параметров логистических потоков [10], а также связей между элементами цепи поставок [7]. Устойчивость цепочек поставок и принятие решений по выбору и внедрению «зеленых» технологий оценивается, как правило, применительно к отдельным функциональным элементам или направлениям логистической системы (закупки, производство, складирование, транспорт, маркетинг). Такой подход снижает продуктивность «зеленых» технологий и не дает эффективного достижения целей устойчивого развития.

В настоящей работе выбран MCDM-метод «Лаборатория оценки и испытаний принятия решений» – DEMATEL [11], что позволяет установить взаимозависимость между исследуемыми объектами – элементами логистической системы в цепи поставок и ранжировать элементы по степени влияния на

Таблица 1

Анализ применения метода DEMATEL в «зеленой» логистике и управлении
«зелеными» цепями поставок

Элемент	Область исследований	MCDM метод	Источник
«Зеленая» закупка	Выбор «зеленого» поставщика	Fuzzy DEMATEL + ANP	[12]
	Оценка «зеленого» поставщика	Fuzzy DEMATEL + ANP + TOPSIS	[13]
	Оценка «зеленого» поставщика	DEMATEL + ANP + TOPSIS	[14]
	Выбор «зеленого» поставщика	DEMATEL	[15–17]
	Оценка «зеленого» поставщика	DEMATEL + ANP + COPRAS	[18]
	Оценки «зеленых» поставщиков в цепях поставок	Fuzzy DEMATEL	[19, 20]
	Оценка программ развития экологических поставщиков	Fuzzy DEMATEL + AHP + TOPSIS	[21]
	Выбор экологических поставщиков	DEMATEL + ANP	[22]
«Зеленое» производство	Оценки факторов выбора «зеленых» логистических компаний	DEMATEL	[23]
	Оценка устойчивости производства в рамках концепций «Индустрия 4.0» и «Логистика 4.0»	DEMATEL	[24]
«Зеленый» склад	Выбор месторасположения устойчивого мультимодального логистического центра	DEMATEL + MAIRCA	[25]
«Зеленый» транспорт	Выбор грузовых автомобилей	Fuzzy DEMATEL + TOPSIS	[26]
	Оценка устойчивого городского грузового транспорта	DEMATEL + AHP	[27]
«Зеленое» управление	Оценка управления «зелеными» проектами в цепях поставок	DEMATEL + ANP	[28]
	Оценка эффективности управления «зеленой» цепью поставок	Fuzzy DEMATEL	[29–31]
	Оценки эффективности компаний в «зеленой» цепи поставок	Fuzzy DEMATEL + ANP + TOPSIS	[32]
	Оценка факторов, оказывающих влияние на реализацию инициатив в управлении «зелеными» цепями поставок	DEMATEL	[33–35]
Прочее	Оценка «зеленой» корпоративной социальной ответственности	DEMATEL	[36]
	Определение приоритетов при внедрении «зеленых» цепей поставок в рамках подхода «технология-организация-среда»	DEMATEL	[37]
	Оценка эффективности обратной логистики	DEMATEL + fuzzy ANP + AHP	[38]
	Оценка факторов влияющих на практику управления «зеленой» цепью поставок в условиях неопределенности	Fuzzy DEMATEL	[35]

достижение целей устойчивого развития, визуализировать причинно-следственные связи между элементами логистической системы в виде карты сетевых отношений. Разделение элементов на группы «влияющие» и «зависимые» позволяет лучше понять структурные взаимосвязи в логистической системе и повышает эффективность использования инструментов «зеленой» логистики.

Основные недостатки использования метода DEMATEL в «зеленых» цепях поставок – отсутствие комплексности и системности к оценке всех видов логистических потоков в соответствии с целями устойчивого развития, акцентирование внимания при оценке на отдельные элементы (области) логистической системы в цепи поставок. Это делает актуальным разработку методики комплексной оценки элементов «зеленой» цепи поставок для установления взаимосвязей между элементами и принятия решений по реализации «зеленых» технологий.

Принципиальная схема оценки и ранжирования элементов логистической системы в «зеленой» цепи поставок представлена на рис. 1.

На первом этапе выполняется декомпозиция логистической системы на элементы с использованием системного и структурно-функционального подходов, предполагающих выделение специфических функций структурных элементов по пропуску и переработке логистических потоков [39]. Такими элементами и их функциями в «зеленой» цепи поставок являются входной элемент – снабжение (ввод потоков в систему), перерабатывающий элемент – производство (качественные изменения потоков), транспортный элемент – транспортирование (продвижение потоков), накопительный элемент – складирование (накопление или замедление потоков), выходной элемент – сбыт, дистрибуция (вывод потоков из системы и их преобразование в финансовые потоки) [40].

Для установления взаимосвязи между элементами и оценки силы влияния элементов друг на друга используется метод DEMATEL, включающий пять основных этапов

1. Построение начальной матрицы прямых связей. Эксперты выполняют попарное сравнение элементов логистической системы с использованием пятибалльной шкалы: отсутствие

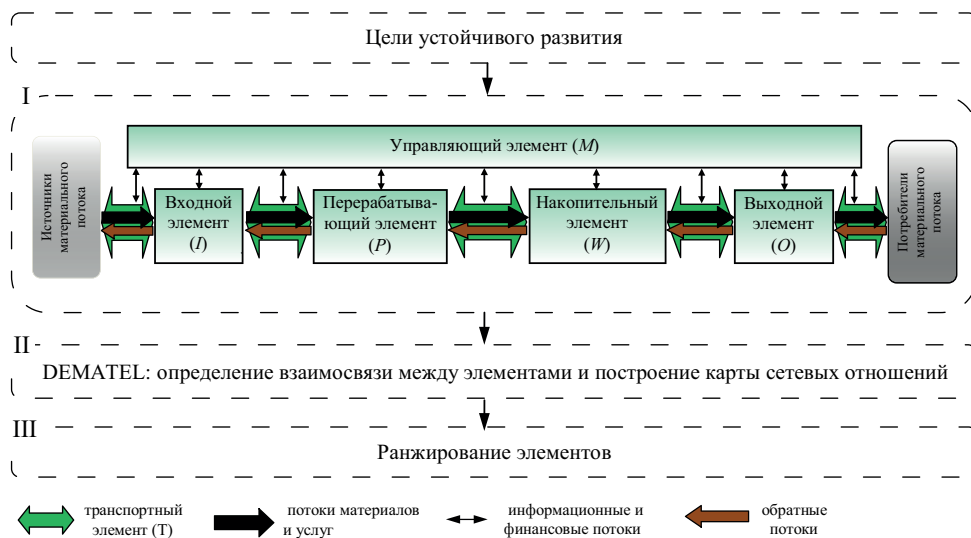


Рис. 1. Принципиальная схема оценки и ранжирования логистических элементов в «зеленой» цепи поставок методом DEMATEL

влияния – 0, слабое влияние – 1, среднее – 2, высокое – 3, очень высокое – 4.

Посредством усреднения оценок экспертов вычисляется средняя матрица A размером $n \times n$.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где a_{ij} – степень влияния i -го элемента на j -й элемент.

2. Расчет нормализованной матрицы прямых связей X путем преобразования матрицы прямых связей A по формулам (2) и (3):

$$X = A\lambda, \quad (2)$$

$$\lambda = \min \left[\frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}}, \frac{1}{\max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n a_{ij}} \right]. \quad (3)$$

3. Расчет общей матрицы связей:

$$\begin{aligned} T &= \lim_{k \rightarrow \infty} (X + X^2 + \dots + X^k) = \\ &= X(1 - X)^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

4. Расчет числа взаимосвязей и сил влияния между элементами. Для этого по формулам (6) и (7) рассчитываются векторы D и R в общей матрице связей T :

$$T = [t_{ij}]_{n \times n}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

$$D = \left[\sum_{j=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1} = [t_{i.}]_{n \times 1}, \quad (6)$$

$$R = \left[\sum_{i=1}^n t_{ij} \right]_{1 \times n} = [t_{.j}]_{1 \times n}. \quad (7)$$

Значения D_i и R_i показывают прямое и обратное воздействие каждого элемента строки и столбца на другие элементы. Значение $(D_i + R_i)$ показывает важность элемента i относительно других элементов и соответствует числу

взаимосвязей элемента i с другими элементами. Значение $(D_i - R_i)$ показывает силу влияний элемента i на другие элементы. Если значение $(D_i - R_i)$ положительное, то элемент i может быть отнесен к группе «влияющие», если отрицательное, то элемент i находится под влиянием других элементов и относится к группе «зависимые».

5. Построение причинно-следственной диаграммы (карты сетевых отношений). Такая диаграмма получается сопоставлением упорядоченных пар $(D_i + R_i)$ по горизонтальной оси и $(D_i - R_i)$ по вертикальной. Она показывает структурную взаимосвязь между рассматриваемыми элементами и корреляцию между ними.

Заключительный этап – ранжирование элементов. Ранжирование выполняется по результатам расчета веса каждого элемента с использованием различных подходов, представленных в [41]. Для сравнения, в настоящей работе представлен расчет по четырем различным подходам по формулам (8)–(11) [41]:

$$w_i = \sqrt{(D_i + R_i)^2 + (D_i - R_i)^2}, \quad (8)$$

$$w_i = \frac{1}{2}((D_i + R_i) + (D_i - R_i)), \quad (9)$$

$$w_i = \frac{(D_i + R_i)}{\sum_{i=1}^n (D_i + R_i)^2}, \quad (10)$$

$$w_i = \frac{(D_i + R_i)}{\sum_{i=1}^n (D_i + R_i)}. \quad (11)$$

Основными результатами применения метода DEMATEL служат установление силы влияния и взаимосвязей между элементами цепи поставок и их ранжирование в соответствии с целями устойчивого развития.

Усредненная оценка логистических элементов «зеленой» цепи поставок приведена в таблице 2.

Нормализованная матрица прямых связей (X) и общая матрица связей (T) рассчитываются по формулам (1)–(4) (таблицы 3, 4).

Таблица 2

Исходная матрица прямых связей элементов

Элемент	<i>M</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>W</i>	<i>T</i>	<i>O</i>
Управляющий (<i>M</i>)	0	3	3,6	3,2	3,4	3,6
Входной (<i>I</i>)	1	0	3	2,8	2,6	1,8
Перерабатывающий (<i>P</i>)	1,8	2,4	0	3	3,2	2,6
Накопительный (<i>W</i>)	1,6	2	2	0	2,8	3
Транспортный (<i>T</i>)	2,2	1,6	2,2	2,6	0	2,6
Выходной (<i>O</i>)	2,4	0,8	2,4	2,4	1,8	0

Таблица 3

Нормализованная матрица прямых связей элементов

Элемент	<i>M</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>W</i>	<i>T</i>	<i>O</i>
<i>M</i>	0,0	0,1786	0,2143	0,1905	0,2024	0,2143
<i>I</i>	0,0595	0,0	0,1786	0,1667	0,1548	0,1071
<i>P</i>	0,1071	0,1429	0,0	0,1786	0,1905	0,1548
<i>W</i>	0,0952	0,1190	0,1190	0,0	0,1667	0,1786
<i>T</i>	0,1310	0,0952	0,1310	0,1548	0,0	0,1548
<i>O</i>	0,1429	0,0476	0,1429	0,1429	0,1071	0,0

Таблица 4

Общая матрица связей (*T*) элементов

Элемент	<i>M</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>W</i>	<i>T</i>	<i>O</i>
<i>M</i>	0,3354	0,4970	0,6286	0,6420	0,643654	0,650947
<i>I</i>	0,2893	0,2382	0,4606	0,4756	0,462453	0,422452
<i>P</i>	0,3622	0,3968	0,3546	0,5325	0,535868	0,507774
<i>W</i>	0,3243	0,3455	0,4216	0,3371	0,474115	0,483911
<i>T</i>	0,3527	0,3304	0,4326	0,4729	0,333967	0,468828
<i>O</i>	0,3404	0,2714	0,4118	0,4321	0,40118	0,30501

В таблице 4 красная зона показывает несущественные взаимосвязи между элементами, оценка которых ниже установленного экспертами порогового значения $\alpha = 0,427$.

Расчет числа взаимосвязей и сил влияния между элементами выполняется с использованием формул (5)–(7); таблица 5.

В соответствии со значениями ($Di - Ri$) управляющий (*M*) и входной (*I*) элементы отнесены к группе «влияющие»,

а перерабатывающий (*P*), накопительный (*W*), транспортный (*T*) и выходной (*O*) элементы отнесены группе «зависимые».

Завершающий этап метода DEMATEL – построение карты сетевых отношений логистических элементов «зеленой» цепи поставок (рис. 2).

Красная зона на рис. 2 и количество стрелок на рис. 3 показывают, что наибольшее число взаимосвязей между элементами цепи поставок приходится на

Таблица 5

Результаты оценки элементов методом DEMATEL

Элемент	D	R	$D + R$	$D - R$
Управляющий (M)	3,3976	2,0042	5,4018	1,3934
Входной (I)	2,3487	2,0794	4,4281	0,2693
Перерабатывающий (P)	2,6896	2,7098	5,3994	-0,0201
Накопительный (W)	2,3866	2,8924	5,2790	-0,5058
Транспортный (T)	2,3914	2,8512	5,2427	-0,4598
Выходной (O)	2,1620	2,8389	5,0009	-0,6770

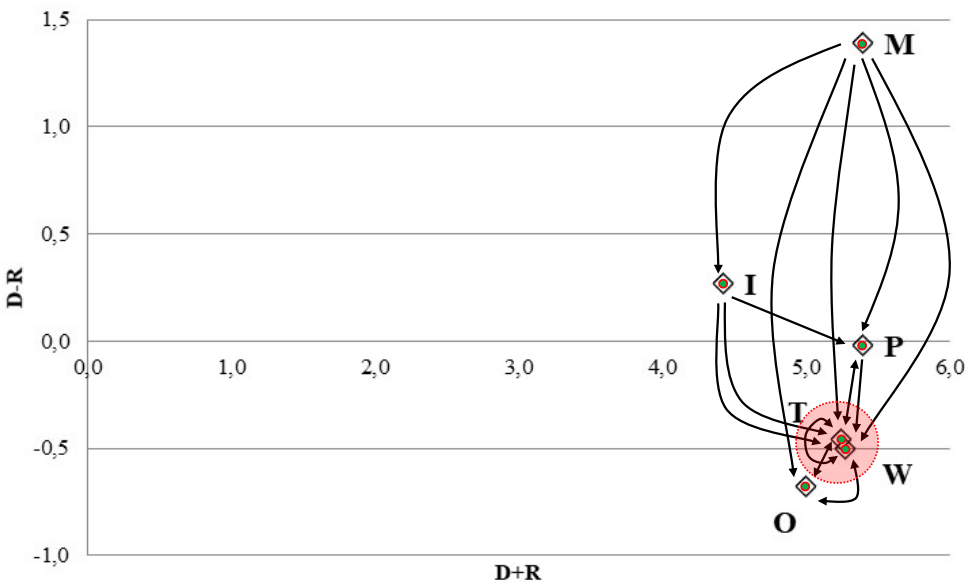


Рис. 2. Карта сетевых отношений элементов

Формула	$W_{i(I)}$	$W_{i(P)}$	$W_{i(M)}$	$W_{i(W)}$	$W_{i(T)}$	$W_{i(O)}$
(8)	5,5786	4,4363	5,3995	5,3031	5,2628	5,0465
(9)	3,3976	2,3487	2,6896	2,3866	2,3914	2,1620
(10)	3,3976	2,3487	2,6896	2,3866	2,3914	2,1620
(11)	0,0341	0,0280	0,0341	0,0333	0,0331	0,0316

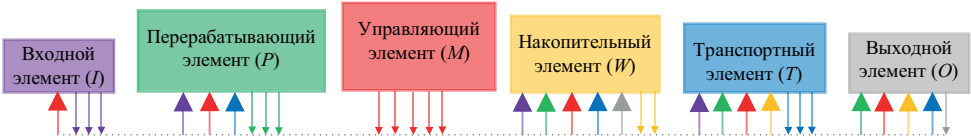


Рис. 3. Весовые коэффициенты и число связей между элементами

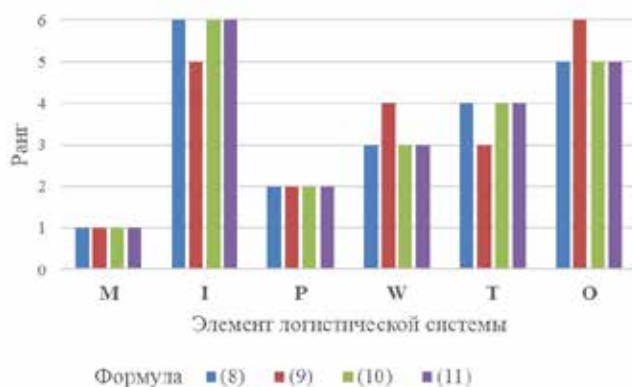


Рис. 4. Результаты ранжирования элементов

транспортный (*T*) и накопительный (*W*) элементы. На накопительный элемент влияют пять элементов цепи поставок, на транспортный – четыре.

Расчет весовых коэффициентов логистических элементов «зеленой» цепи поставок выполняется с использованием формул (8)–(11). Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Результаты расчета весовых коэффициентов по формулам (8), (10) и (11) показали полную корреляцию (рис. 3, 4). Общий коэффициент ранговой корреляции Спирмена по результатам оценки четырьмя подходами (см. формулы (8)–(11)) составил 0,995.

Результаты ранжирования элементов «зеленой» цепи поставок служат основой использования инструментов

«зеленой» логистики. Установленные взаимосвязи между элементами, сила их влияния друг на друга являются основой реализации решений по повышению устойчивости цепи поставок.

Расчетный пример использования методики показал, что наибольшее число взаимосвязей между элементами цепи поставок приходится на транспортный (*T*) и накопительный (*W*) элементы (по семь связей). Наибольшее влияние на элементы «зеленой» цепи поставок оказывает управляющий элемент (*M*), наименьшее – входной (*I*) и выходной (*O*) элементы. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена, равный 0,995, при ранжировании элементов четырьмя различными способами показал высокую сходимость результатов. ■

Литература

1. Millar M. Global Supply Chain Ecosystems: Strategies for Competitive Advantage in a Complex World. London, Philadelphia: Kogan Page, 2015. – 274 с. ISBN 978-0-7494-7158-3.
2. World Trade Statistical review 2020. Geneva, Switzerland: World Trade Organization, 2020. – 156 с. ISBN 978-92-870-5032-8.
3. Logistics Market Outlook. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/logistics-market> (дата обращения: 06.07.2021).
4. Bhatia M. S., Gangwani K. K. Green supply chain management: Scientometric review and analysis of empirical research // Journal of Cleaner Production. 2021. – Т. 284. – № 14. – С. 124722. ISSN 0959-6526.
5. The Sustainable Development. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/> (дата обращения: 06.07.2021).
6. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green logistics: a system of methods and instruments – part 2 // Nase More. 2018. – Т. 65. – № 1. – С. 49–55. ISSN 0469-6255.
7. Osintsev N., Rakhmangulov A., Sladkowski A. Logistic flow control system in green supply chains: Ecology in Transport: Problems and Solutions, Lecture Notes in Networks and Systems, 2020. – Т. 124. – С. 311–380. ISBN 978-3-030-42322-3.

8. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review / A. Banasik, J. M. Bloemhof-ruwaard, A. Kanellopoulos, G. D. H. Claassen, A. J. van der Vorst // *Flexible Services and Manufacturing Journal*. – 2018. – Т. 30. – № 3. – С. 366–396. ISSN 1936-6582.
9. Wątróbski J. Outline of multicriteria decision-making in green logistics // *Transportation research Procedia*. 2016. – Т. 16. – С. 537–552. ISSN 2352-1465.
10. Осинцев Н. Параметры и показатели потоков в зеленых цепях поставок // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 27–40. ISSN 2222-9396.
11. Gabus A., Fontela E. World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL. Geneva, Switzerland: Battelle Geneva research Center: Battelle Geneva research Center, 1972.
12. Evaluating a green supplier selection problem using a hybrid MODM algorithm / E. A. Bakeshlou, A. A. Khamseh, M. A. G. Asl, J. Sadeghi, M. Abbaszadeh // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2017. – Т. 28. – № 4. – С. 913–927. ISSN 0956-5515.
13. Büyükožkan G., Çifçi G. fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS to evaluate green suppliers // *Expert Systems with Applications*. 2012. – Т. 39. – № 3. – С. 3000–3011. ISSN 0957-4174.
14. Jayant A., Neeru, Agarwal A. A novel hybrid MCDM approach based on DEMATEL, AHP and TOPSIS to evaluate green suppliers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. – Т. 1240. – С. 12010. ISSN 1742-6596.
15. Falatoonitoosi E., Ahmed S., Sorooshian S. A multicriteria framework to evaluate supplier's greenness // *Abstract and Applied Analysis*. 2014. – Т. 2014. – С. 396923. ISSN 1085-3375.
16. Falatoonitoosi E., Leman Z., Sorooshian S. Modeling for green supply chain evaluation // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. – Т. 2013. – № 4. – С. 1–9. ISSN 1563-5147.
17. Hsu C.-W., Kuo T.-C., Chen S.-H., Hu A. H. Using DEMATEL to develop a carbon management model of supplier selection in green supply chain management // *Journal of Cleaner Production*. 2013. – Т. 56. – С. 164–172. ISSN 0959-6526.
18. Liou J. J., Tamošaitienė J., Zavadskas E. K., Tzeng G.-H. New hybrid COPrAS-G MADM model for improving and selecting suppliers in green supply chain management // *International Journal of Production research*. 2016. – Т. 54. – № 1. – С. 114–134. ISSN 0020-7543.
19. Mavi R.K., Kazemi S., Najafabadi A. F., Moussbadi H. B. Identification and assessment of logistical factors to evaluate a green supplier using the fuzzy logic DEMATEL method // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2013. – Т. 22. – № 2. – С. 445–455. ISSN 1230-1485.
20. Wu K.-J., Tseng M.-L., Vy T. Evaluation the drivers of green supply chain management practices in uncertainty // *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 2011. – Т. 25. – С. 384–397. ISSN 1877-0428.
21. Pourjavad E., Shahin A. Green supplier development programmes selection: a hybrid fuzzy multi-criteria decision-making approach // *International Journal of Sustainable Engineering*. 2020. – Т. 13. – № 6. – С. 463–472. ISSN 1939-7038.
22. Yang H. Competitiveness identification of supply chain management enterprises based on DEMATEL-ANP method // *Open Journal of Business and Management*. 2019. – № 7. – С. 93–105. ISSN 2329-3284.
23. Cheng S.-H., Ou S. M., Lin S. M. Using decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) to explore the key success factors for green logistics manufacturers // *African Journal of Business Management*. 2018. – Т. 12. – № 3. – С. 58–65. ISSN 1993-8233.
24. Torbacki W., Kijewska K. Identifying Key Performance Indicators to be used in Logistics 4.0 and Industry 4.0 for the needs of sustainable municipal logistics by means of the DEMATEL method // *Transportation research Procedia*. 2019. – Т. 39. – С. 534–543. ISSN 2352-1465.
25. Pamucar D. S., Tarle S. P., Parezanovic T. New hybrid multi-criteria decision-making DEMATEL-MAIRCA model: Sustainable selection of a location for the development of multimodal logistics centre // *Economic research-Ekonomska Istraživanja*. 2019. – Т. 31. – № 1. – С. 1641–1665. ISSN 1848-9664.
26. Baykasoglu A., Kaplanoğlu V., Durmuşoğlu Z. D., Şahin C. Integrating fuzzy DEMATEL and fuzzy hierarchical TOPSIS methods for truck selection // *Expert Systems with Applications*. 2013. – Т. 40. – № 3. – С. 899–907. ISSN 0957-4174.
27. Kijewska K., Torbacki W., Iwan S. Application of AHP and DEMATEL methods in choosing and analysing the measures for the distribution of goods in Szczecin region // *Sustainability*. 2018. – Т. 10. – № 7. – С. 2365. ISSN 2071-1050.

28. Building criteria for evaluating green project management: An integrated approach of DEMATEL and ANP / Y.-C. Chou, C.-H. Yang, C.-H. Lu, V.-T. Dang, P.-A. Yang // Sustainability. 2017. – Т. 9. – С. 740. ISSN 2071-1050.
29. Kazancoglu Y., Kazancoglu I., Sagnak M. Fuzzy DEMATEL-based green supply chain management performance // Industrial Management & Data Systems. 2018. – Т. 118. – № 2. – С. 412–431. ISSN 0263-5577.
30. Lin R.-J. Using fuzzy DEMATEL to evaluate the green supply chain management practices // Journal of Cleaner Production. 2013. – Т. 40. – С. 32–39. ISSN 0959-6526.
31. Malviya R. K., Kant R. Hybrid decision making approach to predict and measure the success possibility of green supply chain management implementation // Journal of Cleaner Production. 2016. – Т. 135. – С. 387–409. ISSN 0959-6526.
32. Uygun O., Dede A. Performance evaluation of green supply chain management using integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques // Computers & Industrial Engineering. 2016. – Т. 102. – С. 502–511. ISSN 0360-8352.
33. Wu H.-H., Chang S.-Y. A case study of using DEMATEL method to identify critical factors in green supply chain management // Applied Mathematics and Computation. 2015. – Т. 256. – С. 394–403. ISSN 0096-3003.
34. Gandhi S., Mangla S. K., Kumar P., Kumar D. Evaluating factors in implementation of successful green supply chain management using DEMATEL: A case study // International Strategic Management review. 2015. – Т. 3. – № 1–2. – С. 96–109. ISSN 2306-7748.
35. Wu K.-J., Liao C.-J., Tseng M.-L., Chiu A.S. Exploring decisive factors in green chain practices under uncertainty // International Journal of Production Economics. 2015. – Т. 159. – С. 147–157. ISSN 0925-5273.
36. Evaluating the green corporate social responsibility of manufacturing corporations from a green industry law perspective / W.-F. Guo, J. Zhou, C.-L. Yu, S.-B. Tsai, Y.-Z. Xue, Q. Chen, J.-J. Guo, P.-Y. Huang, C.-H. Wu // International Journal of Production research. 2015. – Т. 53. – № 2. – С. 665–674. ISSN 0020-7543.
37. Hwang B.-N., Huang C.-Y., Wu C.-H. A TOE approach to establish a green supply chain adoption decision model in the semiconductor industry // Sustainability. 2016. – Т. 8. – С. 168. ISSN 2071-1050.
38. Shaik M. N., Abdul-Kader W. A hybrid multiple criteria decision making approach for measuring comprehensive performance of reverse logistics enterprises // Computers & Industrial Engineering. 2018. – Т. 123. – С. 9–25. ISSN 0360-8352.
39. Корнилов С., Рахмангулов А., Шаульский Б. Основы логистики : учеб. пособие. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 302 с. ISBN 978-5-89035-918-6.
40. Осинцев Н. Концепция системы управления логистическими потоками в «зеленых» цепях поставок // Вестник УрГУПС. 2020. – № 2. – С. 81–92. ISSN 2079-0392.
41. Dytczak M., Ginda G. DEMATEL-based ranking approaches // WSB University in Wroclaw research Journal. 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 191–201. ISSN 1643-7772.

List of references

1. Millar M. Global Supply Chain Ecosystems: Strategies for Competitive Advantage in a Complex World. London, Philadelphia: Kogan Page, 2015. – 274 p. ISBN 978-0-7494-7158-3.
2. World Trade Statistical review 2020. Geneva, Switzerland: World Trade Organization, 2020. – 156 p. ISBN 978-92-870-5032-8.
3. Logistics Market Outlook. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/logistics-market> (дата обращения: 06.07.2021).
4. Bhatia M. S., Gangwani K. K. Green supply chain management: Scientometric review and analysis of empirical research // Journal of Cleaner Production. 2021. – Т. 284. – № 14. – P. 124722. ISSN 0959-6526.
5. The Sustainable Development. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/> (дата обращения: 06.07.2021).
6. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green logistics: a system of methods and instruments – part 2 // Nase More. 2018. – Т. 65. – № 1. – P. 49–55. ISSN 0469-6255.
7. Osintsev N., Rakhmangulov A., Sladkowski A. Logistic flow control system in green supply chains: Ecology in Transport: Problems and Solutions, Lecture Notes in Networks and Systems, 2020. – Т. 124. – P. 311–380. ISBN 978-3-030-42322-3.

8. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review / A. Banasik, J. M. Bloemhof-ruwaard, A. Kanellopoulos, G. D. H. Claassen, A. J. van der Vorst // *Flexible Services and Manufacturing Journal*. – 2018. – Т. 30. – № 3. – P. 366–396. ISSN 1936-6582.
9. Wańtróbski J. Outline of multicriteria decision-making in green logistics // *Transportation research Procedia*. 2016. – Т. 16. – P. 537–552. ISSN 2352-1465.
10. Osintsev N. Parameters and indicators of the flows in green supply chains // *Modern problems of Russia's transport complex. [Parametry i pokazateli potokov v zelenykh tsepyakh postavok // Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii]* 2019. – Т. 9. – № 1. – Pp. 27–40. ISSN 2222-9396.
11. Gabus A., Fontela E. World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL. Geneva, Switzerland: Battelle Geneva research Center: Battelle Geneva research Center, 1972.
12. Evaluating a green supplier selection problem using a hybrid MODM algorithm / E. A. Bakeshlou, A. A. Khamseh, M. A. G. Asl, J. Sadeghi, M. Abbaszadeh // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2017. – Т. 28. – № 4. – P. 913–927. ISSN 0956-5515.
13. Büyüközkan G., Çifçi G. fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS to evaluate green suppliers // *Expert Systems with Applications*. 2012. – Т. 39. – № 3. – P. 3000–3011. ISSN 0957-4174.
14. Jayant A., Neeru, Agarwal A. A novel hybrid MCDM approach based on DEMATEL, AHP and TOPSIS to evaluate green suppliers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. – Т. 1240. – P. 12010. ISSN 1742-6596.
15. Falatoonitoosi E., Ahmed S., Sorooshian S. A multicriteria framework to evaluate supplier's greenness // *Abstract and Applied Analysis*. 2014. – Т. 2014. – P. 396923. ISSN 1085-3375.
16. Falatoonitoosi E., Leman Z., Sorooshian S. Modeling for green supply chain evaluation // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. – Т. 2013. – № 4. – Pp. 1–9. ISSN 1563-5147.
17. Hsu C.-W., Kuo T.-C., Chen S.-H., Hu A. H. Using DEMATEL to develop a carbon management model of supplier selection in green supply chain management // *Journal of Cleaner Production*. 2013. – Т. 56. – P. 164–172. ISSN 0959-6526.
18. Liou J.J., Tamošaitienė J., Zavadskas E. K., Tzeng G.-H. New hybrid COPrAS-G MADM model for improving and selecting suppliers in green supply chain management // *International Journal of Production research*. 2016. – Т. 54. – № 1. – P. 114–134. ISSN 0020-7543.
19. Mavi r.K., Kazemi S., Najafabadi A. F., Moussbadi H. B. Identification and assessment of logistical factors to evaluate a green supplier using the fuzzy logic DEMATEL method // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2013. – Т. 22. – № 2. – P. 445–455. ISSN 1230-1485.
20. Wu K.-J., Tseng M.-L., Vy T. Evaluation the drivers of green supply chain management practices in uncertainty // *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 2011. – Т. 25. – P. 384–397. ISSN 1877-0428.
21. Pourjavad E., Shahin A. Green supplier development programmes selection: a hybrid fuzzy multi-criteria decision-making approach // *International Journal of Sustainable Engineering*. 2020. – Т. 13. – № 6. – P. 463–472. ISSN 1939-7038.
22. Yang H. Competitiveness identification of supply chain management enterprises based on DEMATEL-ANP method // *Open Journal of Business and Management*. 2019. – № 7. – P. 93–105. ISSN 2329-3284.
23. Cheng S.-H., Ou S. M., Lin S. M. Using decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) to explore the key success factors for green logistics manufacturers // *African Journal of Business Management*. 2018. – Т. 12. – № 3. – P. 58–65. ISSN 1993-8233.
24. Torbacki W., Kijewska K. Identifying Key Performance Indicators to be used in Logistics 4.0 and Industry 4.0 for the needs of sustainable municipal logistics by means of the DEMATEL method // *Transportation research Procedia*. 2019. – Т. 39. – P. 534–543. ISSN 2352-1465.
25. Pamucar D. S., Tarle S. P., Parezanovic T. New hybrid multi-criteria decision-making DEMATEL-MAIRCA model: Sustainable selection of a location for the development of multimodal logistics centre // *Economic research-Ekonomska Istraživanja*. 2019. – Т. 31. – № 1. – P. 1641–1665. ISSN 1848-9664.
26. Baykasoğlu A., Kaplanoglu V., Durmuşoğlu Z. D., Şahin C. Integrating fuzzy DEMATEL and fuzzy hierarchical TOPSIS methods for truck selection // *Expert Systems with Applications*. 2013. – Т. 40. – № 3. – P. 899–907. ISSN 0957-4174.

27. Kijewska K., Torbacki W., Iwan S. Application of AHP and DEMATEL methods in choosing and analysing the measures for the distribution of goods in Szczecin region // Sustainability. 2018. – T. 10. – № 7. – P. 2365. ISSN 2071-1050.
28. Building criteria for evaluating green project management: An integrated approach of DEMATEL and ANP / Y.-C. Chou, C.-H. Yang, C.-H. Lu, V.-T. Dang, P.-A. Yang // Sustainability. 2017. – T. 9. – P. 740. ISSN 2071-1050.
29. Kazancoglu Y., Kazancoglu I., Sagnak M. Fuzzy DEMATEL-based green supply chain management performance // Industrial Management & Data Systems. 2018. – T. 118. – № 2. – Pp. 412–431. ISSN 0263-5577.
30. Lin R.-J. Using fuzzy DEMATEL to evaluate the green supply chain management practices // Journal of Cleaner Production. 2013. – T. 40. – C. 32–39. ISSN 0959-6526.
31. Malviya R. K., Kant R. Hybrid decision making approach to predict and measure the success possibility of green supply chain management implementation // Journal of Cleaner Production. 2016. – T. 135. – C. 387–409. ISSN 0959-6526.
32. Uygun O., Dede A. Performance evaluation of green supply chain management using integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques // Computers & Industrial Engineering. 2016. – T. 102. – C. 502–511. ISSN 0360-8352.
33. Wu H.-H., Chang S.-Y. A case study of using DEMATEL method to identify critical factors in green supply chain management // Applied Mathematics and Computation. 2015. – T. 256. – C. 394–403. ISSN 0096-3003.
34. Gandhi S., Mangla S. K., Kumar P., Kumar D. Evaluating factors in implementation of successful green supply chain management using DEMATEL: A case study // International Strategic Management review. 2015. – T. 3. – № 1–2. – C. 96–109. ISSN 2306-7748.
35. Wu K.-J., Liao C.-J., Tseng M.-L., Chiu A.S. Exploring decisive factors in green chain practices under uncertainty // International Journal of Production Economics. 2015. – T. 159. – C. 147–157. ISSN 0925-5273.
36. Evaluating the green corporate social responsibility of manufacturing corporations from a green industry law perspective / W.-F. Guo, J. Zhou, C.-L. Yu, S.-B. Tsai, Y.-Z. Xue, Q. Chen, J.-J. Guo, P.-Y. Huang, C.-H. Wu // International Journal of Production research. 2015. – T. 53. – № 2. – C. 665–674. ISSN 0020-7543.
37. Hwang B.-N., Huang C.-Y., Wu C.-H. A TOE approach to establish a green supply chain adoption decision model in the semiconductor industry // Sustainability. 2016. – T. 8. – C. 168. ISSN 2071-1050.
38. Shaik M. N., Abdul-Kader W. A hybrid multiple criteria decision making approach for measuring comprehensive performance of reverse logistics enterprises // Computers & Industrial Engineering. 2018. – T. 123. – C. 9–25. ISSN 0360-8352.
39. Kornilov S., Rakhmangulov A., Shaulsky B. Fundamentals of Logistics : textbook. manual. – M. : FSBEI «Educational and Methodological Center for education in railway transport» [Osnovy logistiki : uchebnoe posobie. – M. : FGBOU «Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte»], 2016. – 302 p. ISBN 978-5-89035-918-6.
40. Osintsev N. The concept of management system of logistics flows in «green» supply chains // Bulletin of USURT [Kontseptsiya sistemy upravleniya logisticheskimi potokami v «zelenykh» tsepyakh postavok // Vestnik UrGUPS]. 2020. – № 2. – Pp. 81–92. ISSN 2079-0392.
41. Dytczak M., Ginda G. DEMATEL-based ranking approaches // WSB University in Wroclaw research Journal. 2016. – T. 16. – № 3. – C. 191–201. ISSN 1643-7772.

Статья сдана в редакцию 1 октября 2021 года

М. Р. Якимов

Подходы к формированию эффективной маршрутной сети крупных городов

UDC 656

М. R. Yakimov

Approaches to formation of an effective route network of large cities

Аннотация

В статье рассматриваются подходы к построению оптимальной маршрутной сети для систем транспорта разной провозной способности. Решением такой задачи служит формирование маршрутной сети и первоначальных объемов движения транспорта по ней в виде интервалов движения подвижного состава (все виды городского пассажирского транспорта, включая водный и железнодорожный транспорт). Однако наиболее интересна задача формирования маршрутной сети для уличного пассажирского транспорта общего пользования на маршрутах. На основе рассчитанных интервалов движения формируются пассажирское и производственное расписания регулярных перевозок, планируется необходимое количество подвижного состава. Показана возможность, не изменяя пассажирского расписания, оптимизировать объем транспортной работы за счет модификации производственного расписания и снижения объема выпуска подвижного состава на маршрутах.

Снизить начальную максимальную цену контрактов на регулярные пассажирские перевозки можно при помощи двухступенчатой оптимизации объемов транспортной работы, что позволяет сформировать эффективную модель организации регулярных пассажирских перевозок и свести к минимуму среднее время реализации транспортных корреспонденций.

В качестве примера взят г. Березники (Пермский край), показано решение задач формирования оптимальной маршрутной сети для каждого выбранного вида транспорта; представлены формирование начального набора маршрутов, постановка и решение оптимизационной задачи: оптимизация существующего набора маршрутов по определенному целевому критерию с учетом действующих ограничений в поле транспортного предложения.

Ключевые слова: маршрутная сеть, общественный транспорт, расписание движения, транспортная работа.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-107-113

Abstract

The article discusses approaches to building an optimal route network for transport systems of various carrying capacities. The solution to this problem is the formation of the route network and initial volumes of traffic on it in the form of intervals of movement of rolling stock (all types of urban passenger transport, including water and rail transport). However, the most interesting task is the formation of a route network for public street passenger transport on routes. Based on the calculated intervals of movement, passenger and production schedules of regular transportation are formed, the required number of rolling stock is planned. It is shown that it is possible, without changing the passenger schedule, to optimize the volume of transport work by modifying the production schedule and reducing the volume of rolling stock production on routes.

It is possible to reduce the initial maximum price of contracts for regular passenger transportation by means of a two-stage optimization of the volume of transport work, which makes it possible to form an effective model for organizing regular passenger transportation and minimize the average time for implementation of transport correspondence.

As an example, the city of Berezniki (Perm Area) is taken, the solution of problems of forming the optimal route network for each selected type of transport is shown; the formation of the initial set of routes, formulation and solution of an optimization problem are presented: optimization of the existing set of routes according to a certain target criterion, taking into account the current restrictions in the field of transport offer.

Keywords: route network, public transport, traffic schedule, transport work.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-107-113

Статья рекомендована к публикации Г.А. Тимофеевой, д-ром физ.-мат. наук, УрГУПС. E-mail: GTimofeeva@usurt.ru.

Михаил Ростиславович Якимов, д-р техн. наук; Институт транспортного планирования Российской академии транспорта; Москва, Россия. E-mail: yakimov@rosacademtrans.ru. ORCID 0000-0002-7627-4791.

© М. Р. Якимов, 2022

The article is recommended for publishing G. A. Timofeeva, Doctor of Physics and Mathematics. sciences, UrGUPS. E-mail: GTimofeeva@usurt.ru.

Mikhail Rostislavovich Yakimov, Doctor of Technical Sciences; Institute of Transport Planning of the Russian Academy of Transport; Moscow, Russia. E-mail: yakimov@rosacademtrans.ru. ORCID 0000-0002-7627-4791.

© М. R. Yakimov, 2022

Основным инструментом при формировании эффективной модели организации регулярных пассажирских перевозок служит прогнозная транспортная модель; с ее помощью на основе результатов натурных обследований оценивается суточная неравномерность пассажиропотока. Это дает возможность рассчитать оптимальные интервалы движения подвижного состава.

Чтобы повысить эффективность работы системы регулярных пассажирских перевозок недостаточно изменить объем выполняемой транспортной работы, усовершенствовать производственное расписание. Совершенствование только производственного расписания движения подвижного состава неэффективно, если сама маршрутная сеть построена не оптимально. В таких случаях перед оптимизацией расписания движения подвижного состава необходимо модернизировать саму маршрутную сеть регулярных пассажирских перевозок [1–4].

