



ISSN 2415-8658

**ТРАНСПОРТ
АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО
РЕГИОНА**

**PACIFIC RIM COUNTRIES
TRANSPORTATION SYSTEM**



№ 3(40) 2024

Научный журнал
Издается с марта 2013 г.
Периодичность: 4 номера в год
ISSN 2415-8658
Подписной индекс
в общероссийском каталоге
ООО «Урал-Пресс Округ» – 25213

Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона

№ 3(40) 2024

Главный редактор

Давыдов Юрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии транспорта

Заместители главного редактора

Нератова Оксана Анатольевна, кандидат технических наук
Малышева Ольга Александровна, кандидат технических наук

Редакционная коллегия

Буровцев Владимир Викторович, доктор экономических наук, профессор, действительный член Российской академии транспорта, ДВГУПС, г. Хабаровск
Анисимов Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, ПГУПС, г. Санкт-Петербург
Годяев Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Жданова Светлана Мирзахановна, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Игнатенко Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Квашук Сергей Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ДВГУПС, г. Хабаровск
Кравчук Валерий Андреевич, доктор технических наук, профессор, ТОГУ, г. Хабаровск
Кудрявцев Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, ДВГУПС, г. Хабаровск
Кулинич Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ, ДВГУПС, г. Хабаровск
Ли Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии электротехнических наук РФ, ДВГУПС, г. Хабаровск

Нестерова Наталья Станиславовна, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск

Парамонов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, член российского и международного общества по геотехнике и фундаментостроению (РОМГГиФ и ISSMGE), ПГУПС, г. Санкт-Петербург

Пиотров Алексей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск

Пугачев Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии транспорта, ДВГУПС, г. Хабаровск

Стоянович Геннадий Михайлович, доктор технических наук, доцент, почетный работник науки и техники РФ, ДВГУПС, г. Хабаровск

Железнов Дмитрий Валерианович, доктор технических наук, профессор, ПАО «Трансконтейнер», г. Москва

Рахимов Рустам Вячеславович, доктор технических наук, профессор, ТГТУ, Узбекистан

Сериков Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент, КНАГУ, г. Комсомольск-на-Амуре

Федюк Роман Сергеевич, доктор технических наук, профессор, ДВФУ, г. Владивосток

Числов Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ма Юньдун, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР

Чэнь Бинчжи, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР

Ли Вэйдун, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР

Цзян Алань, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР

Чжин Чжанвон, профессор, Корейский национальный университет транспорта, г. Ыйван, Республика Корея

В соответствии с распоряжением ВАК РФ от 22.11.2022 г. № 1482-р научный журнал «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям:

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки).

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки).

2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки).

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки).

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки).

2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки).

2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки).

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки).

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки).

2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки).

2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы (технические науки).

2.9.9. Логистические транспортные системы (технические науки).

Сотрудники редакции

редактор, переводчик – Заикина Светлана Сергеевна
технический редактор – Ларионова Надежда Викторовна

Учредитель

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47
Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-51966 от 29 ноября 2012 г. выдано Роскомнадзором.

Отпечатано в издательстве ДВГУПС.
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Адрес редакции

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47, каб. 359
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, тел./факс: (4212) 40-77-65
E-mail: apr-journal-ed@list.ru
Сайт: tratr.dvups.ru

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При перепечатке ссылка на журнал «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона» обязательна.

Журнал обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Подписано в печать 13.11.2024. Дата выхода в свет 15.11.2024.
Заказ 181. Усл. печ. л. 11,0. Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–40 экз.). Цена свободная.