Основа эффективного функционирования системы регулярных пассажирских перевозок – конфигурация маршрутной сети, выбор видов и типов транспортных средств, работающих на отдельных маршрутах/территориях.

Формирование маршрутной сети выбранным видам транспорта начинается с подбора маршрутов и оптимизации действующего набора маршрутов по определенному целевому критерию с учетом действующих ограничений в поле транспортного предложения.

Оптимальное количество маршрутов для муниципального образования определяется исходя из статистических данных, характеризующих территорию, и параметров существующей городской транспортной системы. Количество маршрутов можно представить в виде функциональной зависимости от ряда параметров:

$$m = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots), \quad (1)$$

где m – необходимое количество маршрутов для организации транспортного

обслуживания на территории города, ед.; f – функция зависимости параметра количество маршрутов от других параметров территории города; X_i – i -й параметр территории города, от которого зависит необходимое количество маршрутов для организации транспортного обслуживания на территории города.

В качестве параметров X_i могут выступать разные характеристики территории. Предлагается искать линейную зависимость между показателями. Такая зависимость в общем случае будет иметь вид

$$\sum_{i=1}^p X_{ij} k_i = m_j, \quad (2)$$

где m_j – необходимое количество маршрутов для организации транспортного обслуживания на территории города j , ед.; k_i – весовой коэффициент i -го параметра территории города; X_{ij} – значение i -го параметра территории, от которого зависит необходимое количество маршрутов, для города j ; P – количество параметров территории, по которым проводится оценка необходимого количества маршрутов.

Параметр «количество маршрутов» зависит от следующих показателей: количество жителей, площадь города, количество остановочных пунктов, коэффициент пересадочности. Чем больше территория города, чем больше в нем жителей и чем больше количество остановочных пунктов, которые необходимо обслужить, тем большее количество маршрутов требуется для организации качественного транспортного обслуживания [1, 5–8].

Количество маршрутов имеет обратную зависимость с коэффициентом пересадочности. Так, чем больше коэффициент пересадочности, тем меньше необходимо маршрутов, т.к. нет потребности в большом количестве прямых транспортных связей, соединяющих разные территории города.

Следовательно, зависимость (2) между необходимым количеством маршру-

тов и количеством жителей, площадью города, количеством остановочных пунктов, коэффициентом пересадочности будет выглядеть следующим образом:

$$m = \frac{k_1 \cdot N + k_2 \cdot S + k_3 \cdot O}{I} \quad (3)$$

или, приводя к линейной комбинации аналогично форме (2):

$$m = \frac{N}{I} k_1 + \frac{S}{I} k_2 + \frac{O}{I} k_3, \quad (4)$$

где m – необходимое количество маршрутов для организации транспортного обслуживания на территории города, ед.; N – количество жителей города, чел.; S – площадь города, км²; O – количество остановочных пунктов на территории города, ед.; I – коэффициент пересадочности; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты.

Для определения оптимального количества маршрутов необходимо рассчитать универсальные значения коэффициентов k_1, k_2, k_3 . На основе существующих параметров территории и маршрутной сети решим следующую систему линейных алгебраических уравнений относительно k_1, k_2, k_3 :

$$\begin{cases} \frac{N_1}{I_1} k_1 + \frac{S_1}{I_1} k_2 + \frac{O_1}{I_1} k_3 = m_1 \\ \frac{N_2}{I_2} k_1 + \frac{S_2}{I_2} k_2 + \frac{O_2}{I_2} k_3 = m_2 \\ \dots \\ \frac{N_j}{I_j} k_1 + \frac{S_j}{I_j} k_2 + \frac{O_j}{I_j} k_3 = m_j \end{cases}, \quad (5)$$

где m_j – необходимое количество маршрутов для организации транспортного обслуживания на территории города o , ед.; N_j – количество жителей города j , чел.; S_j – площадь города j , км²; O_j – количество остановочных пунктов на территории города j , ед.; I_j – коэффициент пересадочности в городе j ; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты.

Система (5) может быть решена относительно неизвестных переменных k_1, k_2, k_3 как с натуральными значениями N_j, S_j, O_j, I_j , так и с использованием их отнормированных значений. Так как переменных в системе три (коэффициенты k_1, k_2, k_3), то для аналитического решения достаточно трех уравнений. Однако при решении системы уравнений с реальными показателями в большинстве случаев система уравнений оказывается несовместной, то есть не имеющей аналитического точного решения.

Поэтому задача решена численными методами. При решении системы уравнений допускалось отклонение полученных значений параметра m_j (количество маршрутов) от реальных значений.

Для расчета значений коэффициентов на основе данных, предоставленных ООО «Агентство дорожной информации РАДАР», рассмотрим существующие параметры территории и маршрутной сети для некоторых городов (таблица 1).

В результате численного решения системы линейных алгебраических уравнений, составленных с реальными значениями параметров, получены следующие значения коэффициентов: $k_1 = 0,156$, $k_2 = 0,729$, $k_3 = 0,375$. При сравнении получившегося количества

Таблица 1

Город	Маршруты, кол-во	Коэфф. пересадочности	Население, тыс. чел.	S , км ²	Остановочные пункты, кол-во
Улан-Удэ	54	1,16	438	366	777
Пермь	84	1,30	1050	803	1218
Березники	35	1,10	137	429	243
Архангельск	32	1,15	350	294	430
Северодвинск	21	1,10	160	121	250

маршрутов с реальными значениями можно увидеть, что отклонение не превышает 10 %. И чем крупнее город, тем меньше отклонение.

Реальные значения количества маршрутов в указанных городах и расчетные значения, образованные на основе параметров численности населения, площади и количества остановочных пунктов с полученными значениями коэффициентов представлены в таблице 2.

При поиске зависимости между этими показателями были использованы фактические значения коэффициента пересадочности. Выстраивая новую маршрутную сеть с определением необходимого количества маршрутов, можно задавать произвольное значение коэффициента пересадочности. При его увеличении оптимальное количество маршрутов будет уменьшаться, при уменьшении коэффициента пересадочности увеличиваться.

После определения оптимального количества маршрутов перейдем к их построению.

Для построения маршрутов необходимы координаты остановок, матрица корреспонденций, матрица затрат (по воздушным линиям или по реальной сети), матрица парности остановок.

При построении маршрутной сети используется ряд допущений. Так, маршруты строятся без учета улично-дорожной сети, по прямым отрезкам между остановками, с учетом матрицы корреспонденций между остановками.

Маршруты начинаются на остановках, имеющих отстойно-разворотные площадки (конечные остановки в существующей маршрутной сети).

Выбор второй и последующих остановочных пунктов происходит по следующему алгоритму.

1. Находим все активные остановочные пункты в радиусе 500 м; если в нем нет активных остановочных пунктов, то увеличиваем радиус на 200 м ($R_{\max} = 5000$ м).

2. Вычисляется пассажиропоток на участке маршрута с учетом поочередного добавления всех остановочных пунктов. Подсчет пассажиропотока при прокладке каждого маршрута можно представить в виде поездки виртуального транспортного средства по прокладываемому маршруту. Суммарный пассажиропоток в салоне такого ТС состоит только из попутных корреспонденций, как это и происходит в реальности. Пассажиропоток составляют только те корреспонденции, цель которых – остановки по пути следования в активной зоне. Корреспонденции, цель которых не соответствует движению виртуального ТС, вычитаются из пассажиропотока.

3. В маршрут добавляется остановочный пункт, до которого пассажиропоток корреспонденций маршрута максимален.

4. Остановочные пункты, для которых увеличилось расстояние от предыдущего остановочного пункта до нового, становятся неактивными; это нужно,

Таблица 2

Сравнение реального количества маршрутов и расчетного количества маршрутов

Город	Реальное кол-во маршрутов, ед.	Расчетное оптимальное кол-во маршрутов, ед.
Улан-Удэ	54	52
Пермь	84	89
Березники	35	37
Архангельск	32	36
Северодвинск	21	19

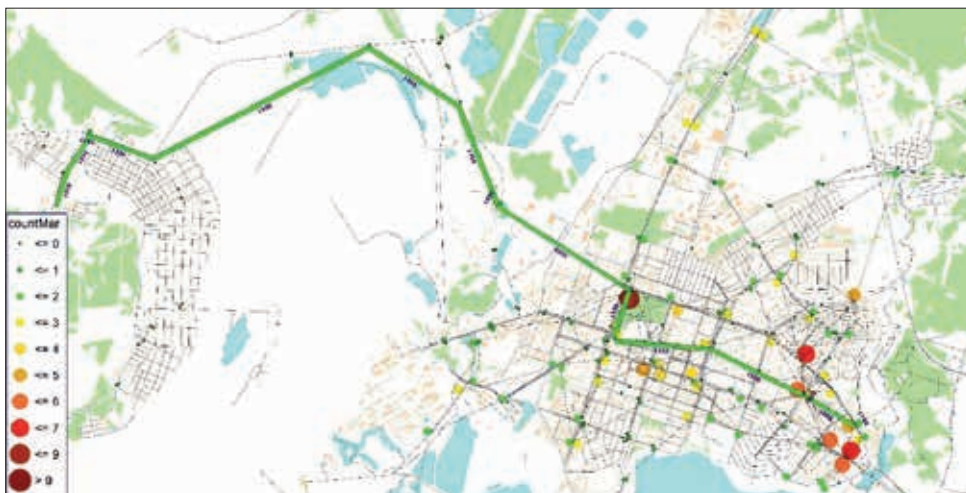


Рис. 1. Пример сгенерированного маршрута для г. Березники

чтобы маршрут не разворачивался в обратную сторону и был более прямолинейным.

Для каждой остановки из набора потенциальных остановок оцениваются корреспонденции, следующие из предыдущей остановки. Из всех корреспонденций берутся только те, расстояние от конечных точек которых до рассматриваемой потенциальной (второй) остановки меньше, чем до первой.

В основе алгоритма лежит выбор последующих остановок таким образом, чтобы минимизировать затраты при следовании до конечных точек транспортных корреспонденций, начинающихся из предыдущих остановок. Каждая следующая остановка выбирается с учетом максимизации пассажиропотока на участке маршрута до нее. Заканчиваются построенные маршруты, когда достигают предельной длины или если нет активных остановок в радиусе их поиска.

В качестве примера автоматизированного построения маршрутной сети рассмотрим г. Березники (рис. 1)*.

Весь начальный набор маршрутов строится аналогично с помощью

программного продукта RouteNet. Далее необходимо оптимизировать существующий набор маршрутов по некоему целевому критерию с учетом действующих ограничений в поле транспортного предложения. В самом простом случае целевой функцией может являться минимизация затрат времени пассажиров. В общем случае целевая функция может быть расширена, в частности, в состав целевой функции может быть добавлено условие минимизации количества непереvezенных пассажиров в результате сформированной маршрутной сети либо задача максимизации общего объема перевозок пассажиров для цели максимального удовлетворения транспортных потребностей всех жителей городов, количество пересадок и другие параметры маршрутной сети.

Ограничивает оптимизационную задачу экономическая эффективность использования провозной способности сети регулярных перевозок (количество пассажиров или транспортная работа подвижного состава).

Рассмотрим постановку задачи для целевой функции – минимизации суммарных затрат времени пассажиров

* Рассматривается задача первичного построения маршрутов в поле транспортного спроса без учета существующего состояния маршрутной сети города.

городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП) на перемещения:

$$F_r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot t_{ijr} =$$

$$= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot (t_{ijr}^{TC} + k_{jr} \cdot t^{пер}) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где F_r – целевая функция, суммарные затраты времени пассажиров ГПТОП на перемещения для набора маршрутов r , мин; x_{ij} – значение матрицы корреспонденций между остановками i и j , чел./сут; t_{ijr} – время поездки на ГПТОП между остановками i и j для набора маршрутов r , мин; t_{ijr}^{TC} – время поездки внутри подвижного состава ГПТОП между остановками i и j для набора маршрутов r , мин; $t^{пер}$ – среднее время, затрачиваемое на одну пересадку, мин; k_{jr} – количество пересадок при реализации корреспонденции из остановки i в остановку j для набора маршрутов r , ед.; i, j – порядковый номер остановки.

Эта задача решается с помощью генетических алгоритмов. При реализации генетических алгоритмов оптимум

целевой функции достигается за счет итерационного применения к сформированному первичному набору маршрутов генетических операторов (рис. 2).

Реализация описанного генетического алгоритма выполнена в программном продукте RouteNet. После применения к текущей популяции генетических операторов формируется новое поколение, для которого производится расчет значения фитнес-функции и проверяется условие сходимости алгоритма. Если условие не выполняется, алгоритм итерационно применяется к новому поколению.

Итак, представлен универсальный алгоритм построения эффективной маршрутной сети крупного города. В результате работы данного алгоритма формируется модель транспортного спроса пассажиров транспорта общего пользования в конкретном городе, строится первичная генерация маршрутов городского пассажирского транспорта для различных систем транспорта. В последующем запускается алгоритм оптимизации набора маршрутов и формируется эффективная маршрутная сеть транспорта общего пользования в поле транспортного спроса.

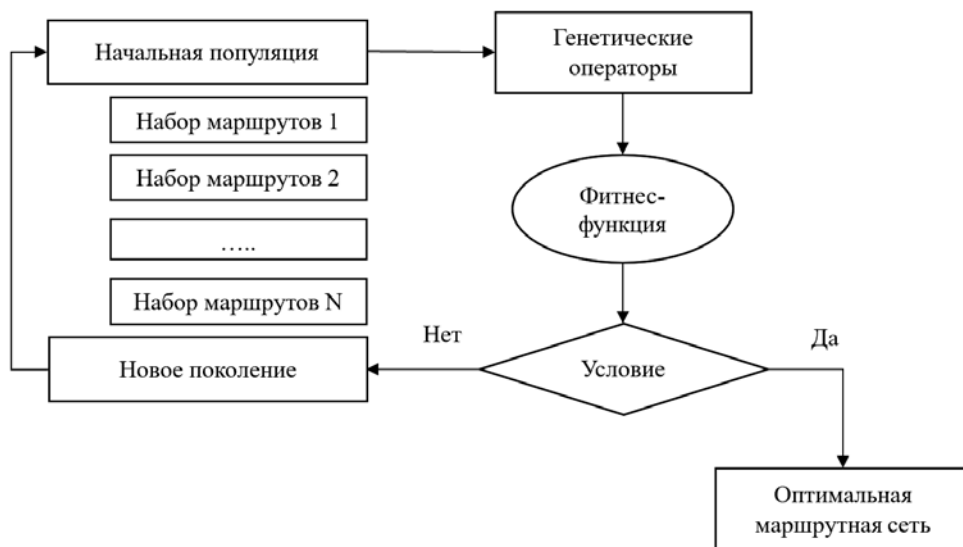


Рис. 2. Генетический алгоритм

По результатам последовательного решения задачи первичного построения маршрутов и последующей их оптимизации можно сформировать

универсальный алгоритм построения эффективной маршрутной сети крупного города. ■

Литература

1. Трофименко Ю. В., Якимов М. Р. Транспортное планирование : формирование эффективных транспортных систем крупных городов : монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – Пермь : Агентство РАДАР, 2022. – 536 с. ISBN 978-5-60484-010-8.
2. Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов. М. : Логос, 2013, 188 с. ISBN 978-5-98704-729-3.
3. Якимов М. Р. Общий алгоритм работы четырехшаговой транспортной модели // Вестник Иркутского государственного технического университета 2011 № 1 (48). С. 132–138. ISSN 1814-3520.
4. Fan W., Machemehl R. Optimal transit route network design problem: algorithms, implementations, and numerical results. URL: <https://trid.trb.org/view/698260> (accessed: 1.09.2022).
5. Borndörfer, R., Grötschel, M., Pfetsch, M. E. A path-based model for line planning in public transport. URL: https://opus4.kobv.de/opus4-zib/files/852/ZR_05_18.orig.Vers.pdf (accessed: 1.09.2022).
6. Desaulniers G., Hickman M. Public transit // Handbooks in Operation Research and Management Science. – 2017. – P. 69–120. ISSN 2347-5943.
7. Yakimov M. Optimal Models used to Provide Urban Transport Systems Efficiency and Safety // Transportation Research Procedia. – Vol. 20: 12th International Conference Organization and Traffic Safety Management in large cities, SPbOTSIC-2016, 28–30 September 2016, St. Petersburg, Russia. – 2017. – P. 702–708. ISSN 2352-1457.
8. Guan J. F., Yang H., Wirasinghe S. C. Simultaneous optimization of transit line configuration and passenger line assignment // Transportation Research Part B 40 (10). – 2003. – P. 885–902. ISSN 0191-2615.

List of references

1. Trofimenko Yu. V., Yakimov M. R. Transport planning: formation of efficient transport systems of large cities : monograph. – 2nd ed., reprinted and enlarged– Perm : RADAR Agency [Transportnoe planirovanie : formirovanie ehffektivnykh transportnykh sistem krupnykh gorodov : monografiya. – 2-e izd., pererabotannoe i dopolnennoe – Perm' : Agentstvo RADAR], 2022. – 536 p. ISBN 978-5-60484-010-8.
2. Yakimov M. R. Transport planning: creation of transport models of cities. M. : Logos [Transportnoe planirovanie: sozdanie transportnykh modelej gorodov. M. : Logos], 2013, 188 p. ISBN 978-5-98704-729-3.
3. Yakimov M. R. General algorithm of operation of a four-step transport model // Bulletin of Irkutsk State Technical University [Obshhij algoritm raboty chetyrehshagovoy transportnoj modeli // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta] 2011. № 1 (48). Pp. 132–138. ISSN 1814-3520.
4. Fan W., Machemehl R. Optimal transit route network design problem: algorithms, implementations, and numerical results. URL: <https://trid.trb.org/view/698260> (accessed: 1.09.2022).
5. Borndörfer, R., Grötschel, M., Pfetsch, M. E. A path-based model for line planning in public transport. URL: https://opus4.kobv.de/opus4-zib/files/852/ZR_05_18.orig.Vers.pdf (accessed: 1.09.2022).
6. Desaulniers G., Hickman M. Public transit // Handbooks in Operation Research and Management Science. – 2017. – P. 69–120. ISSN 2347-5943.
7. Yakimov M. Optimal Models used to Provide Urban Transport Systems Efficiency and Safety // Transportation Research Procedia. – Vol. 20: 12th International Conference Organization and Traffic Safety Management in large cities, SPbOTSIC-2016, 28–30 September 2016, St. Petersburg, Russia. – 2017. – P. 702–708. ISSN 2352-1457.
8. Guan J. F., Yang H., Wirasinghe S. C. Simultaneous optimization of transit line configuration and passenger line assignment // Transportation Research Part B 40 (10). – 2003. – P. 885–902. ISSN 0191-2615.

Статья сдана в редакцию 2 сентября 2022 года

Безопасность жизнедеятельности

УДК 621.31

А. Р. Закирова

Методология оценки риска получения электротехническим персоналом профессиональных заболеваний, вызванных воздействием магнитных полей

UDC 621.31

A. R. Zakirova

Methodology for assessing the risk for electrotechnical personnel to get occupational diseases caused by exposure to magnetic fields

Аннотация

Представлена разработка методологии оценки риска возникновения у электротехнического персонала профессионального заболевания, вызванного воздействием магнитных полей. Приведен анализ нормативных документов в области охраны труда, касающихся, в частности, оценки риска. Статья написана с учетом показателей и критериев оценки профессиональных рисков. Представлена методология оценки риска для случаев, когда на рабочих местах электротехнического персонала присутствуют источники магнитных полей, вредно влияющие на здоровье человека. Разработано логическое

дерево событий, связанных с наличием на рабочих местах высоких уровней магнитных полей. Расписаны основные этапы проведения порядка оценки профессиональных рисков. Приведены критерии рисков и соответствующая классификация условий труда. Для снижения уровня профессионального риска предложены организационно-технические мероприятия. Материалы статьи можно использовать для определения профессионального риска по событию «опасность, связанная с воздействием на персонал магнитных полей», а также для установления организацией более высоких требований по безопасности и охране труда.

Ключевые слова: оценка риска, электротехнический персонал, профзаболеваемость, охрана труда, выявление опасностей, магнитные поля.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-114-122

Abstract

The development of methodology for assessing the risk of occupational diseases of electrical engineering personnel caused by the action of magnetic fields is presented. The analysis of regulatory documents in the field of labor protection, concerning, in particular, risk assessment, is given. The article is written with consideration of indicators and criteria for

Статья рекомендована к публикации О. Р. Ильясовым, д-ром биол. наук, профессором кафедры «Техносферная безопасность» УрГУПС. E-mail: OIlyasov@usurt.ru.

Альфья Резавановна Закирова, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: AZakirova@usurt.ru. ORCID 0000-0001-6399-8902.

© А. Р. Закирова, 2022

The article is recommended for publishing O. R. Ilyasov, Dr. Biologist. Sciences, Professor of the Department of Technosphere Security, UrGUPS. E-mail: OIlyasov@usurt.ru.

Alfiya Rezavanovna Zakirova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; «Technospheric Safety» Department of the Ural State University of Railway Transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: AZakirova@usurt.ru. ORCID 0000-0001-6399-8902.

© A. R. Zakirova, 2022

assessing professional risks. The methodology of risk assessment is presented for cases when there are sources of magnetic fields at the workplaces of electrical engineering personnel which adversely affect human health. A logical tree of events related to high levels of magnetic fields at the workplace has been developed. The main stages of the procedure for assessing pro-

fessional risks are described. The risk criteria and corresponding classification of working conditions are given. Organizational and technical measures are proposed to reduce the level of occupational risk. The materials of the article can be used to determine the occupational risk of the event «danger associated with exposure to magnetic fields on personnel», as well

as to establish higher requirements for occupational safety by the organization.

Keywords: risk assessment, electrical engineering personnel, occupational diseases, occupational safety, identification of hazards, magnetic fields.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-114-122

В 2021 г. вступили в силу новые Правила по охране труда, которые заменили более сотни действовавших ранее нормативных документов. Для работодателей появились новые права и обязанности, в том числе проведение оценки профессиональных рисков с выявлением опасностей и их контролем. В ст. 212 ТК [1] определены требования к проведению оценки рисков, порядок приведен в п. 5 приказа Минтруда № 776н [2].

В статье рассматриваются профессиональные риски получения электротехническим персоналом заболеваний, вызванных воздействием магнитных полей. Единого метода оценки профессиональных рисков нет, поэтому работодателю необходимо выбрать один из существующих (анализ контрольных листов, оценка причинно-следственных связей, матричный метод на основе балльной оценки, анализ «галстук-бабочка», анализ «дерево решений», метод технического обслуживания, анализ опасности и критических контрольных точек, исследование HAZOP, структурированный метод SWIFT, метод анализа влияния человеческого фактора) или разработать свой.

Рекомендации по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков содержат критерии, которыми работодателю рекомендуется руководствоваться при выборе методов, краткое описание применяемых в РФ и зарубежной практике методов оценки уровней

профессиональных рисков, порядок определения основных показателей профессиональных рисков [3].

Основные этапы проведения оценки профессиональных рисков приведены на рис. 1.

Оценка профессиональных рисков: выявление опасностей, составление реестра, идентификация и оценка рисков, расчет вероятности наступления заболеваний, разработка плана мероприятий по контролю, устранению или снижению рисков, подготовку отчета о проделанной работе.

Для выявления опасностей требуется определить все источники и ситуации, при которых на персонал воздействуют вредные производственные факторы, в частности, магнитные поля. Для этого проводят осмотр рабочих мест, анализируют имеющуюся документацию (нормативные правовые акты, локальные нормативные документы по охране труда, техническую документацию,

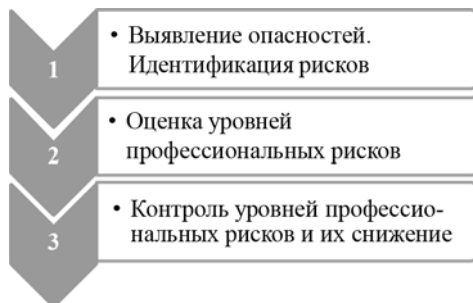


Рис. 1

используемую при проектировании, изготовлении и эксплуатации каких-либо технических объектов, протоколы производственного контроля за соблюдением санитарных правил, карты специальной оценки условий труда, материалы расследования профессиональных заболеваний, результаты периодических медицинских осмотров, предписания федеральных органов исполнительной власти).

После выявления опасностей формируется реестр опасностей (таблица 1)*.

В данном случае мерой риска на рабочих местах электротехнического персонала, связанного с обслуживанием

электроустановок, является класс условий труда. Анализ карт специальной оценки проводится по фактору «неионизирующие электромагнитные поля», для которого в России установлены четыре класса условий труда: с класса 2 (допустимый) до 3.3 (вредный).

Например, при отнесении рабочего места к классу 2 (допустимому) условий труда риск наступления профессионального заболевания пренебрежимо мал. Это означает, что меры по снижению уровня профессионального риска не требуются (таблица 2), но необходим контроль уровней магнитных полей.

Таблица 1

Реестр опасностей, определяемых через классы условий труда

№ рабочего места	Источник опасности	Ситуации, при которых возникают опасности	Класс условий труда по фактору «неионизирующие электромагнитные поля»	Риск
1	Электроустановки постоянного тока	Эксплуатация электроустановок постоянного тока. Опасность, связанная с воздействием на персонал постоянного магнитного поля	Допустимый – 2	Пренебрежимо малый
			Вредный – 3.1	Малый
			Вредный – 3.2	Средний
2	Электроустановки, работающие на переменном токе (50 Гц)	Обслуживание электроустановок промышленной частоты. Опасность, связанная с воздействием на персонал магнитного поля промышленной частоты	Допустимый – 2	Пренебрежимо малый
			Вредный – 3.1	Малый
			Вредный – 3.2	Средний
			Вредный – 3.3	Высокий

Таблица 2

Класс условий труда	Риск	Срочность мероприятий по снижению риска
Допустимый – 2	Пренебрежимо малый	Меры не требуются, но уязвимые лица нуждаются в дополнительной защите
Вредный – 3.1	Малый	Требуются меры по снижению риска
Вредный – 3.2	Средний	Требуются меры по снижению риска в установленные сроки
Вредный – 3.3	Высокий	Требуются неотложные меры по снижению риска

* В статье приведена оценка риска получения электротехническим персоналом профессионального заболевания только от магнитных полей, другие вредные производственные факторы не рассматриваются.

При отнесении рабочего места к классу 2 условий труда уязвимые лица нуждаются в дополнительной защите. Уязвимые лица – это несовершеннолетние дети и инвалиды. По медицинским показаниям беременные женщины и кормящие матери не могут работать в электроустановках.

Для контроля магнитных полей (МП) на рабочих местах электротехнического персонала необходимы технические средства. Особенно это актуально, когда электроустановки работают в разных режимах, при этом в течение рабочей смены меняется величина тока (возрастает и убывает), соответственно, изменяется и уровень напряженности магнитного поля. Для контроля уровней магнитных полей постоянного и переменного токов применяются следующие способы и устройства систем защиты: контроль МП электроустановок переменного тока и устройство для его осуществления, контроль напряженности МП по приведенным

уровням высших гармонических составляющих переменного тока и устройство для его осуществления, устройство для контроля напряженности МП переменного и постоянного токов.

Для определения условной вероятности вредного воздействия магнитных полей на электротехнический персонал разработано логическое дерево событий (рис. 2). Построение дерева событий начинаем с выбора начального события. Определяются источники магнитных полей и опасные события, связанные с этим производственным фактором.

В соответствии с логическим деревом событий, условная вероятность вредного воздействия магнитных полей на персонал без использования контрольных средств:

$$\tilde{p}_{\text{ч2}} = \tilde{p}_1 \cdot \tilde{p}_{r1} \cdot \tilde{p}_{n1} \cdot \tilde{p}_{c2}, \quad (1)$$

где \tilde{p}_1 – вероятность наличия тока в сети выше 1000 А; \tilde{p}_{r1} – вероятность нахождения персонала на расстоянии

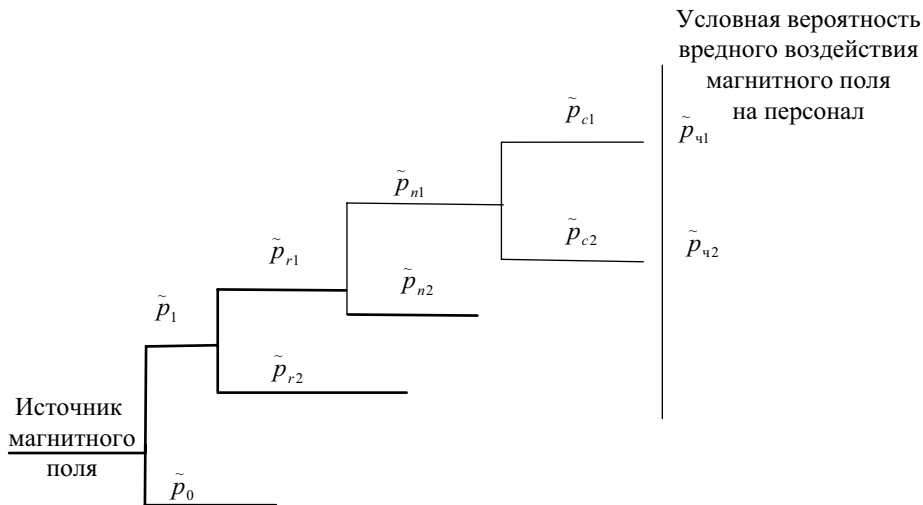


Рис. 2

\tilde{p}_1 – вероятность наличия тока в сети выше 1000 А; \tilde{p}_0 – вероятность наличия тока в сети до 1000 А; \tilde{p}_{r1} – вероятность нахождения персонала на расстоянии до источника менее 0,5 м; \tilde{p}_{r2} – вероятность нахождения персонала на расстоянии до источника более 0,5 м; \tilde{p}_{n1} – вероятность пребывания персонала в зоне влияния магнитного поля; \tilde{p}_{n2} – вероятность пребывания персонала не в зоне влияния магнитного поля; \tilde{p}_{c1} – вероятность того, что сигнализатор сработает; \tilde{p}_{c2} – вероятность того, что сигнализатор не сработает или он не используется

до источника менее 0,5 м; \tilde{p}_{n1} – вероятность пребывания персонала в зоне влияния магнитного поля; \tilde{p}_{c2} – вероятность того, что сигнализатор не срабатывает или он не используется.

Условная вероятность вредного воздействия магнитных полей на персонал при использовании сигнализатора магнитных полей:

$$\tilde{p}_{c1} = \tilde{p}_1 \cdot \tilde{p}_{r1} \cdot \tilde{p}_{n1} \cdot \tilde{p}_{c1}, \quad (2)$$

где \tilde{p}_1 – вероятность наличия тока в сети выше 1000 А; \tilde{p}_{r1} – вероятность нахождения персонала на расстоянии до источника менее 0,5 м; \tilde{p}_{n1} – вероятность пребывания персонала в зоне влияния магнитного поля; \tilde{p}_{c1} – вероятность того, что сигнализатор срабатывает.

Так как начальным событием является опасность, связанная с воздействием на персонал магнитных полей, необходимо рассмотреть, от каких параметров изменяется её уровень. Уровень магнитных полей зависит от технических характеристик электроустановок (например, величины электрического тока), расстояния от источника до персонала (чем оно меньше, тем выше уровень магнитных полей), продолжительности экспозиции (чем больше персонал находится под воздействием данного производственного фактора, тем меньше его предельно допустимый уровень) [5].

Приведенный метод логических деревьев событий включает определение возможных первичных сценариев возникновения МП вблизи электроустановок и развитие событий воздействия его на персонал. Под первичным сценарием понимается событие возникновения МП в зависимости от величины тока, частоты переменного тока электроустановок и расстояния до них с момента наличия МП и до его минимизации или контроля (использование устройства для контроля МП), а также условные вероятности воздействия уровней МП на персонал с учетом продолжительности (времени) воздействия для МП.

По результатам медицинских осмотров электротехнического персонала можно определить риск наступления профессионального заболевания, вызванного воздействием МП.

Работодатель направляет работников на обязательные медицинские осмотры [6]. При наличии на рабочих местах неионизирующего излучения периодичность медицинских осмотров составляет один раз в два года, работнику выдается паспорт здоровья и рекомендации по профилактике заболеваний. Персонал, имеющий заключение о предварительном диагнозе «профессиональное заболевание», направляется в центр профпатологии. К профессиональным заболеваниям, вызванным воздействием неионизирующего излучения (электромагнитного поля), относят выраженные расстройства вегетативной нервной системы [7]. При выявлении в организации профессиональных заболеваний необходимо рассчитать индекс профзаболеваний [8].

Даже если при медицинском осмотре не выявлено профессиональных заболеваний, риск заболеваемости персонала все равно сохраняется. Поэтому необходимо проанализировать результаты периодических медицинских осмотров для определения риска профессионального заболевания от воздействия магнитных полей.

Для исследования предлагается использовать макет, приведенный в таблице 3.

Таблица 3
Макет таблицы для проведения исследований

Группа	Фактор риска «магнитное поле»	
	есть	нет
Основная	<i>a</i>	<i>b</i>
Контрольная	<i>c</i>	<i>d</i>

В нашем случае больничные листы персонала организации необходимо разделить на основную и контрольную группы. В основную группу должны входить больничные листы

Таблица 4

Значение RR	Оценка
Меньше 1	Нет риска профессионального заболевания
Равно 1	Связь между фактором и болезнью отсутствует
Больше 1	Фактор риска, приводящий к профессиональной заболеваемости

электротехнического персонала, подвергающегося воздействию магнитных полей. В контрольную – персонала, не подвергающегося этому воздействию. При этом рассматриваются только те заболевания, которые возникают под влиянием магнитных полей.

Определение относительного риска (RR):

$$RR = \frac{a / (a + b)}{c / (c + d)}, \quad (3)$$

где a – число лиц, подвергавшихся воздействию магнитных полей и имеющих больничные листы с заболеванием, вызванным их воздействием; b – число лиц, подвергавшихся воздействию магнитных полей и не имеющих сопутствующих заболеваний; c – число лиц, не подвергавшихся воздействию магнитных полей и имеющих больничные листы с заболеванием, вызванным воздействием магнитных полей; d – число лиц, не подвергавшихся воздействию магнитных полей и не имеющих сопутствующих заболеваний.

Результат RR интерпретируют в соответствии с данными таблицы 4.

В исследовании рассчитывают риск заболеваемости персонала при наличии или отсутствии факторов риска, при этом этиологическая доля указывает на удельный вес случаев заболеваний от изучаемого фактора риска и рассчитывается следующим образом:

$$EF = \frac{RR - 1}{RR} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Классификация профессиональной обусловленности нарушений здоровья в зависимости от RR и этиологической доли (EF) приведена в таблице 5.

Далее реестр опасностей необходимо обработать и определить возможный ущерб при наступлении данного события.

Экономический ущерб от профессиональной заболеваемости выражается в потере прибыли предприятия в результате профзаболеваний работников, увеличении страховых взносов на обязательное социальное страхование персонала от профзаболеваний (если работодатель не создает безопасные условия труда в организации, то страховые взносы он оплачивает в повышенном размере за счет увеличения

Таблица 5

Степень профессиональной обусловленности нарушений здоровья персонала

RR ≤ 1	1 < RR ≤ 1,5	1,5 < RR ≤ 2	2 < RR ≤ 3,2	3,2 < RR ≤ 5	RR > 5
EF = 0	EF < 33 %	EF = 33–50 %	EF = 51–66 %	EF = 67–80 %	EF = 81–100 %
Нулевая	Малая	Средняя	Высокая	Очень высокая	Почти полная
Общие заболевания	Профессионально обусловленные заболевания				Профзаболевания

установленной надбавки), затратах на улучшение условий труда, расходах на реабилитацию и компенсацию утраченного персоналом здоровья.

После проведенного анализа необходимо разработать организационно-технические и лечебно-профилактические мероприятия. При опасном событии – воздействии магнитных полей на персонал – можно предложить сократить время экспозиции на персонал (защита временем), дистанционное управление технологическим процессом, расположение постоянных рабочих мест за пределами зон, в которых присутствуют магнитные поля (защита расстоянием).

Для контроля уровней магнитных полей применяют способы и устройства системы защиты [9–10]. Для предупреждения профзаболеваний проводят лечебные и оздоровительные мероприятия.

Выводы

Представленная методология направлена на предупреждение и профилактику опасностей, проведение оценки профессиональных рисков на рабочих местах электротехнического персонала. Определив риски, можно оценить связь между фактором риска и возникновением профзаболеваний. Предложенное логическое дерево событий может использоваться при расчете риска для комплексной оценки системы охраны труда производственных объектов. В организации должны быть предусмотрены меры, обеспечивающие постоянный контроль магнитных полей разного рода тока, для этого предложены технические устройства. Реализация разработанных организационно-технических мероприятий позволит не только снизить уровень заболеваемости, но и повысить уровень безопасности в организации. ■

Литература

1. ТК РФ. № 197-ФЗ. <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&ts=udCKd8TGym1ROyUX2&cacheid=7B5367280A8416A29F224ADEEF64961D&mode=splus&base=LAW&n=389182#v9aMd8TxieBu6WcR> (дата обращения: 11.06.22).
2. Приказ Минтруда России от 29.10.2021 № 776н «Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда» <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&ts=udCKd8TGym1ROyUX2&cacheid=909A4DA4D924B4F03FED1DFCE82C1B74&mode=splus&base=LAW&n=403335#ksyLd8TsJNxNB9Gr> (дата обращения: 10.05.22).
3. Приказ Минтруда России от 28.12.2021 № 926 «Об утверждении Рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков» <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&ts=udCKd8TGym1ROyUX2&cacheid=77AB94B3F0CE32B01DD2AB8325821045&mode=splus&base=LAW&n=406016#x53Ld8TAN1gOpZh61> (дата обращения: 08.04.22).
4. Р 2.2.1766-03. Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки. М. : Минздрав РФ. 2004. – 17 с.
5. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (вместе с «СанПиН 1.2.3685-21. Санитарные правила и нормы...») URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&ts=udCKd8TGym1ROyUX2&cacheid=11198D3D4BFAB65D3F6FFBE32424458C&mode=splus&base=LAW&n=375839#LJHKd8TG5ApdE8Hl> (дата обращения: 25.04.22).
6. Приказ Минздрава России от 28.01.2021 N 29н (ред. от 01.02.2022) «Об утверждении Порядка проведения обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров работников, предусмотренных частью четвертой статьи 213 Трудового кодекса Российской Федерации, перечня медицинских противопоказаний к осуществлению работ с вредными и (или) опасными производственными факторами, а также работам, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры» URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?re>

- q=doc&ts=p5XJd8TVPsgP38m6&cacheid=A9557DD8FEF1098E9D038EA28382EB22&m
ode=splus&base=LAW&n=409057#ANYJd8TcSMObyueH1 (дата обращения: 20.05.22).
7. Приказ Минздравсоцразвития России от 27.04.2012 № 417н «Об утверждении перечня профессиональных заболеваний» URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129943/? (дата обращения: 12.05.22).
 8. Федорович Г. В. Профессиональный риск: количественная оценка и управление // Безопасность и охрана труда. – 2012. – № 1. – С. 60–64.
 9. Закирова А. Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей : монография. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2017. – 188 с. ISBN 978-5-94614-428-5.
 10. Закирова А. Р., Кузнецов, К. Б. Оценка электромагнитной обстановки и вероятности возникновения профессионально обусловленного заболевания // Вестник УрГУПС. – 2014. – № 4 (24). – С. 82–89. ISSN 2079-0392.