Pacific Rim countries transportation system

№ 3(40) 2024

Scientific Journal
Issued since March 2013
Frequency: 4 issues a year
ISSN 2415-8658
Subscription index
LLC «Ural-Press Okrug» – 25213

Chief Editor

Davydov Yuriy Anatol'evich, Doctor of Science (Engineering),
Professor, Academician of the Russian Transport Academy

Deputy Chief Editors

Neratova Oksana Anatol'evna, Ph.D., Associate Professor
Malysheva Olga Aleksandrovna, Ph.D., Associate Professor

Editorial Board

Burovtsev Vladimir Viktorovich, Doctor of Science (Economics),
Professor, Academician of the Russian Transport Academy,
FESTU, Khabarovsk

Anisimov Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Science
(Engineering), Associate Professor, PGUPS, Saint Petersburg

Godyaev Aleksandr Ivanovich, Doctor of Science (Engineering),
Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Zhdanova Svetlana Mirzakhanovna, Doctor of Science
(Engineering), FESTU, Khabarovsk

Ignatenko Ivan Vladimirovich, Ph.D., Associate Professor
FESTU, Khabarovsk

Kvashuk Sergey Vladimirovich, Doctor of Science (Geology
and Mineralogy), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Kravchuk Valeriy Andreevich, Doctor of Science
(Engineering), Professor, FESTU, Khabarovsk

Kudryavtsev Sergey Anatol'evich, Doctor of Science (Engineering),
Professor, Corresponding Member of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences, FESTU, Khabarovsk

Kulinich Yuriy Mikhailovich, Doctor of Science (Engineering),
Professor, Corresponding Member of the Academy of Electrotechnical
Sciences of the Russian Federation, FESTU, Khabarovsk

Li Valeriy Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering),
Professor, Full member of the Academy of Electrotechnical
Sciences of the Russian Federation, FESTU, Khabarovsk

Piotrovich Aleksey Anatol'evich, Doctor of Science
(Engineering), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Pugachev Igor Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering),
Professor, FESTU, Khabarovsk

Nesterova Natalya Stanislavovna, Doctor of Science
(Engineering), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Stoyanovich Gennadiy Mikhailovich, Doctor of Science
(Engineering), Associate professor, Honorary Worker
of Science and Technology of the Russian Federation,
FESTU, Khabarovsk

Zheleznov Dmitrii Valerianovich, Doctor of Science
(Engineering), Professor, «Transcontainer» PJSC, Moscow

Rakhimov Rustam Vyacheslavovich, Doctor of Science
(Engineering) Sciences, Professor, TSTU, Uzbekistan

Paramonov Vladimir Nikolaevich, Doctor of Science
(Engineering), Associate Professor, Member of the Russian
and International Society for Geotechnics and Foundation
Engineering (RSSMGFE and ISSMGE), PGUPS,
Saint Petersburg

Serikov Aleksandr Vladimirovich, Doctor of Science
(Engineering), Associate Professor, KNASTU,
Komsomolsk-on-Amur

Fediuk Roman Sergeevich, Doctor of Science
(Engineering), Professor, FEPU, Vladivostok

Chislov Oleg Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering),
Professor, RSTU, Rostov-on-Don

Ma Yundong, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian,
P.R. China

Chen Bingzhi, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian,
P.R. China

Li Weidong, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian,
P.R. China

Jiang Alan, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian,
P.R. China

Jin Jangwon, Ph.D., Korea National University of Transportation,
Uiwang, Republic of Korea

The Journal is licensed and indexed by the State Commission for Higher Degrees and titles (VAK RF order № 1482-r, 22.11.2022);
it is included in the list of journals where the main scientific results of dissertations for obtaining the scientific degree
of Candidates of Sciences and Doctors of Sciences should be published (according to the following specialties):

- 2.1.1. Structures and buildings (Technical sciences).
- 2.1.2. Foundations and underground structures (Technical sciences).
- 2.1.7. Construction technology and organization (Technical sciences).
- 2.1.8. Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels (Engineering sciences).
- 2.4.2. Electrical complexes and systems (Technical sciences).
- 2.4.5. Energy systems and complexes (Technical sciences).

2.9.1. Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport (Technical sciences).