List of references

1. The Labor Code of the Russian Federation [Trudovoj Kodeks Rossijskoj Federatsii]. № 197-FZ. <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&ts=udCKd8TGym1ROyUX2&cacheid=7B5367280A8416A29F224ADEEF64961D&mode=splus&base=LAW&n=389182#v9aMd8TxieBu6WcR> (accessed on: 11.06.22).
2. Order of the Ministry of Labor of the Russian Federation № 776n dated 29.10.2021 «On Approval of the Interim Regulation on the Occupational Safety Management System» [Prikaz Mintruda Rossii ot 29.10.2021 № 776n «Ob utverzhdenii Pri-mernogo polozheniya o sisteme upravleniya okhranoj truda»] <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&ts=udCKd8TGym1ROyUX2&cacheid=909A4DA4D924B4F03FED1DFCE82C1B74&mode=splus&base=LAW&n=403335#ksyLd8TsJNxNB9Gr> (accessed on: 10.05.22).
3. Order of the Ministry of Labor of the Russian Federation № 926 dated 12/28/2021 «On approval of Recommendations on the choice of methods for assessing the levels of occupational risks and on reducing the levels of such risks» [Prikaz Mintruda Rossii ot 28.12.2021 № 926 «Ob utverzhdenii Rekomendatsij po vyboru metodov otsenki urovnej professional'nykh riskov i po snizheniyu urovnej takikh riskov»] <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&ts=udCKd8TGym1ROyUX2&cacheid=77AB94B3F0CE32B01DD2AB8325821045&mode=splus&base=LAW&n=406016#x53Ld8TAN1gOpZh61> (accessed on: 08.04.22).
4. P 2.2.1766-03. Guidelines for assessing occupational health risks for employees. Organizational and methodological foundations, principles and evaluation criteria. Moscow : Ministry of Health of the Russian Federation [Rukovodstvo po otsenke professional'nogo riska dlya zdorov'ya rabotnikov. Organizatsionno-metodicheskie osnovy, printsipy i kriterii otsenki. M. : Minzdrav RF]. 2004. 17 p.
5. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation № 2 dated 28.01.2021 «On approval of sanitary rules and Norms of SanPiN 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans» (together with «SanPiN 1.2.3685-21. Sanitary rules and norms...») [Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.01.2021 № 2 «Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bez-opasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya» (vmeste s «SanPiN 1.2.3685-21. Sanitarnye pravila i normy...»)] URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&ts=udCKd8TGym1ROyUX2&cacheid=11198D3D4BFAB65D3F6FFBE32424458C&mode=splus&base=LAW&n=375839#LJHKd8TG5ApdE8Hl> (accessed on 25.04.22).
6. Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated 28.01.2021 N 29n (ed. dated 01.02.2022) «On Approval of the Procedure for Conducting Mandatory Preliminary and Periodic Medical Examinations of Employees Provided for in the Fourth Part of Article 213 of the Labor Code of the Russian Federation, the List of Medical Contraindications to Work with Harmful and (or) Dangerous Production Factors, as well as Works in which mandatory preliminary and periodic medical examinations are carried out» [Prikaz Minzdrava Rossii ot 28.01.2021 № 29n (red. ot 01.02.2022) «Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya obyazatel'nykh predvaritel'nykh i pe-riodicheskikh meditsinskikh osmotrov rabotnikov, predusmotrennykh cha-st'yu chetvertoj stat'i 213 Trudovogo kodeksa Rossijskoj Federatsii, pe-rechnya meditsinskikh protivopokazanij k osushhestvleniyu rabot s vrednymi

- i (ili) opasnymi proizvodstvennymi faktorami, a takzhe rabotam, pri vypolnenii kotorykh provodyatsya obyazatel'nye predvaritel'nye i periodicheskie meditsinskie osmotry»] URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&ts=p5XJd8TVPsgP38m6&cacheid=A9557DD8FEF1098E9D038EA28382EB22&mode=splus&base=LAW&n=409057#ANYJd8TcSMObyueH1> (accessed on: 20.05.22).
7. Order of the Ministry of Health and Social Development of Russia dated 27.04.2012 № 417n «On approval of the list of occupational diseases» [Prikaz Minzdravsotsrazvitiya Rossii ot 27.04.2012 № 417n «Ob utver-zhdenii perechnya professional'nykh zabolevaniy»] URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129943/? (accessed on: 12.05.22).
 8. Fedorovich G. V. Occupational risk: quantitative assessment and management // Safety and labor protection [Professional'nyj risk: kolichestvennaya otsenka i upravlenie // Bezopasnost' i okhrana truda]. 2012. – № 1. – С. 60–64.
 9. Zakirova A. R. Protection of electrical personnel from the harmful effects of electromagnetic fields : monograph. – Yekaterinburg : Publishing House of USURT [Zashhita ehlektrotekhnicheskogo personala ot vrednogo vozdejstviya ehlektromagnitnykh polej : monografiya. – Ekaterinburg : Izdatel'stvo UrGUPS], 2017. – 188 p. ISBN 978-5-94614-428-5.
 10. Zakirova A. R., Kuznetsov, K. B. Assessment of the electromagnetic environment and the probability of occurrence of a professionally conditioned disease // Herald of USURT [Otsenka ehlektromagnitnoj obstanovki i veroyatnosti vozniknoveniya professional'no obuslovlennogo zabolevaniya // Vestnik UrGUPS]. – 2014. – 2014. UrG – Pp. 82–89. ISSN 2079-0392.

Статья сдана в редакцию 14 июня 2022 года

Философские аспекты железнодорожного транспорта

УДК 130.2

Е. П. Пьяных

Путешествие как категория философии транспорта

UDC 130.2

E. P. P'yanih

Travelling as a category of the philosophy of transport

Аннотация

Статья посвящена проблеме путешествия как категории философии транспорта в единстве его онтологических, гносеологических, социальных и экзистенциальных характеристик.

Путешествие имеет собственную онтологию: это некое бытие, определяемое как бытие-в-пути. Путь становится путешествием через рефлексию субъекта, преодолевающего этот путь.

Путешествие обладает гносеологическим потенциалом, оно активизирует познавательную деятельность человека, рождает новые смыслы и новые ценностные установки. Путешествие представляет собой социальную ценность как средство трансформации привычных социальных ролей, разрушения стереотипов, воспитания способности к диалогу и толерантному отношению к Иному. Путешествие является

процессом не столько трансграничным, но и транскультурным. Целью, смыслом, результатом путешествия может быть не просто смена культурной картины, но всей культурной парадигмы.

Железные дороги, будучи явлением сугубо техническим, обладают известной метафизикой, которая определяет экзистенциальные трансформации путешествующих. Железнодорожная магистраль, уходящая за горизонт, символизирует некую бытийственную бесконечность, безграничность и нечеткость. Путешествие является своеобразным актом «приращения» к данной бесконечности, создает ощущение вневременности, сохраняя в то же время ощущение конечности, тупика.

Железная дорога является метафорой жизненного пути, у которого есть начальная и конечная станции, а поезд – аллегорией

движения по нему. Железнодорожная станция – метафизическая точка возврата/невозврата, разделяющая жизнь, людей и поступки. Железная дорога и путешествие по ней связывают начало и конец, конечность и бесконечность, определённую и неопределённую, движение и неподвижность,

Ключевые слова: пространство, перемещение, путь, путешествие, человек путешествующий, дорога, пути сообщения, железная дорога.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-123-137

Abstract

This article deals with the challenge of travel as a category of the philosophy of transport in the unity of its ontological, epistemological, social and existential characteristics.

Travel has its own ontology: this is a kind of beingness, defined as being-on-the-

Статья рекомендована к публикации Ю. Н. Тундыковым, д-ром философ. наук, профессором. Тел.: (343) 345-58-70.

Елена Павловна Пьяных, канд. философ. наук, доцент; кафедра «Управление персоналом и социология» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: lena.cogito@yandex.ru. ORCID 0000-0002-55-48-3076.

© Е. П. Пьяных, 2022

The article is recommended for publishing by Yu. N. Tundukov, Doctor of Philosophy Sciences, Professor. Tel.: (343) 345-58-70.

Elena Pavlovna P'yanih, Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor; «Human Resource Management and Sociology» Department, Ural State University of Railway Transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: lena.cogito@yandex.ru. ORCID 0000-0002-55-48-3076.

© E. P. P'yanih, 2022

move. A trip becomes a travel through the reflection of an individual going on the trip.

Travel has epistemological potential, it activates the cognitive activity of a person, creates new meanings and value paradigms. Travel is a social value as a means of transforming habitual social roles, destroying stereotypes, educating the ability to dialogue and tolerance towards the Otherness. The travel is not only a cross-border process, but rather a transcultural one. The purpose, meaning, and result of a travel may be not just the change of a

cultural picture, but of the entire cultural paradigm.

Railways, being a purely technical phenomenon, have a well-known metaphysics which determines the existential transformations of the travellers. A railway line going beyond the horizon symbolizes a kind of existential infinity, limitlessness and vagueness. A travel is a kind of act of «communion» to this infiniteness, creates a sense of timelessness, while at the same time maintaining a sense of finitude, a blind end.

The railway is a metaphor for a life's journey, which

has original and destination stations, and the train is an allegory of moving along it. A railway station is a metaphysical point of return/no return, separating life, people and actions. The railway and the travelling along it link together the beginning and the end, finitude and infiniteness, certainty and uncertainty, motion and immobility.

Keywords: space, transition, trip, travel, traveling person, path, communication routes, railway.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-123-137

*Путешествие, как самая великая и серьёзная наука,
помогает нам вновь обрести себя.*

A. Камю

*Travel, as the greatest science and serious science,
helps us to rediscover ourselves.*

A. Camus

Человек есть пространственно ориентированное существо, находящееся в движении. С древних времен и до наших дней пространственное перемещение человека является способом его индивидуального и коллективного существования. Как любое живое существо человек посредством передвижения осваивает окружающую среду, но, в отличие от животного, обладая осознанным чувством пространства и времени, делает это целенаправленно. Человеческое измерение движения – это путь или дорога. В физическом смысле путь – это система сообщения, по которой осуществляется передвижение. В философском смысле путь – это мифологема движения, модус человеческого бытия в совокупности всех его внутренних и внешних характеристик. Именно бытийственное значение пути как образа действия нагружает его философскими различными смыслами: «В хронотопе

пути обобщен весь список способов преодоления и обживания пространства: от бытовых форм путешествия, приключенчества, странствия и курьерства до маргинальных экстремумов ухода, отшельничества, изгойничества, бегства, изгнания, эмиграции и ссылки» [1].

Путь дает начало путешествию как способу освоения, познания, принятия, обозначения пространства. Последнее понимается в широком смысле: как пространство бытия социального, культурного, экзистенциального. Путешествие является универсальным культурным феноменом, принимавшим исторически различные формы: от кочевничества до туризма, от пеших странствий до виртуальных. Человек обречен на бытие-в-пути, он есть человек путешествующий, Homo vians, voyageur. Цифровые технологии породили новый вид кочевника: диджитал-номада, способного виртуально работать из любой точки

мира и тем самым обеспечить возможность перманентно и комфортно путешествовать.

Путешествие всегда находилось в центре внимания многих исследователей, прежде всего самих путешественников, чьи путевые дневники и заметки стали классикой и сформировали самостоятельный литературный жанр – путевую литературу (путевая проза, путевой очерк и т. п.). Научно-фантастическая и приключенческая литература также отдала дань захватывающим сюжетам. Путешествие как литературный жанр является объектом филологических и лингвистических исследований.

Существуют исследования из области психологии путешествий (особенности личности путешественника), социологии туризма как сферы бизнеса, культурологии (путешествие как форма культурной практики).

Философия путешествий как самостоятельная область исследований недостаточно развита, хотя соответствующие работы И. В. Зорина, А. Н. Ивановой, Н. В. Черепановой, Ю. В. Синеокой, Д. Н. Замятина и некоторых других содержат интересные концепты и интерпретации феномена путешествия.

Поскольку история путешествий и туризма неразрывно связана с историей развития транспортных коммуникаций, постольку путешествие – это не только объект философского анализа, но и категория философии транспорта. Последняя хоть и относительно молодая отрасль философского знания, но уже имеет собственный объект, предмет и методологию исследований. Междисциплинарный анализ транспортных коммуникаций сосредоточен не только на их технико-технологических аспектах, но уделяет большое внимание их социокультурному смыслу. Усовершенствование транспортных услуг, их доступность и комфортабельность выводят транспорт за пределы исключительно утилитарно-практического назначения, делая его средством культурного, психологического, экзистенциального

сообщения, средством получения удовольствия.

Путешествие как культурный феномен становится узлом, связывающим воедино все вышеуказанные аспекты транспорта. Именно в путешествиях люди расширяли не только географическое пространство, но и обретали опыт познания иных социокультурных и ментальных практик, расширяли границы собственной экзистенции.

Настоящая статья служит попыткой задать контуры концепта путешествия как категории философии транспорта в единстве его онтологических, гносеологических, социальных и экзистенциальных характеристик.

Актуальность философской рефлексии относительно пути и путешествия определяется трансформациями современного мира, социума и человека: современное общество, обозначаемое как общество потребления, характеризуется ростом уровня доступности и комфорта путешествий и туристических услуг; глобализация, открывшая практически безграничные возможности освоения и познания мира, лишает современного человека оседлости, превращая его в перманентного кочевника, занятого поиском новых жизненных конфигураций; возрастающее значение транспортных коммуникаций и расширение их функционального предназначения; современный *Homo vians, voyageur* не только создает и использует пути сообщения, но и меняет собственные интересы, потребности и приоритеты в зависимости от их доступности; высокая степень мобильности современного человека, его желание получить личный уникальный опыт посредством свободы выбора индивидуальной стратегии путешествия; желание выйти за пределы повседневности и рутины, давления обязательств, обязательств и проблем, чем так нагружена жизнь наших современников.

Человеческая история есть история освоения и познания пространства. Эволюция потребностей и мотивов средств передвижения обусловила приоритеты

современных *voyageurs*: колониальная экспансия прошлых веков, имевшая целью приращение ресурсов, сменилась познавательной-гедонистической, досуговой, экзистенциальной и даже протестной мотивацией. Поскольку основные утилитарно-практические мотивы пространственного перемещения реализованы, современное путешествие принимает статус «пути к себе», «самопознания», «трансцендирования», путешественник рассматривается как «эстетически воспринимающая личность», «личность с потребностью в новизне и самотрансценденции» [2].

Несмотря на распространенность, значение термина «путешествие» определяется самым различным образом. Элементарное определение гласит, что путешествие – это перемещение человека в иную местность или страну, континент, отличные от его обычного местонахождения или проживания [3]. Также существует множество синонимов данного понятия: круиз (путешествие по воде), тур, турне (путешествие с туристическими целями), поездка, странствие, паломничество (чаще всего путешествие с религиозными целями) и др.

Частным случаем путешествия служит туризм, преследующий самые различные цели (отдых, развлечение, торговля, познание, спорт и т. п.). «Туризм – это частный случай путешествия, который имеет четкие цели или совокупность целей, ограниченные по времени совершения процесса и множество иных особенных признаков. Главное отличие туризма от путешествий – это цели и массовость» [4]. По отношению к туризму путешествие является родовым понятием, более обширным по своей сути, имеющим ряд специфических признаков. Туризм, являясь отраслью экономики и сферой услуг, представляет объект маркетинговых и социологических исследований [5].

От туристической поездки путешествие отличается рядом особенностей, среди которых следует отметить высокую степень непредсказуемости

и неопределенности: человек путешествуя, в отличие от туриста, чей тур детально просчитан, не всегда знает, что там, за поворотом, изгибы траектории движения привлекают некоей тайной, составляющей саму квинтэссенцию путешествия, уникальность, заключающаяся в выборе географии и времени путешествия, а также в имманентном индивидуальном опыте, единство цели (путешественник сосредоточен на самом пути, на собственных впечатлениях, он свободен от меркантильных интересов и утилитарных потребностей), вызов повседневности и обыденности, отрешение от комфорта и бытовых мелочей, которые имеют значение при выборе тура, путешествие изначально предполагает наличие и преодоление трудностей и опасностей, сопряжено с тревожным ожиданием неизвестности и даже угроз, в отличие от туризма, который представляет собой продукт потребления и платную услугу, путешествие – это личная история, проживаемая в-пути.

Путешествие, в отличие от обычного географического перемещения, включает в себе определенную философию, раскрывающуюся через следующие аспекты: путешествие имеет собственную онтологию, это некое бытие, определяемое как бытие-в-пути; путешествие обладает гносеологическим потенциалом, оно активизирует познавательную деятельность человека, рождает новые смыслы и новые ценностные установки; путешествие представляет собой социальную ценность как средство трансформации привычных социальных ролей, разрушения стереотипов, воспитания способности к диалогу и толерантному отношению к Иному; путешествие содержит значительный экзистенциальный потенциал, подразумевающий реализацию личной свободы, переживание пограничных состояний, бытийные и мировоззренческие трансформации [6].

Путешествие можно рассматривать как способ актуализации личностных потенций и опыт постижения

действительности во многих ее аспектах, как индивидуальный проект и социокультурный тренинг, развивающий способность социальной и культурной коммуникации.

Современная культура констатирует ценность путешествия априори, делая *voyage* трендом, следование которому демонстрирует состоятельность и успешность личности.

Онтологическим (бытийственным) основанием путешествия является путь. Язык как «дом бытия» (М. Хайдеггер) фиксирует саму сущность путешествия в русском переводе: это шествие-по-пути. Понятие пути является универсальной метафорой для обозначения модулов человеческого бытия. «Путь к себе», «путь к богу», «жизненный путь», «путь домой», «путь на Голгофу», «крестный путь», «окольный путь», «путь-дорога»; эти и другие выражения выражают саму возможность быть определенным образом, двигаться от одной точки бытийственной бифуркации к другой.

Путь-лабиринт (легенда о Тесее и Минотавре) как символ трудностей, бесконечный путь (скитания Агасфера) как метафора вечности, путь как обозначение линии поведения (героический путь, нравственный путь) и многие другие образы являются несущими конструктами модели мира, истории и человеческой жизни.

В физическом смысле путь – это связь между различными точками пространства, земного, воздушного, водного или само пространство, в пределах которого производится движение. Онтологически путешествие – это пространственно-темпоральное перемещение. Однако путешествие понимается не только как смена пространственно-местоположения. «Путешествие – это движение в пространстве культуры: памяти, мифа, воображения, снов, предметов. Экзистенциальное путешествие по внутреннему пространству является одновременно и опытом персонификации истории, и попыткой самоидентификации» [7]. Онтологию путешествий подобного рода можно определить через

понятие культурного кода или паттерна, благодаря которым расшифровывается культурный и поведенческий смысл происходящего. Например, при путешествиях во времени происходит узнавание имен и событий за счет экстраполяции прошлого в будущее. В литературе описаны классические варианты путешествия по интерьеру одной комнаты [8], в памяти (А. Камю «Посторонний»), в глубинах сознания и подсознания (С. Кинг «Ловец снов»). Назвать путешествиями в географическом смысле данного понятия невозможно, такие феномены имеют, скорее, статус философского и ментального эксперимента, но имеют право на изучение.

Путь и путешествие – понятия не тождественные. Путь становится путешествием через рефлексию субъекта, преодолевающего этот путь. Показательна в этом смысле цитата из романа «В дороге» Дж. Керуака: «Вы, парни, куда-то едете, или просто едете?» [9]. «Ехать куда-то» подразумевает конкретную цель – это, скорее, история туриста. «Просто ехать» – это состояние бытия, экзистенциальная история поиска, преодоления, обретения ответов на важнейшие философские вопросы: кто мы? куда идем? на что надеемся? что нас ждет? и т. п. Путешествие – это метафора человеческой жизни и судьбы со всеми ее изгибами и поворотами. Известное выражение «вот как жизнь-то повернулась» подчеркивает непредсказуемость и извилистость человеческого пути в мире.

Путешествие – это проживание, переживание пути, придающее ему субъективный смысл. Для различных индивидов один и тот же путь может восприниматься как различный по расстоянию, темпоральности и интенсивности. Путь домой как возвращение из дальних странствий будет казаться короче и быстрее, чем путь в неизведанные края. Путь как онтологическая основа путешествия выражается не количеством единиц измерения, а интенсивностью переживаний и актуализированных ими экзистенциалов: жизнь, смерть,

свобода, одиночество, страдание, тревога, забота, страх, надежда и другие.

Таким образом, путешествие представляет собой экзистенциально окрашенный путь. Именно эта его особенность сделала путешествие сквозным жанром в искусстве всех времен и народов. Образ пути, «человека путешествующего» – странника, паломника, героя-путника – сопровождает всю человеческую культуру – от странствий мифологических персонажей до героев романа «В дороге» Дж. Керуака.

Древняя мифология содержит немало примеров описания путешествий и рефлексии относительно их смысла. Классика жанра путешествия в неведомые миры, содержащего весь его смысловой концепт, – шумеро-аккадский эпос «Сказание о Гильгамеше».

Эпос о Гильгамеше – это эпос
О все видавшем до края мира,
О познавшем моря, перешедшем
все горы,
О врагов покорившем вместе с другом,
О постигшем премудрость, о все
проникавшем:
Сокровенное видел он, тайное ведал,
Принес нам весть о днях до потопа,
В дальний путь ходил, но устал
и смирился [10].

Исследователи расходятся во мнениях о смысле, зашифрованном в данном произведении: это драматическое повествование о жизни и смерти, повествование о попытке обретения вечной жизни, гимн дружбе и другие трактовки [11]. «Да найду я жизнь, которую ищу я!» – восклицает главный герой. Путешествие-поиск порождает философское вопрошание:

Разве навеки делятся братья?
Разве навеки ненависть в людях?
Разве навеки река несет полые воды?
Стрекозой навсегда ль обернется
личинка?
Взора, что вынес бы взоры Солнца,
С давних времен еще не бывало.
Спящий и мертвый друг с другом схожи –

Не смерти ли образ они являют?
Человек ли владыка? [12].

Экзистенциальные трансформации главного героя задают не только внешний вектор путешествия, но и вектор внутренний – реализация богочеловеческой сущности – неизбежность смерти и жажда вечной жизни.

Путешествие-возвращение как основная сюжетная линия стала основой поэмы Гомера «Одиссея», а сам Одиссей – символом путешественника. Путь домой этого героя занял десять лет, на протяжении которых Одиссей претерпевает немало испытаний. Истории, в которые попадает Одиссей во время своего странствия, заставляют его проявлять различные качества – осторожность, хитрость, отвагу, рассудительность и другие. Путешествие Одиссея – яркий пример экзистенциального опыта поиска, выбора, любви и верности: «И, покинув корабль, натрудивший в морях полотно, Одиссей возвратился, пространством и временем полный» [13].

Путешествия Гильгамеша и Одиссея – это путешествия в культурно-мифологическом пространстве своего времени. Внешний (географический) и внутренний (экзистенциальный) векторы движения здесь практически неразделимы: опыт странствий – это личная история погружения в чужое пространство, преодоления собственных слабостей и страхов и в конечном счете обретения свободы и самости.

Гносеологический (познавательный) потенциал путешествия определяется как суммой знаний, так и опытом самопознания (рефлексии), получаемого в пути. Во все эпохи путешествие служило основным способом получения различных сведений: географических, этнографических, антропологических, культурных и др. Полученные знания стимулировали человеческую активность во всех направлениях.

Человеческая цивилизация, подталкиваемая развитием экономических отношений, развивалась от локальных (до эпохи великих географических

открытий) сообществ к глобальным. В Древнем мире говорить о путешествиях можно только в контексте колониальной географической экспансии, благодаря которой пополнялись экономические запасы и количество рабочей силы. В античной Греции колонизация играла важную культурную роль: путешественники-колонизаторы, заселяя новые территории, разносили собственную культуру на большие расстояния, способствуя формированию эллинской культурной общности.

Наряду с колониально-географической и военной экспансией в античное время формируются зачатки современного туризма и паломничества. В Древнем Востоке, в Египте практиковались ритуальные путешествия к святым местам, также развлекательные поездки.

В эпоху эллинизма – заката древнегреческой культуры – римляне совершали паломничество в Афины с образовательными целями вплоть до I в. н. э. Также популярностью у греков и римлян пользовался Египет, привлекавший своей архитектурой и культурой.

Практически все известные нам путешествия прошлого – это путешествия-поиски и путешествия-открытия.

Один из первых путешественников – знаменитый древнегреческий историк Геродот, описавший свои путешествия (Восток, Балканский полуостров, Малая Азия, Южная Италия) в девяти книгах [14]. Основным мотивом путешествий Геродота была любознательность. Страбон – античный историк и географ Римской Греции – во время своего многолетнего путешествия посещал достопримечательности, в том числе самые известные из них – 7 чудес света. Итогом его путешествий стала «География», носившая преимущественно описательный характер. Примечательно, что Страбон считал землеописание философской наукой, несущей пользу образованным людям.

Великие географические открытия, которыми человечество обязано целому ряду путешественников – А. Веспуччи,

Ф. Магеллану, Васко Да Гама, Х. Колумбу, Д. Ливингстону, Н. Миклухо-Маклаю, А. Никитину, Ф. Дрейку, Р. Амундсену и др., – расширили планетарный горизонт, повлияли на ход человеческой истории. Стремление к расширению жизненного пространства, хотя и стимулировалось преимущественно прикладными (хозяйственными) целями, неизбежно сопровождалась пополнением интеллектуального багажа европейской цивилизации. Параллельно преодолению географических границ происходило проникновение в иной культурный и ментальный опыт, имевшее часто довольно печальные последствия для аборигенов.

В Средние века путешествия обрели преимущественно ритуально-религиозный характер. Христианская культура Средневековья породила особый тип «человека путешествующего» – паломник или странник, обладающий определенными качествами. Паломничество к святым местам (Иерусалим, Мекка) имело целью приобщение к святости или покаяние: «Они шли пешком, с ногами, стоптанными в кровь, и ели только разрешенный хлеб с луком, запивая завтрак, обед и ужин ключевой водой» [15]. Паломничество, или странничество предполагало освобождение от собственной греховной природы, очищение и обретение через прощение всевышнего благости. Конечная цель паломника заключалась в обретении трансцендентального (выходящего за пределы рациональности) опыта, постижении трансрационального, непостижимого и таким образом обретение нового себя. Особенность путешествий такого рода – их сакрализация, что имеет место и сегодня (паломничество к гробу господню в Иерусалиме накануне православной пасхи). Итогом паломничества должно было стать особое религиозное знание-откровение, осознание, понимание и переживание присутствия бога. Путешествия по святым местам сыграли определенную роль в укреплении влияния церкви и привлекали большое число неопитов.

Образ человека-скитальца проходит через поэзию безымянных средневековых бродячих поэтов – вагантов. Один из них, известный под прозвищем Архипиит («поэт поэтов») Кельнский, в популярном стихотворении «Исповедь» находит такие образы для выражения людской сущности: «лист, что по полю гонит ветер окрестный», «извилистый ручеек проточный», «отраженье облаков изменчивых», «ладья, потерявшая кормчего» [16]. В данных метафорах запечатлена суть человеческого существования как пути земного – его текучесть, изменчивость, призрачность, непредсказуемость.

Тема странничества одна из основных и в русской культуре. Особенность российской географии, территориальная протяженность обусловили важную геополитическую особенность: история России есть история освоения пространства. Хотя, стоит отметить, что путешествия в России стали развиваться в эпоху Петра I, проводившего активную внутреннюю и внешнюю политику.

Странничество представляет собой многослойный религиозно-духовный феномен, раскрывающийся одновременно как путь к богу и путь к себе, как образ жизни и как судьба, как поиск и спасение, как символ жизненного пути:

Ведь каждый в мире странник –
Пройдёт, зайдёт и вновь оставит дом.

С. Есенин

Цель странничества – обретение и укрепление веры. Преодоление пространства становится преодолением себя, своей земной и грешной природы. Странничество становится божественным служением, искуплением, средством сотворения себя, обретения себя в боге и бога в себе.

Н. А. Бердяев, представитель экзистенциального направления в русской философии, отождествлял странничество и свободу: «Тип странника так характерен для России и так прекрасен. Странник – самый свободный человек на земле. Он ходит по земле, но стихия

его воздушная, он не врос в землю, в нем нет приземистости. Странник – свободен от «мира» и вся тяжесть земли и земной жизни свелась для него к небольшой котомке на плечах. Величие русского народа и призванность его к высшей жизни сосредоточены в типе странника. Русский тип странника нашел себе выражение не только в народной жизни, но и в жизни культурной, в жизни лучшей части интеллигенции» [17].

Чаадаев увидел в странничестве способ существования русского человека: «В домах наших мы как будто определены на постой; в семьях мы имеем вид чужестранцев; в городах мы похожи на кочевников, мы хуже кочевников, пасущих стада в наших степях, ибо те более привязаны к своим пустыням, нежели мы к нашим городам» [18].

Во все времена человек испытывает потребность в познании не только географического пространства, но и окружающего социального и культурного мира. Литература знает множество примеров путешествий социально-исследовательской направленности. Здесь необходимо выделить два аспекта: во-первых, путешествие само по себе является непосредственным социальным опытом, во-вторых, оно формирует картину социальной реальности, наблюдаемой в процессе вояжа. Как социальный опыт путешествие раскрывается в аспекте коммуникационных и культурных практик, доступных *homo vians*, в расширении или сужении социального окружения и даже накопления социального капитала. В опыте путешествия происходит «смена декораций», ролей, возникают элементы игры (фильм «Три плюс два» реж. Г. Оганисян, 1963 г.) и состязательности. Также аспектом социального опыта путешествия является непосредственное восприятие, принятие/непринятие и соответствующая оценка территорий. Опыт путешествия – это не опыт поверхностного ознакомления с набором достопримечательностей, включенным в стоимость тура. Это опыт узнавания, открытия нового даже в уже виденном и известном.

Одни и те же места человек может посетить неоднократно, в разные периоды жизни, и всякий раз это будет новый опыт, потому что это будут «другие» глаза: «...можно в те же вернуться места, но вернуться назад невозможно» (слова Ник. Новикова). Так формируется опыт самопознания (узнавания себя в ином пространстве, окружении, иных ощущениях, восприятиях и впечатлениях) и самотрансцендирования (скачок в собственном внутреннем пространстве, экзистенциальные и мировоззренческие трансформации) [19].

Путевая литература дает множество примеров описания природного и социального мира. Можно вспомнить А. Радищева, описавшего свое путешествие из Петербурга в Москву. Наблюдая по пути все грубые черты Российской империи XVIII века, «...я взглянул окрест меня – душа моя страданиями человечества уязвлена стала» [20]. Подобный пример путешествия с социальным контекстом дает и Н. Гоголь в «Мёртвых душах», обозревая глазами Чичикова российскую реальность.

В качестве примеров можно привести путевые записки маркиза Астольфа де Кюстина «Россия в 1839 году», «Письма русского путешественника» Н. Карамзина, путевые заметки А. Пушкина «Путешествие в Арзрум во время похода 1829 года», роман Л. Стерна «Сентиментальное путешествие по Франции и Италии», Дж. Г. Байрона и его поэму «Паломничество Чайльд-Гарольда» и др.

Путевая литература XX в. оставила множество российских травелогов: Россия как пространственно огромная и разнообразная страна предоставляла во все века массу возможностей для путешествий и поиска философских смыслов.

Российский философ В. Розанов в своих путевых очерках «Русский Нил» (1907), посвященных путешествию по Волге, показывает Поволжье как особую цивилизацию. «В путевом очерке Розанова находится, возможно, ключ к его главной философской максиме:

«Что делать?» – спросил нетерпеливый петербургский юноша. – Как что делать: если это лето – чистить ягоды и варить варенье; если зима – пить с этим вареньем чай». Желательно, на Волге» [21].

Вл. Арсеньев «Путешествие по Уссурийскому краю. Дерсу Узала» (1921) – «травелог по уходящей в прошлое территории», И. Эренбург «Виза Времени» – хроника европейской жизни 1920-х гг., Вл. Маяковский «Мое открытие Америки» (1925–1926) – открытие мира, «в котором все имеет цену», Ник. Рерих «Сердце Азии» (1929), И. Ильф и Е. Петров «Одноэтажная Америка» (1937), А. Битов «Уроки Армении» (1969), Ю. Сенкевич «На «Ра» через Атлантику» (1973), В. Песков «Таежный тупик» [21] и множество других путевых очерков и дневников являют собой свидетельства не только обширного географического опыта, но и социальных, культурных, духовных и философских практик, непосредственных впечатлений и открытий.

Ф. Конюхов – самый известный современный российский путешественник – в своей книге «Сила веры. 160 дней и ночей наедине с Тихим океаном» (2015) оставляет и религиозное покаяние: «Талант, дарованный мне Господом, я расточил в путешествиях. <...> Со всех сторон окружён водой, бесконечной. В этой бесконечности я вижу будущее – нестерпимую кару в судилище, и Господь явит ко мне гнев» [21].

Путевая литература позволяет составить достаточно объективную картину социальной реальности, а также передает опыт трансформации сознания путешественника под влиянием контактов с другой средой, что можно обозначить концептами «свой среди чужих» (А. Гончаров «Фрегат «Паллада»», «чужой среди своих» (Чичиков), «чужой среди чужих» (А. Радищев), «свой среди своих» (А. Пушкин «Евгений Онегин»).

Именно феномен путешествия породил жанр травелога, определяемого в том числе и как «вид литературы, изначально имеющий целью формирование коммуникаций, объединение

народов и культур, взаимопонимание несходных менталитетов» [22]. Травелогги как самостоятельный литературный жанр являются своеобразным «двойником» реального путешествия: Э. Гилберт «Есть, молиться, любить», Г. Робертс «Шантарам», Йоко Тавада «Подозрительные пассажиры твоих ночных поездов», Адриан Гилл «На все четыре стороны», Аллен де Боттон «Искусство путешествовать», Джон Кракауэр «В диких условиях» и множество других современных книг-травелогов являются не только развлечением и способом скоротать досуг, но и стимулируют стремление к свободе, узнаванию нового, расширению горизонта событий.

Путешествие является не объектом литературных описаний, но и признанным киножанром. Телевизионная программа «Клуб кинопутешествий», ведущая свое начало с 18 марта 1960-го года (ведущие В. Шнейдеров и Ю. Сенкевич), была посвящена достопримечательностям республик Советского Союза и зарубежных стран, что способствовало популяризации туризма. Современное российское телевидение продолжает традицию передач о путешествиях, среди которых трэвел-шоу «Орел и решка» и «Большой чемодан», «Мир наизнанку», «Своим ходом» и ряд других. Легкий, непринужденный и развлекательный формат таких передач, привлекая большое количество поклонников, в то же время позволяет увидеть болезненные проблемы различных стран: социальное неравенство, богатство и нищету, борьбу с преступностью и другие. Среди зарубежных программ подобного формата стоит отметить «Выжить вместе», «По дороге с Норманом Ридусом», «Кругосветное путешествие Оззи и Джека», «Поездка налегке», «Чемоданное настроение» и др.

Социальная ценность путешествия определяется тем, что оно является социальной практикой освоения пространства, «...несет на себе значительную социокультурную нагрузку (изменение социального поведения, формирование образов территорий, стремление

к самореализации и повышению качества жизни)» [23]. Оно дает обширный опыт познания и сравнения разнообразия социальных и культурных практик, определяющих образ поведения и мышления людей в различных точках земного шара. Такой опыт позволяет увидеть не только картину общества в целом, но понять и переосмыслить собственную повседневность, привычные способы коммуникаций и действий, практические механизмы решения задач и т. п.

Путешествие – процесс не столько трансграничный, но и транскультурный. Устойчивой мотивацией к перемене мест и узнаванию нового служит желание покинуть пределы обыденности и рутинного существования. Целью, смыслом, результатом путешествия может быть не просто смена «культурной картины», но всей «культурной парадигмы». Пример смены культурной парадигмы демонстрирует роман М. Уэльбека «Платформа», герои которого, отрицая ценности западной цивилизации, пытаются обрести рай на Востоке. Однако для обоих это заканчивается трагически.

Путешествие как социальный опыт – это также опыт осмысления дихотомии «свой-чужой», «Я и Иной». Путешествуя, человек сталкивается не просто с Иным, он сталкивается с Чужим, чуждым восприятию. Герои «Платформы» – французы – готовы принять неевропейскую систему ценностей, образ жизни и мысли, но трагический финал доказывает: «Запад есть Запад, Восток есть Восток, не встретиться им никогда» [24].

Деструкция иных ценностных систем и стремление насадить собственные как единственно правильные всегда сопровождала освоение планетарного пространства. Колонизация демонстрировала примеры варварского отношения к инокультурным традициям и обычаям, иным верованиям и нормам [25]. В настоящее время утверждается ценность поликультурного взаимодействия, что позволяет толерантно взаимодействовать носителям различных культур. Знакомство с иными социальными

практиками позволяет преодолеть шаблонные представления и стереотипы относительно Иного, пересмотреть границы рациональности, принять право на существование иррациональных практик (например, магические обряды архаических обществ) [26]. Таким образом, путешествие является индивидуальным опытом освоения и принятия иного социального и культурного пространства во всем его разнообразии и богатстве.

Смена архетипических представлений и стереотипов, вживание в иные культурные образы делает путешествие своеобразным метафизическим действием: на существующий статический опыт личности накладывается надличностный, трансцендентный опыт, расширяющий границы свободы, не только дополняющий, но иногда и кардинально меняющий мировоззренческие установки. Человек путешествующий, трансцендируя иной культурный опыт, формирует новую систему координат, в которой привычные модели поведения теряют свою ценность. Особенно это касается путешествий на Восток (И. Ефремов «Лезвие бритвы»).

Социальная ценность путешествия заключается также в том, что оно интерпретируется как реализация права человека на свободу передвижения (ст. 27 Конституции РФ). Соответственно, одна из задач современного государства – предоставить гражданам пользоваться данным правом, создавать условия и возможности для увеличения мобильности в условиях глобального мира.

Путешествие может рассматриваться как специфический способ человеческого бытия – экзистенции. «Дорога» становится особым экзистенциальным состоянием, суть которого – в опыте свободы и выбора, в самоидентификации, самотрансценденции. «Дорога – мой дом» (слова М. Карасева, исполнение «Би-2») как метафора смысла человеческого бытия. Суть экзистенции – в постоянном выборе возможностей, своего будущего, в поиске собственной идентичности. Путешествие принимает характер

экзистенциального события постольку, поскольку раскрывает основные атрибуты (экзистенциалы) человеческого бытия: свобода, ответственность, одиночество, страх, тревога, надежда, смерть, забота. Бытийственное проживание и экзистенциальное переживание пути-дороги является опытом самоактуализации, само моделирования. Преодоление физических пространственных границ может создать условия для перехода границ внутренних. Географическое перемещение может стать бегством-от-себя и дорогой-к-себе, как это происходит с героиней романа «Ешь, молись, люби». Роман Э. Гилберт и одноименный фильм повествуют об экзистенциальном опыте – опыте самопознания и обретения себя современной успешной женщиной, отягощенной грузом проблем, традиционных для западной цивилизации. Достижение баланса внутреннего и внешнего, души и тела, гармонии и любви явилось для нее конечной точкой и смыслом долгого путешествия. Через собственный номадический опыт, осваивая новые для нее культурные практики, героиня заново конструирует себя, обретает новую самость.

История и философия путешествий неотъемлема от истории путей сообщения, поскольку они – сухопутные, морские и воздушные – являются материальной основой любого пространственного перемещения.

Пути сообщения развивались соответственно технико-технологическим возможностям каждой эпохи, от пешеходных троп до высокоскоростных магистралей и авиалайнеров.

Древний мир располагал животной и рабской тягой, колесницами, гребными судами, санями и другими достаточно примитивными по современным меркам средствами перемещения. Существовали и колеиные дороги, предназначенные для грузовых перевозок.

Возможностью путешествовать вплоть до XIX в. располагали исключительно состоятельные люди, могущие

себе позволить лошадиную силу, повозку, караван. Бедняки путешествовали пешком. Такие путешествия (поездки) предпринимались с религиозными, деловыми, торговыми, дипломатическими, образовательными целями. Отсутствие устойчивой сети транспортных сообщений, серьезные риски и угрозы не стимулировали у большинство людей к путешествиям/странничеству.

Формирование транспортных систем и коммуникаций начинается на этапе индустриального общества. Изобретение паровой тяги в XVII в. положило начало строительству паровозов, сделало поездки возможными для большего количества населения.

К концу XIX – началу XX века железнодорожная сеть, в том числе и с электрической тягой, охватила США, Европу, Россию, что подстегнуло развитие номадической активности. «Путешествия везде, где есть рельсы» [27]. Именно бурное развитие железных дорог положило начало путешествию как удовольствию.

Железнодорожное путешествие по сравнению, например, с авиаперелетом является наиболее «философским».

Есть в обычных железных дорогах
Философия мыслей и слов –
В полустанках, в путях, в перегонах
И в вокзалах больших городов [28].

Железнодорожный вояж позволяет почувствовать, увидеть и услышать пространство, время и собственно путь, дорогу. Светофоры, станции, столбы, стук колес становятся метками путешествия. Зримость дороги наполняет сознание путешественника ощущением пространства, скорости и ритма.

Железные дороги, будучи явлением сугубо техническим, обладают определенной метафизикой, которая определяет экзистенциальные трансформации путешествующих. Во-первых, железнодорожная магистраль, уходящая за горизонт, символизирует некую бытийственную бесконечность, безграничность и неопределённость. Путешествие

становится своеобразным актом «приращения» к этой бесконечности, создает ощущение вневременности, сохраняя, в то же время, ощущение конечности, тупика.

Во-вторых, железная дорога представляется метафорой жизненного пути, у которого есть начальная и конечная станция, а поезд – аллегорией движения по нему. В то же время, в отличие от автомобиля, который проедет по бездорожью, поезд идет по строго заданному пути, следуя определенной дисциплине. В-третьих, железнодорожная станция – метафизическая точка возврата/невозврата, разделяющая жизнь, людей и поступки.

Таким образом, собственно железная дорога и путешествие по ней связывают начало и конец, конечность и бесконечность, определённую и неопределённую, движение и неподвижность,

Эти и другие метафизические и экзистенциальные особенности железнодорожного пути сделали его излюбленным сюжетом многих произведений искусства.