2.9.2. Railway track, survey and design of railroads (Technical sciences).

2.9.3. Rolling stock of railroads, traction and electrification (Technical sciences).

2.9.4. Transportation process management (Technical sciences).

2.9.8. Intelligent transport systems (Technical sciences).

2.9.9. Logistic transport systems (Technical sciences).

Editorial Staff

Editor, Translator – Zaikina Svetlana Sergeevna
Technical Editor – Larionova Nadezhda Viktorovna

Founder

680021, Khabarovsk, Serysheva, 47
Far Eastern State Transport University

Mass media Registration Certificate PI,
Number FS77-51966, November 29, 2012,
issued by Roskomnadzor.

Printed at Far Eastern State Transport University
Publishing Center.

Editorial office address and contacts:

680021, Khabarovsk, Serysheva St., 47, room 359
Far Eastern State University, tel./fax: (4212) 40-77-65.
E-mail: apr-journal-ed@list.ru
Website: tratr.dvgups.ru

The editorial opinion may not coincide with the opinion
of the authors of articles. At reprinting the reference
to the journal is obligatory.

The journal is indexed in the Russian Science
Citation Index (RSCI).

Signed in print 13.11.2024. Publication date 15.11.2024.
Order 181. P. 11,0. Circulation 500 copies
(1st plant 1–40 copies). Free price.

СОДЕРЖАНИЕ

Березнев А.М., Жиров Н.О., Гуляев А.В. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ НА ПУТЯХ БАЗЫ ПУТЕВОЙ МАШИННОЙ СТАНЦИИ	5
Кабалык Ю.С., Жаков А.С. МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА «ТОКОВЫЙ КОРИДОР» ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ СО СДВОЕННОЙ СТАТОРНОЙ ОБМОТКОЙ	13
Кравчук Е.В., Белуцкий И.Ю., Кравчук В.А. ПАРАМЕТРЫ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ. НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ НА СТАДИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ БАЛОК, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ВЫТЯЖКОЙ СТЕНКИ	19
Куклев Д.Н., Куклева Н.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПУСКА ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ЧЕРЕЗ ГОРЛОВИНУ УЧАСТКОВОЙ СТАНЦИИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	29
Ловцов А.Д. К РАСЧЕТУ НА УСТОЙЧИВОСТЬ П-ОБРАЗНОЙ РАМЫ С ЖЕСТКИМИ ОПОРАМИ	34
Попов В.И., Хтет Аунг ВЛИЯНИЕ ПЕРЕПАДОВ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УСТОЯ И СВАИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПУТЕПРОВОДА В УСЛОВИЯХ МЬЯНМЫ	39
Кузнецов П.Н., Штепа К.В., Губин В.Е., Муровский С.П., Кувшинов В.В. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВТОРИЧНЫХ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА	44
Горшков В.В., Оленцевич В.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СХЕМ МНОГОСУТОЧНЫХ ЗАКРЫТИЙ ПЕРЕГОНОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ.....	51
Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Григоров Д.Е. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ БИБЛИОТЕК RUTHON ПО РАБОТЕ С ГЕОГРАФИЧЕСКИМИ КООРДИНАТАМИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ	61
Сазанова Е.В., Анисимов В.В. ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНА РЕМОНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОСТАВЩИКОВ КОМПЛЕКТУЮЩИХ И МОЩНОСТЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ БАЗ ПМС	68
Сидорович М.А., Пономарчук Ю.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯМ	81
Федоренко Е.В. ПРИРОДНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ В ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ	88
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ	93