Необходимо отметить, что в последние годы железнодорожные путешествия в нашей стране стали пользоваться большой популярностью. Это туры собственно по России, в Европу, на Восток. Одно из самых впечатляющих – это путешествие по Транссибирской магистрали – самой длинной железной дороге в мире (9288,2 км) – займет шесть дней. За время поездки по европейской части России, Уралу, Сибири и Дальнему Востоку у пассажиров будет возможность увидеть разнообразную природу нашей большой страны [27].

Философская рефлексия относительно феномена путешествия позволяет сделать несколько основных выводов:

- 1) путешествие является стилем жизни, индивидуальным проектом, экзистенциальным опытом;
- 2) оно представляет источник знаний о самых разных аспектах реальности;
- 3) путешествие имеет социальную ценность как опыт транскультурного

проникновения, знакомства с иными социальными и культурными практиками, что способствует толерантно-му поликультурному взаимодействию;

5) развитие путей сообщения сделало путешествие увлечением, стилем жизни, страстью многих современников. ■

Литература

1. Путь // Энциклопедия культурологии. URL: <https://academic.ru/> (дата обращения: 14.06.2022).
2. Иванова А. Н. Путешественник как личность с потребностью в новизне и самотрансценденции // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 400. С. 51–58. ISSN 2311-2387 (Online), ISSN 1998-8613 (Print).
3. Толкование и значение слова «путешествие» URL: <https://ozhegov.textologia.ru/definit/puteshestvie/> (дата обращения: 14.06.2022).
4. Жигарев О. Л. Путешествие, путешественник и начало туризма URL: <https://prepod.nspu.ru/mod/page/> (дата обращения: 18.06.2022).
5. Проектирование социальных изменений в городской среде / Г. Б. Кораблева, С. Е. Вершинин, Н. Л. Антонова, С. Б. Абрамова [и др.]. – Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2016. 128 с. ISBN 978-5-7996-1670-0
6. Юшкова Т. А., Корнильцева Е. Г., Пономарева С. И. От управления вниманием к управлению эмоциями. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34480126> (дата обращения 02.08.2022).
7. Синеокая Ю. В. Путешествие как философский проект URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/puteshestvie-kak-filosofskiy-proekt/viewer> (дата обращения: 18.06.2022).
8. Синеокая Ю. В. Путешествие как философский проект URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/puteshestvie-kak-filosofskiy-proekt/viewer> (дата обращения: 18.06.2022).
9. Керуак Дж. В дороге. СПб : Азбука, Азбука-Аттикус. 2014. 384 с. ISBN 5-352-01850-4.
10. Полный текст эпоса о Гильгамеше. URL: <http://www.russianplanet.ru/filolog/epos/gilgamesh/text.htm> (дата обращения: 21.06.2022).
11. Зубов А. Человек, противостоящий Богу – эпос о Гильгамеше. URL: https://abzubov.com/new_course/lecture_060 (дата обращения: 21.06.2022).
12. Там же.
13. Золотистого меда струя – Мандельштам. URL: <https://www.culture.ru/poems/41622/zolotistogo-meda-struya> (дата обращения: 21.06.2022).
14. Путешествия в Древнем мире URL: <https://pandia.ru/text/80/245/46601.php> (дата обращения: 22.06.2022).
15. Пилигримы Средневековья. URL: <https://www.цифровая-история.рф/index.php/stati/776-piligrimy-srednevekovya> (дата обращения: 22.06.2022).
16. Архиппит Кельский. Исповедь / Пер. О. Б. Румера. URL: <https://litlife.club/books/238382/> (дата обращения: 22.06.2022).
17. Бердяев Н. А. Судьба России. М., 1990. С.12–13.
18. Чаадаев П. Я. Философические письма // П. Я. Чаадаев. Избранные сочинения и письма. М., 1991. С. 26.
19. Кузнецов А. Ю. Феномен цикличности социокультурной динамики // Известия Уральского государственного университета. – Сер. 3: Общественные науки. 2009. № 4 (70). С. 119–126. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/18280?mode=full> (дата обращения 22.06.2022).
20. Радищев А. Путешествие из Петербурга в Москву URL: <https://ilibrary.ru/text/1850/p.1/index.html> (дата обращения: 28.06.2022).
21. Русские путешествия // <https://polka.academy/materials/714> (дата обращения: 28.06.2022).
22. Пономарев Е. Р. Русский имперский травелог // Новое литературное обозрение. 2017. № 2 URL: <http://magazines.russ.ru/> (дата обращения 22.08.2022).
23. Мозговой А. В. Социокультурная мотивация путешествий в современном обществе. URL: <https://www.disserscat.com/content/sotsiokulturnaya-motivatsiya-puteshestvii-lyudei-v-sovremennom-obshchestve> (дата обращения: 28.06.2022).
24. Баллада о Западе и Востоке / Пер. из Р. Киплинга. URL: <https://stihi.ru/2000/12/31-39#:~:text=> (дата обращения: 01.07.2022).

25. Корнильцева Е. Г., Кузнецов А. Ю., Левченко И. Е. Концепция экстремизма С. М. Липсета // Дискуссия. 2016. № 9 (72). С. 56–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontsepsiya-ekstremizma-s-m-lipseta> (дата обращения: 2.07.2022).
26. Корнильцева Е. Г., Кузнецов А. Ю. Русско-югорские межэтнические сообщества: специфика становления // Современные исследования социальных проблем (электронный научный журнал). 2017. Т. 8. № 6-2. С. 376–381. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/russko-yugorskie-mezhetnicheskie-soobschestva-spetsifika-stanovleniya> (дата обращения: 2.08.2022).
27. Открой Россию из окна поезда. URL: <https://rzdtoir.com/> (дата обращения: 4.08.2022).
28. Украинский В. Философия железных дорог. URL: <https://stihi.ru/2017/12/01/7268> (дата обращения: 4.08.2022).

List of references

1. Trip // Encyclopedia of Cultural Studies. [Put' // Ehntsiklopediya kul'turologii] URL: <http://academic.ru/> (accessed on: 14.06.2022).
2. Ivanova A. N. Traveller as a personality with a necessity for novelty and elf-transcendence // Bulletin of Tomsk State University. [Puteshestvennik kak lichnost' s potrebnost'yu v novizne i samotransstsendentsii // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta]. 2015. № 400. Pp. 51–58. ISSN 2311-2387 (Online), ISSN 1998-8613 (Print).
3. Interpretation and meaning of the word «travel» [Tolkovanie i znachenie slova «puteshestvie»] URL: <https://ozhegov.textologia.ru/definit/puteshestvie/> (accessed on: 14.06.2022).
4. Zhigarev O. L. Travel, traveller and the beginning of tourism [Puteshestvie, puteshhestvennik i nachalo turizma] URL: // <http://prepod.nspu.ru/mod/page/> (accessed on: 18.06.2022).
5. Designing social changes in the urban environment / G. B. Korableva, S. E. Vershinin, N. L. Antonova, S. B. Abramova [et al.]. – Yekaterinburg : Publishing House of the Ural University [Proektirovanie sotsial'nykh izmenenij v gorodskoj srede / G. B. Korableva, S. E. Vershinin, N. L. Antonova, S. B. Abramova [i dr.]. – Ekaterinburg : Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta], 2016. 128 p. ISBN 978-5-7996-1670-0.
6. Yushkova T. A., Korniltseva E. G., Ponomareva S. I. From attention management to emotion management. [Ot upravleniya vnimaniem k upravleniyu ehmotseyami] URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34480126> (accessed on: 2.08.2022).
7. Sineokaya Yu. V. Travel as a philosophical project [Puteshestvie kak filosofskiy proekt] URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/puteshestvie-kak-filosofskiy-proekt/viewer> (accessed on: 18.06.2022).
8. Sineokaya Yu. V. Travel as a philosophical project [Puteshestvie kak filosofskiy proekt] URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/puteshestvie-kak-filosofskiy-proekt/viewer> (accessed on: 18.06.2022).
9. Kerouac J. On the road. St. Petersburg : Azbuka, Azbuka-Atticus [V doroge. SPb : Azbuka, Azbuka-Attikus]. 2014. 384 p. ISBN 5-352-01850-4.
10. The full text of the epic of Gilgamesh. [Polnyj tekst ehposa o Gil'gameshe] URL: <http://www.russianplanet.ru/filolog/epos/gilgamesh/text.htm> (accessed on: 21.06.2022).
11. Zubov A. The man who opposes God – the epic of Gilgamesh [Chelovek, protivostoyashhij Bogu – ehpos o Gil'gameshe]. URL: https://abzubov.com/new_course/lecture_060 (accessed on: 21.06.2022).
12. Ibid.
13. Golden honey stream – Mandelstam [Zolotistogo meda struya – Mandel'shtam]. URL: <https://www.culture.ru/poems/41622/zolotistogo-meda-struya> (accessed on: 21.06.2022).
14. Travel in the Ancient World [Puteshestviya v Drevnem mire] URL: <http://pandia.ru/text/80/245/46601.php> (accessed: 22.06.2022).
15. Pilgrims of the Middle Ages [Piligrimy Srednevekov'ya]. URL: <https://www.цифровая-история.rf/index.php/stati/776-piligrimy-srednevekovyya> (accessed on: 22.06.2022).
16. The Archipite of Cologne. Confession / Translated by O. B. Rumer. [Arkhipit Kel'nskiy. Ispoved' / Per. O. B. Rumer] URL: <http://litlife.club/books/2382/> (accessed on: 22.06.2022).
17. Berdyayev N. A. Russia's destiny. [Sud'ba Rossii] M., 1990. Pp. 12–13.
18. Chaadaev P. Ya. Philosophical letters // P. Ya. Chaadaev. Selected works and letters. [Filosoficheskie pis'ma // P. YA. CHaadaev. Izbrannye sochineniya i pis'ma] M., 1991. p. 26.
19. Kuznetsov A. Yu. The phenomenon of cyclical social and cultural dynamics // News bulletin of the Ural State University. – Ser. 3: Social Sciences. [Fenomen tsiklichnosti sotsiokul'turnoj

- dinamiki // Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. – Ser. 3: Obshchestvennye nauki]. 2009. № 4 (70). Pp. 119–126. URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/18280?mode=full> (accessed on: 22.06.2022).
20. Radishchev A. A journey from St. Petersburg to Moscow [Puteshestvie iz Peterburga v Moskvu] URL: <http://ilibrary.ru/text/1850/p.1/index.html> (accessed on: 28.06.2022).
 21. Russian travelling [Russkie puteshestviya] <https://polka.academy/materials/714> (accessed on: 28.06.2022).
 22. Ponomarev E. R. Russian Imperial travelogue // New literary review. [Russkij imperskiy travelog // Novoe literaturnoe obozrenie] 2017. # 2 URL: <http://magazines.russ.ru/> (accessed on: 22.08.2022).
 23. Mozgovoy A. V. Social and cultural motivation of travelling in modern society. [Sotsiokul'turnaya motivatsiya puteshestvii v sovremennom obshchestve] URL: <https://www.dissercat.com/content/sotsiokulturnaya-motivatsiya-puteshestvii-lyudei-v-sovremennom-obshchestve> (accessed on: 28.06.2022).
 24. The Ballad of the West and the East / Trans. from R. Kipling. [Ballada o Zapade i Vostoke / Per. iz R. Kiplinga] URL: <https://stihi.ru/2000/12/31-39#:~:text=> (accessed on: 1.07.2022).
 25. Korniltseva E. G., Kuznetsov A. Yu., Levchenko I. E. S. M. Lipset's concept of extremism // Discussion. [Kontseptsiya ehkstremitizma S. M. Lipseta // Diskussiya] 2016. № 9 (72). Pp. 56–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-ekstremitizma-s-m-lipseta> (accessed on: 2.07.2022).
 26. Korniltseva E. G., Kuznetsov A. Yu. Russian-Yugra interethnic communities: the specifics of formation // Modern studies of social problems (electronic scientific journal). [Russko-yugorskie mezhehtnicheskie soobshchestva: spetsifika stanovleniya // Sovremennye issledovaniya sotsial'nykh problem (ehlektronnyj nauchnyj zhurnal)] 2017. VOL. 8. № 6-2. Pp. 376–381. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/russko-yugorskie-mezhetnicheskie-soobshchestva-spetsifika-stanovleniya> (accessed on: 2.08.2022).
 27. Discover Russia from a train window. [Otkroj Rossiyu iz okna poezda] URL: <https://rzdtour.com/> (accessed on: 4.08.2022).
 28. Ukrainskiy V. Philosophy of railways. [Filosofiya zheleznykh dorog] URL: <https://stihi.ru/2017/12/01/7268> (accessed on: 4.08.2022).

Статья сдана в редакцию 19 августа 2022 года

Аспирантская тетрадь

УДК 629.423.1

В. С. Томилов

Влияние блока балластных резисторов на КПД электрической цепи электровоза переменного тока

UDC 629.423.1

V. S. Tomilov

The effect of a ballast resistor block on the efficiency of an electric circuit of the ac electric locomotive

Аннотация

Для снижения потребления электроэнергии при вождении тяжеловесных грузовых поездов необходимо увеличить показатели режима рекуперативного торможения электровозов, энергетические показатели которого на сегодняшний день неудовлетворительны.

В настоящей статье рассмотрено влияние блока балластных резисторов на показатель коэффициента полезного действия электрической цепи электровоза переменного тока. Блок балластных резисторов предназначен для обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения при организации инвертирования тиристорного выпрямительно-инверторного преобразователя с постоянным углом запаса $\delta = \text{const}$. Однако использование балластных резисторов в якорной цепи тяговых электрических двигателей негативно отражается на энергетических показателях электровоза в режиме рекуперативного торможения. Для исключения этого недостатка предложен способ обеспечения устойчивой работы режима рекуперативного торможения без блока балластных резисторов электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе IGBT-транзисторов.

Представлен расчет характеристик коэффициента полезного действия электрической цепи электровоза переменного тока для режима рекуперативного торможения как при наличии блока балластных резисторов в силовой цепи, так и при его исключении.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, блок балластных резисторов, коэффициент полезного действия, электроподвижной состав, статическая устойчивость, IGBT-транзистор.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-138-144

Abstract

In order to reduce electricity consumption when handling heavy freight trains, it is necessary to increase the performance characteristics of a regenerative braking mode of electric locomotives, the energy performance characteristics of which are currently unsatisfactory.

In this article, the effect of the ballast resistor block on the efficiency indicator of the electric circuit of an alternating current electric locomotive is considered. The ballast resistor block is designed to ensure the static stability of the regenerative braking mode when organizing the inversion process of a thyristor rectifier-inverter converter with a constant margin angle $\delta = \text{const}$. However, the use of ballast resistors in the anchor chain of traction electric engines negatively affects the energy performance characteristics of the electric locomotive in the regenerative braking mode. In order to eliminate this drawback, a method is proposed to ensure the stable operation of the regenerative braking mode without the block of ballast resistors of the alternating current electric locomotive with a rectifier-inverter converter based on IGBT transistors.

The calculation of the efficiency performance characteristics of the electric circuit of an alternating current electric locomotive for the regenerative braking mode is presented both in the presence of the ballast resistor block in the power circuit and in the absence of it.

Keywords: regenerative braking, ballast resistor block, efficiency performance, electric rolling stock, static stability, IGBT-transistor.

DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-138-144

Статья рекомендована к публикации Д. С. Завалишным, канд. физ.-мат. наук, УрГУПС. E-mail: Zavalishin@usurt.ru.

Вячеслав Станиславович Томилов, аспирант кафедры «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения; Иркутск, Россия. E-mail: slavatomilov22@gmail.com, ORCID 0000-0001-6763-5631.

© В. С. Томилов, 2022

The article is recommended for publishing D. S. Zavalishchin, PhD, associate professor, USURT. E-mail: Zavalishin@usurt.ru.

Vyacheslav Stanislavovich Tomilov, Postgraduate student of «Electric Rolling Stock» Department of Irkutsk State Transport University; Irkutsk, Russia. E-mail: slavatomilov22@gmail.com, ORCID 0000-0001-6763-5631.

© V. S. Tomilov, 2022

Рекуперативное торможение позволяет не только добиться отдачи электроэнергии в контактную сеть, но и поддерживать неизменную скорость движения тяжеловесных поездов на спуске, увеличить техническую скорость движения поезда, повысить пропускную способность тягового участка, уменьшить износ тормозных колодок и колесных пар электровоза. Однако низкий показатель энергетической эффективности ограничивает эффективное использование данного режима. Низкий коэффициент мощности (0,65) обусловлен законом управления выпрямительно-инверторным преобразователем (ВИП) с поддержанием постоянно угла запаса $\delta = \text{const}$ [1].

Также очень важна статическая устойчивость системы «генератор-инвертор» в режиме рекуперативного торможения, которое предполагает компенсацию появившейся разницы между напряжением генератора и инвертора

при любом отклонении тока тягового электродвигателя (ТЭД) от его установленного значения; условие определяет неравенство [2]:

$$\frac{dU_d}{dI_d} < \frac{dU_{\text{и}}}{dI_d}, \quad (1)$$

где U_d , $U_{\text{и}}$ – напряжение на генераторе и инверторе соответственно, В; I_d – ток ТЭД, А.

При организации коммутации тиристорных плеч ВИП с постоянным углом запаса $\delta = \text{const}$ необходим ввод активного сопротивления в цепь якоря тягового двигателя, в роли которого на электровозе выступает блок балластных резисторов (ББР), рис. 1.

Использование ББР в якорных цепях ТЭД приводит к снижению не только энергетических показателей электровоза и надежности его силовой цепи, но и ограничивает область его тормозных характеристик.

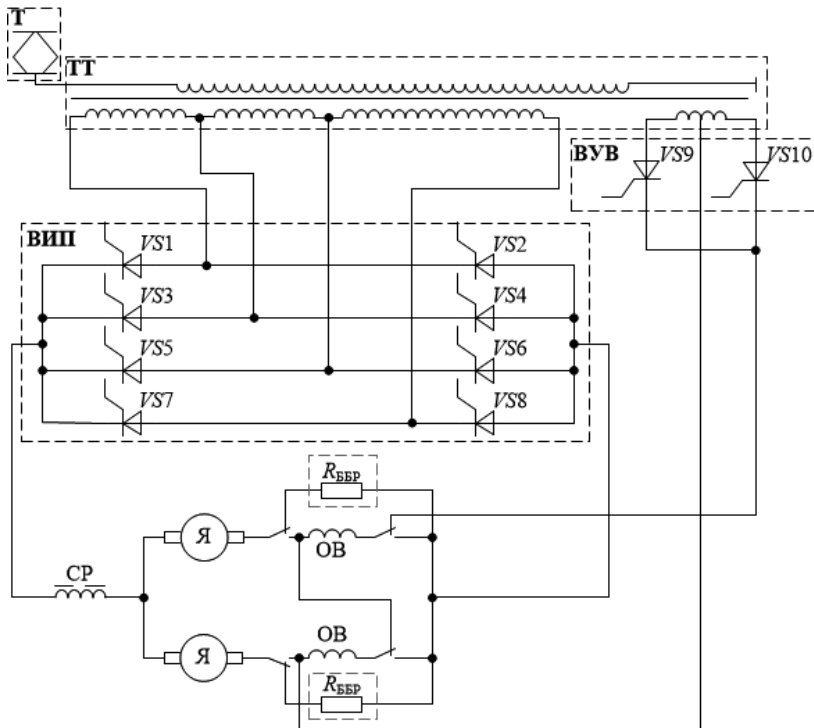


Рис. 1. Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока с ВИП на базе тиристоров

В балластных резисторах около 10 % вырабатываемой генераторами электровоза энергии расходуется бесполезно [3]. Из-за падения напряжения в них область тормозных характеристик ограничена на максимальном уровне: 3,5 зоны регулирования напряжения ВИП. Вынужденное применение балластных резисторов негативно сказывается на массогабаритных показателях, усложняется и конструкция электровоза [4].

Исключение блока балластных резисторов из силовой цепи электровоза крайне актуально.

Обеспечить работоспособность режима рекуперативного торможения при исключении ББР можно при условии использования полностью управляемых транзисторов. Специалистами ИрГУПС разработаны ВИП (рис. 2) и алгоритм управления им для режима рекуперативного торможения, обеспечивающий положительный наклон внешней характеристики преобразователя и статическую устойчивость системы «генератор-инвертор» при исключении ББР из силовой цепи электровоза (таблица, рис. 3) [5–7].