CONTENTS

.....	
Bereznev A.M., Zhiron N.O., Gulyaev A.V. DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING THE POSITION OF MOBILE UNITS ON THE RAILWAY MAINTENANCE BASE TRACKS	5
Kabalyk I.S., Zhakov A.S. MODERNIZATION OF THE «CURRENT CORRIDOR» METHOD FOR CURRENT REGULATION IN AN INDUCTION MOTOR WITH DOUBLE STATOR WINDING	13
Kravchuk E.V., Belutskii I.Yu., Kravchuk V.A. PARAMETERS OF LOAD CAPACITY. STRESS AND DEFORMATION AT THE MANUFACTURING STAGE OF STEEL BEAMS PRE-STRESSED BY WALL STRETCHING.....	19
Kuklev D.N., Kukleva N.V. RESEARCH OF THE PROCESS OF PASSING TRAFFIC FLOW THROUGH THE NECK OF A DISTRICT STATION USING THE METHOD OF SIMULATION MODELING.....	29
Lovtsov A.D. CALCULATION OF STABILITY OF II-SHAPED FRAME WITH RIGID SUPPORTS	34
Popov V.I., Htet Aung THE EFFECT OF TEMPERATURE CHANGES ON THE MOVEMENT OF THE ABUTMENT AND PILE OF THE INTEGRAL ABUTMENT BRIDGE IN CONDITIONS OF MYANMAR	39
Kuznetsov P.N., Shtepa K.V., Gubin V.E., Murovsky S.P., Kuvshinov V.V. ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE USE OF SECONDARY AND RENEWABLE ENERGY RESOURCES IN SIBERIA AND FAR EAST	44
Gorshkov V.V., Olentsevich V.A. DETERMINATION OF OPTIMAL SCHEMES OF MULTI-DAY CLOSURES OF SPANS FOR REPAIR WORK AT THE EASTERN POLYGON	51
Pugachev I.N., Sheshera N.G., Grigorov D.E. USING TOOLS OF MODERN PYTHON LIBRARIES FOR WORKING WITH GEOGRAPHICAL COORDINATES TO SOLVE ROAD SAFETY PROBLEMS.....	61
Sazanova E.V., Anisimov V.V. OPTIMIZATION OF THE PLAN FOR RAILROAD TRACK REPAIRS TAKING INTO ACCOUNT CAPABILITIES OF OUTFIT SUPPLIERS AND CAPACITIES OF TRACK MACHINE STATIONS' PRODUCTION BASES.....	68
Sidorovich M.A., Ponomarchuk Y.V. CONTACT NETWORK DIAGNOSTICS IMPROVEMENT BY DETECTING RADIO WAVE EMISSIONS.....	81
Fedorenko E.V. INITIAL STRESS STATE IN GEOTECHNICAL ANALYSES.....	88
AUTHORS GUIDELINES.....	94

Научная статья
УДК 656.2:620.2

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ НА ПУТЯХ БАЗЫ ПУТЕВОЙ МАШИННОЙ СТАНЦИИ

Березнев Артем Максимович¹, Жиров Никита Олегович², Гуляев Александр Викторович³

^{1, 2, 3} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

¹ artembereznev14@gmail.com

² nikichimaRY@gmail.com

³ 89143127984@ya.ru

Аннотация. Рассматривается разработка нового аппаратно-программного комплекса для системы контроля положения подвижных единиц, описан новый внедрённый алгоритм для формирования состава подвижных единиц для отдельных путей. Собираемая в автоматическом режиме информация о подвижном составе отправляется на автоматизированное рабочее место и отображается в графическом интерфейсе пользователя. Описан принцип работы системы и её элементов, а именно: RFID-меток, установленных на вагонах; антенн для считывания меток; одноплатного компьютера Raspberry Pi; среды разработки Node-Red и алгоритмов, написанных в этой среде на языке JavaScript; графического интерфейса dashboard; файлов с сохранёнными данными о сформированных составах в форматах txt и xlsx.

Ключевые слова: RFID, Raspberry Pi, Node-Red, путевая машинная станция, вагон, подвижной состав

Original article

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING THE POSITION OF MOBILE UNITS ON THE RAILWAY MAINTENANCE BASE TRACKS

Bereznev Artem M.¹, Zhirov Nikita O.², Gulyaev Aleksandr V.³

¹²³ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

¹ artembereznev14@gmail.com

² nikichimaRY@gmail.com

³ 89143127984@ya.ru

Abstract. This article discusses the refinement and addition of new software functions for the mobile unit position control system, describes a new implemented algorithm for forming the composition of mobile units for each path in the dashboard graphical interface and output messages. The principle of operation of the system and its elements is also described, namely: RFID tags installed on wagons; antennas for reading tags; Raspberry Pi single-board computer; Node-Red development environment and algorithms written in this environment in JavaScript; dashboard graphical interface; files with saved data about the formed compositions in txt and xlsx formats.

Keywords: RFID, Raspberry Pi, Node-Red, track machine depot, railcar, wagon, rolling stock

Введение

Научная составляющая по тематике применения RFID-технологии на железнодорожном транспорте заключается в рассмотрении возможности внедрения этой технологии как одного из аспектов цифровизации железной дороги. В статье [16] описывается общий принцип работы технологии при закреплении к подвижному составу, и анализируются положительные стороны от внедрения. Также представлены технические характеристики RFID-меток, например, большой рабочий диапазон температур и влагостойкость, что обеспечивает надёжную работу меток в различных условиях: при установке на улице и эксплуатации при отрицательных температурах. Разработаны методы и средства повышения надёжности считывания радиочастотных меток, в том числе путём программного алгоритма

для работы в разных условиях: при разной скорости прохождения расстояния между RFID-считывателем и метками; различной силе сигнала, передаваемого между ридером и метками.

В настоящее время руководитель маневров сталкивается с проблемой отсутствия актуальной информации о местоположении специального подвижного состава (СПС) на производственной базе путевой машинной станции (ПМС). Традиционно для получения этой информации требуется ручное обследование территории обходчиком, что является трудоемким и затратным процессом. Для автоматизации этого процесса было разработано техническое решение в рамках стратегии ОАО «РЖД» по цифровой трансформации. Предложенное решение включает в себя следующее.

1. RFID-антенны [7]: обеспечивают считывание RFID-меток [9], установленных на каждом вагоне СПС.

2. Микрокомпьютер Raspberry Pi [13]: принимает и обрабатывает данные, получаемые от антенн, с использованием платформы Node-Red [2, 11].

3. Автоматизированное рабочее место диспетчера/оператора (АРМ): предоставляет информацию о местоположении СПС в режиме реального времени.

Данное решение позволяет реализовать технологию IoT (Internet of Things), снабжая руководителя маневров актуальными данными о местоположении СПС.

Для реализации данного комплекса в качестве аппаратного обеспечения выбрана RFID-система на основе ридера CLOU CL7206B6 с дальностью считывания до 3 м. Данный радиус является оптимальным для корректной работы индивидуального ридера для конкретного пути. Для подключения антенн существует демо-софт от производителя, но данное ПО обладает рядом существенных недостатков.

1. Функционал ПО позволяет только считать ID RFID-метки. Изменить ID метки или передать его (передать информацию о метке) в другие программы невозможно, так как данное ПО является закрытым.

2. ПО требует ручной перезагрузки при любом сбое электропитания антенны.

3. ПО не является кросс-платформенным и функционирует только с ОС Windows.

Для обеспечения функций управления RFID-ридером с использованием стороннего контроллера, без прямого подключения к ПК и использования стандартного SDK [16], требуется разработка ново-

го приложения, предназначенного для взаимодействия с устройством.

RFID-технология активно применяется и широко распространена в решении задач железнодорожного транспорта [20] и позволяет создавать системы слежения за локомотивами, пассажирскими и грузовыми вагонами, а также за их составными частями, например, колёсными парами [17, 19]. Такая система помогает улучшить управление логистикой, обеспечить безопасность станционных транспортных процессов, повысить эффективность погрузочно-разгрузочных операций и сократить количество ошибок и задержек [18, 19]. Также RFID-системы применяют в ремонтных предприятиях ОАО «РЖД» для идентификации ремонтируемых деталей, документирования и отслеживания всех этапов обработки [21]. При этом допустимость использования и регламент применения RFID-технологии на железнодорожном транспорте описывается в нормативной документации и ГОСТах [17, 22–25]. Перечисленная научная и нормативная литература обуславливает возможность использования данной технологии в рамках поставленных задач на предприятиях ОАО «РЖД».

Предлагаемое решение располагается на производственной базе ПМС-186 (рис. 1). Ридеры устанавливаются в непосредственной близости (1,5–2 м) от путей, по которым перемещается различная техника с установленными метками. Все данные собираются в диспетчерском пункте базы по локальной сети [16].