КПД электровоза переменного тока при реализации рекуперативного торможения представляет собой отношение активной мощности, отдаваемой в сеть, к мощности, вырабатываемой тяговыми двигателями в генераторном режиме [3, 8]:

$$\eta = \frac{U_d \cdot I_d - (R'_{за} I_d^2 + \Delta U_v \cdot I_d + \Delta P_{тт})}{U_d \cdot I_d}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{тт}$ – потери трансформатора, кВт.

Эквивалентное сопротивление цепи выпрямленного тока определяется выражением (3):

$$R'_{за} = R_{за} - \frac{m_a \cdot R_d \cdot k_{вз}^2}{p_{ц}}, \quad (3)$$

где m_a и $p_{ц}$ – число последовательно и параллельно включенных тяговых двигателей.

$$R_{за} = 9 \cdot R_t \cdot k_3^2 \cdot R_{в0} \cdot k_2^2, \quad (4)$$

где R_t – общее сопротивление обмоток тягового трансформатора, Ом; $R_{в0}$ – общее активное сопротивление цепи выпрямленного тока, Ом [8].

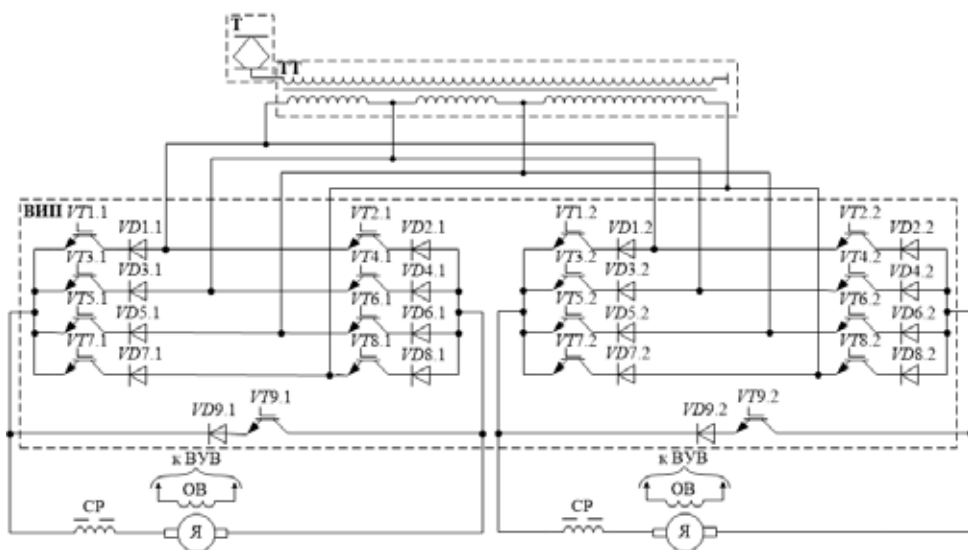


Рис. 2. Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока с ВИП на базе IGBT-транзисторов

Алгоритм управления ВИП на базе IGBT-транзисторов

Номер зоны	Направление ЭДС в обмотках трансформатора	Транзисторные плечи выпрямительно-инверторного преобразователя								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	→	β_{breg}	—	β_{sreg}	—	—	—	—	β_w	W_w
	←	—	β_{reg}	—	β_{sreg}	—	—	β_w	—	W_w
3	→	—	—	β_{breg}	—	β_{sreg}	—	—	β_w	W_w
	←	—	—	—	β_{breg}	—	β_{sreg}	β_w	—	W_w
2	→	β_{breg}	—	β_{sreg}	—	—	β_w	—	—	W_w
	←	—	β_{breg}	—	β_{sreg}	β_w	—	—	—	W_w
1	→	—	—	β_{reg}	—	—	β_{reg}	—	—	W_w
	←	—	—	—	β_{reg}	β_{reg}	—	—	—	W_w

Примечание: β_{reg} – угол регулирования фазы отпирания транзисторов плеча ВИП; β_w – рабочий угол отпирания силовых транзисторов плеча ВИП; β_{sreg} – регулируемый угол отпирания транзисторов плеча ВИП по малому контуру; β_{breg} – регулируемый угол отпирания транзисторов плеча ВИП по большому контуру; W_w – угол записания транзистора девятого плеча ВИП.

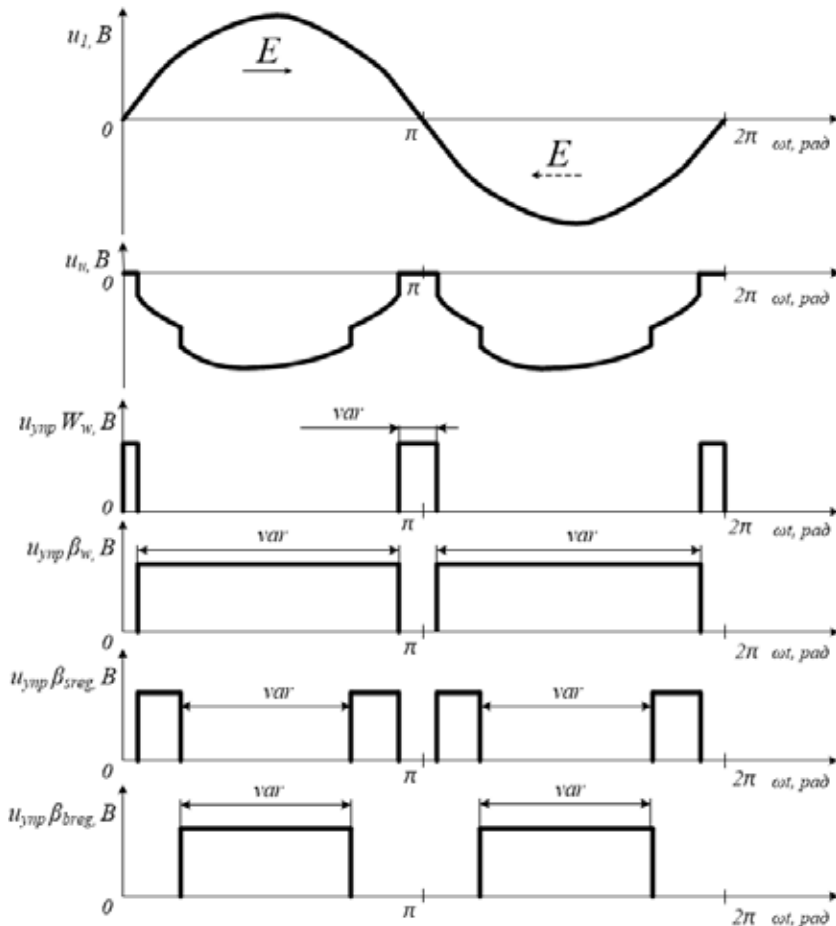


Рис. 3. Временные диаграммы электромагнитных процессов ВИП на базе IGBT-транзисторов при реализации рекуперативного торможения без ББР

Общее сопротивление обмоток тягового трансформатора определяется выражением (5):

$$R_{\tau} = \frac{1}{k_{\tau}^2} \cdot R_1 + R_2. \quad (5)$$

В конечном итоге КПД электрической цепи электровоза переменного тока определяется формулой (6):

$$\eta = \frac{U_d \cdot I_d - \left[\left(\frac{1}{k_0^2} R_1 R_2 \right) \frac{I_D}{I_A} + R_{\text{в0}} + R_A \right] I_A^2 + \Delta U_{\text{в}} \cdot I_d + \Delta P_{\pi}}{U_d \cdot I_d}. \quad (6)$$

Мощность потерь в преобразователях включает в себя мощность, погло-

щаемую балластными резисторами, сопротивление которых на электровозах серии «Ермак» составляет 0,144 Ом. Эта мощность в часовом режиме составляет 95 кВт на каждый тяговый двигатель, т.е. около 10 %.

Результаты расчета коэффициента полезного действия при наличии и исключении ББР представлены на рис. 4, 5.

В режиме рекуперации, как правило, реализуются нагрузки менее часовой, и при квадратичной зависимости от тока нагрузки в среднем потери в ББР существенно меньше 10 %. Однако это справедливо при торможении на высоких скоростях на вышних зонах регулирования, но потери в ББР сохраняются

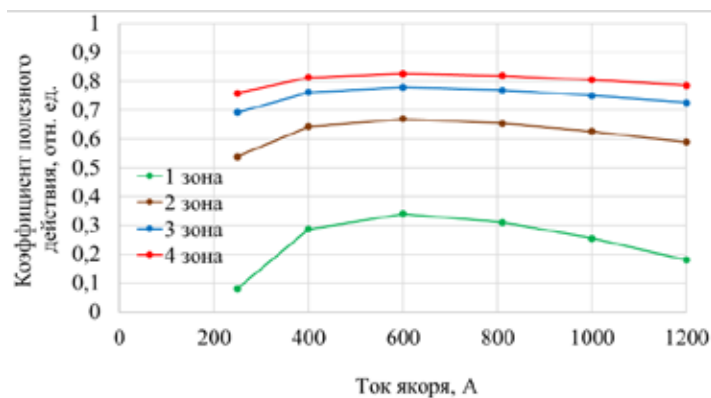


Рис. 4. Зависимость КПД электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения от тока ТЭД при наличии ББР в его силовой цепи

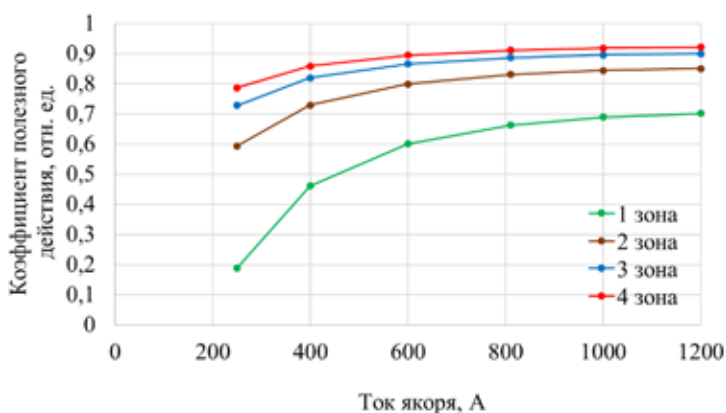


Рис. 5. Зависимость КПД электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения от тока ТЭД при исключении ББР из его силовой цепи

неизменными при торможении с пониженными скоростями, значительно снижая КПД рекуперации.

За счет исключения ББР повышается КПД электрической цепи электровоза переменного тока, работающего в режиме рекуперативного торможения в среднем на 8,9 % для 4-й зоны регулирования ВИП, 11,8 % – для 3-й, 19,2 % – для 2-й и 54,7 % – для 1-й зоны регулирования напряжения.

Заключение

Наличие блока балластных резисторов в якорной цепи тяговых электрических двигателях электровоза переменного тока значительно снижает его энергетические показатели, в том числе и КПД. Для рекуперативного

торможения без ББР предложен способ управления выпрямительно-инверторными преобразователями на базе IGBT-транзисторов, который обеспечивает устойчивую работу режима рекуперации без надобности в дополнительном активном сопротивлении в цепи тяговых электрических двигателей.

Проведенный расчет КПД электрической цепи электровоза переменного тока показал, что при исключении ББР коэффициент полезного действия значительно увеличивается в пределах от 8,9 % на высших зонах регулирования напряжения и до 54,7 % на первой зоне, так как потери в ББР сохраняются неизменными и в зоне низких скоростей оказывают большее влияние на показатель КПД. ■

Литература

1. Лисунов В. Н. Применение рекуперативного торможения на участках переменного тока / В. Н. Лисунов, В. М. Бабич, Б. С. Барковский, Л. В. Бычков // Электрическая и тепловозная тяга. – 1970. – № 7. – С. 10–11.
2. Плакс А. В. Системы управления электрическим подвижным составом: учебник для вузов железнодорожного транспорта. – М. : Маршрут, 2005. – 360 с. ISBN 5-89035-303-9.
3. Трахтман Л. М. Электрическое торможение электроподвижного состава. – М. : Транспорт, 1965. – 204 с.
4. Копанев А. С. Переходные процессы в силовой цепи электровоза переменного тока в тиристорных преобразователях в инверторном режиме / А. С. Копанев, Б. И. Хоменко // Электричество. 1974. № 1. С. 60–65.
5. Томилов В. С. Повышение эффективности рекуперативного торможения на отечественных электровозах переменного тока / В. С. Томилов, О. В. Мельниченко // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век : м-лы VII Международн. научн.-техн. конф., Санкт-Петербург, 10–12 ноября 2020 г. – СПб : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – С. 140–146.
6. Томилов В. С. Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока / В. С. Томилов, О. В. Мельниченко, С. Г. Шрамко, С. А. Богинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 65. – № 1. – С. 172–182. ISSN 1813-9108.
7. Томилов В. С. Моделирование работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Вестник УрГУПС. № 2 (50). 2021. С. 106–114. ISSN 2079-0392.
8. Тихменев Б. Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями. – М. : «Гострансжелдориздат», 1958. – 268 с.

List of references

1. Lisunov V. N. Application of regenerative braking at alternating current railway sections / V. N. Lisunov, V. M. Babich, B. S. Barkovsky, L. V. Bychkov // Electric and diesel traction [Primenenie rekuperativnogo tormozheniya na uchastkakh peremennogo toka / V. N. Lisunov, V. M. Babich, B. S. Barkovskij, L. V. Bychkov // EHlektricheskaya i teplovoznaya tyaga]. – 1970. – № 7. – Pp. 10–11.
2. Plaks A. V. Electric rolling stock control systems: textbook for railway transport universities. – M. : Marshrut (Route) [Sistemy upravleniya ehlektricheskim podvizhnym sostavom: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta. – M. : Marshrut], 2005. – 360 p. ISBN 5-89035-303-9.

3. Trakhtman L. M. Electric braking of the electric rolling stock. – M. : Transport [Ehlektricheskoe tormozhenie ehlektropodvizhnogo sostava. – M. : Transport], 1965. – 204 p.
4. Kopanev A. S. Transients in the power circuit of an alternating current electric locomotive with thyristor converters in inverter mode / A. S. Kopanev, B. I. Khomenko // Electricity [Perekhodnye protsessy v silovoj tsepi ehlektrovoza peremennogo toka v tiristornymi preobrazovatelyami v invertornom rezhime / A. S. Kopanev, B. I. Khomenko // Ehlektrichestvo]. 1974. № 1. Pp. 60–65.
5. Tomilov V. S. Improving the efficiency of regenerative braking on domestic AC electric locomotives / V. S. Tomilov, O. V. Melnichenko // Locomotives. Electric transport – XXI century : materials of VII International Science and Technology conference, St. Petersburg [Povyshenie ehffektivnosti rekuperativnogo tormozheniya na otechestvennykh ehlektrovozhakh peremennogo toka / V. S. Tomilov, O. V. Mel'nichenko // Lokomotivy. Ehlektricheskij transport – XXI vek : materialy VII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg], November 10–12, 2020 – St. Petersburg : FSBEI HE PGUPS (Emperor Alexander I State Transport University), 2020. – Pp. 140–146.
6. Tomilov V. S. Improving the energy efficiency of AC electric locomotives / V. S. Tomilov, O. V. Melnichenko, S. G. Shramko, S. A. Boginsky // Modern technologies. System analysis. Modelling. [Povyshenie ehnergeticheskoy ehffektivnosti raboty ehlektrovozov peremennogo toka / V. S. Tomilov, O. V. Mel'nichenko, S. G. SHramko, S. A. Boginskij // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie] – 2020. – Vol. 65. – № 1. – Pp. 172–182. ISSN 1813-9108.
7. Tomilov V. S. Simulation of the running of an alternating current electric locomotive in the regenerative braking mode // Bulletin of USURT [Modelirovanie raboty ehlektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya // Vestnik UrGUPS]. № 2 (50). 2021. Pp. 106–114. ISSN 2079-0392.
8. Tikhmenev B. N. Alternating current electric locomotives with static converters. – M. : «Gostranszheldorizdat» [Ehlektrovozy peremennogo toka so staticheskimi preobrazovatelyami. – M. : «Gostranszheldorizdat»], 1958. – 268 p.

Статья сдана в редакцию 1 июня 2022 года

Уважаемые коллеги!

Информирую вас о требованиях, предъявляемых к оформлению статей.

При наборе используйте Word-2003 или Word-2007; шрифт (по всему тексту, в том числе в рисунках и таблицах) – тип Times, размер шрифта – 14, межстрочное расстояние – 1,5, абзацный отступ – 1,25 (1,27) см, поля – 2 см; расстановка переносов по всему тексту – автоматическая.

Набор формул: простые формулы и сочетания символов ($x^2 < y^2$; $E = mc^2$; $a^2 + b^2 = c^2$; Q_{i-1} ; ψ_j) – только в текстовом режиме, сложные

$$(s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{j=1}^e x_j^2 n_j - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^e x_j n_j \right)^2 \right]; \left(\frac{\sigma_a}{[n]} \right)$$

или S_i^m) – только в редакторе формул

Equation или в MathType.

Написание букв: русские (а, б, в, А, Б, В), греческие (Θ, Σ, Ω, Ψ, α, β, δ, ε, λ, π), а также цифры и аббревиатуры (1, 2, 3; I, II, III; max, lg, sin и т. п.) пишутся только прямо; латинские (a, b, n, A, B, N и т. д.) – только курсивом. Исключение – курсив во вспомогательном тексте (слова «Таблица» и «Рис.», примечания в рисунках и ссылки в тексте на эти примечания).

Оформление текста: левый верхний край – инициалы, фамилия; заголовков – все буквы ПРОПИСНЫЕ, жирные, расположение – по центру набора; таблиц и рисунков: в таблицах размер шрифта – на полтора-два размера меньше, чем в основном тексте (11,5–12), расположение текста в «шапке» таблицы – по центру, в столбцах – по ширине; межстрочное расстояние – 1; слово «Таблица» – курсивное начертание, в правый край таблицы; название таблицы – начертание нормальное (прямое), расположение – по центру таблицы. В рисунках (графиках, диаграммах): размер подрисуночной

подписи – 14, расположение – по центру набора, слово «Рис.» – курсив, название рисунка – нормальное начертание, описание рисунка (экспликация) – нормальное начертание, условные обозначения – курсивное начертание, их расшифровка – нормальное. Расположение таблиц и рисунков – строго после ссылки на них.

Кроме того, рисунки обязательно прилагаются к материалу (один рисунок – один файл; формат – *.jpg).

Ссылки на литературу в тексте пишутся в квадратных скобках ([1], [1, 2] или [3–5]); нумерация сквозная. Список литературы/источников оформляется по ГОСТ 7.0.5–2008.

В конце статьи обязательно ставится дата отсыла материала в редакцию.

Объем статьи – не более 14-ти страниц.

Название файла: Фамилия. Первое слово заголовка. Подчеркивание. Последнее слово заголовка (Сидоров. Синтез_электроприводом).

К материалу (статье) обязательно прилагаются (отдельным файлом): УДК, сведения об авторе, аннотация, ключевые слова (название файла: УДК 000. Сидоров. Синтез_электроприводом).

Материалы для очередного номера журнала «Вестник УрГУПС» принимаются до 30 числа первого месяца квартала (до 30-го января, 30-го апреля, до 30-го июля, до 30-го октября). Материалы, поступившие в редакцию после 30-го числа, будут опубликованы только в следующем номере.

Успешной работы!

*Л. Барышникова,
литературный и выпускающий
редактор журнала «Вестник УрГУПС»*

Уважаемые читатели и авторы журнала «Вестник УрГУПС»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

Назначение платежа: «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС – это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-25-60

или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusknikov-urgups>

Извещение	<p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u></p> <p>КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u></p> <p>ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u></p> <p>в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u></p> <p>БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u></p> <p>Код бюджетной классификации (КБК): _____</p> <p>Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u></p> <p>Плательщик: _____</p> <p>Адрес плательщика: _____</p> <p>ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____</p> <p>Сумма: _____ руб. ____ коп.</p> <p>Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2022 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u></p> <p>КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u></p> <p>ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u></p> <p>в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u></p> <p>БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u></p> <p>Код бюджетной классификации (КБК): _____</p> <p>Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u></p> <p>Плательщик: _____</p> <p>Адрес плательщика: _____</p> <p>ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____</p> <p>Сумма: _____ руб. ____ коп.</p> <p>Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2022 г.</p>

ф. СП-1



АБОНЕМЕНТ

на ~~газету~~
журнал

70070

(индекс издания)

Вестник УргУПС

(наименование издания)	Количество комплектов:	
------------------------	------------------------	--

на 2023 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						X	X	X	X	X	X

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

ПВ	место	литер

на ~~газету~~
журнал

70070

(индекс издания)

Вестник УргУПС

(наименование издания)

Стои- мость	подписки	_____ руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	_____ руб. ____ коп.		

на 2023 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						X	X	X	X	X	X

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)