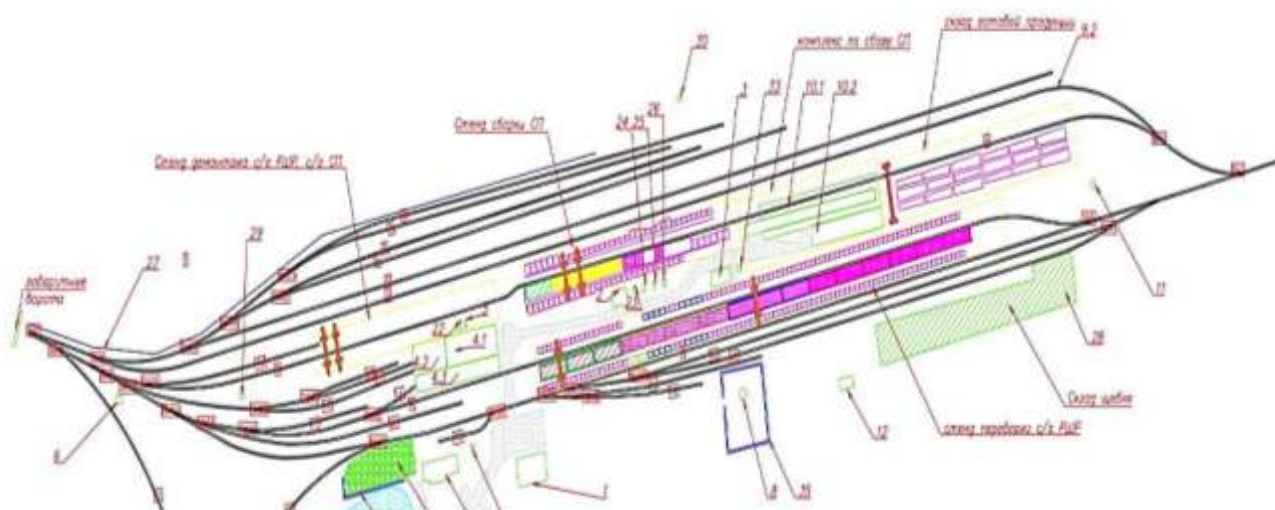


Рис. 1. Схема производственной базы ПМС-186

Разработка программного обеспечения

Для работы с устройством разработано техническое решение, состоящее из аппаратно-программного комплекса, включающего в себя микрокомпьютер с ARM-процессором и специализированное программное обеспечение, разработанное на языке программирования JavaScript и реализуемое на программном сервере Node-Red. Подключение разработанной системы осуществляется посредством конвертера с промышленным интерфейсом RS-485, опрос устройства проходит по протоколу Modbus RTU. Проблемы, обозначенные в пункте 2, были решены с помощью специализированного алгоритма, реализованного в программной среде Node-Red. Данное решение основано на симуляции работы триггера, используемого в оригинальном демонстрационном ПО [16]. Для этого проведен анализ функционирования демонстрационного ПО, в результате чего была получена последовательность сервисных сообщений, отправляемых им для подключения к RFID-антенне.

На основе проведенного анализа работы заводского ПО разработан программный модуль его симуляции (рис. 2), представляющий собой правильно сформированный запрос на подключение к устройству по протоколу Modbus [16]. Запрос реализован в виде строки последовательности значимых байтов, инициализируемой в приложении с помощью узлов Inject. Далее, с помощью преобразований в узлах buffer-maker [10], настроенных специальным образом (рис. 3), формируется сервисное сообщение в виде буфера байтов. Это сообщение служит в качестве оригинального программного триггера для автоматического переключения антенны (рис. 3).

Параметр type узла buffer-maker определяет тип входящей в узел переменной. Так как готовый запрос уже записан в шестнадцатеричной системе счисления, в этом параметре необходимо указать значение hex. Параметр length определяется длиной входного сообщения и для запросов на (рис. 4) равен 16 и 20 соответственно.

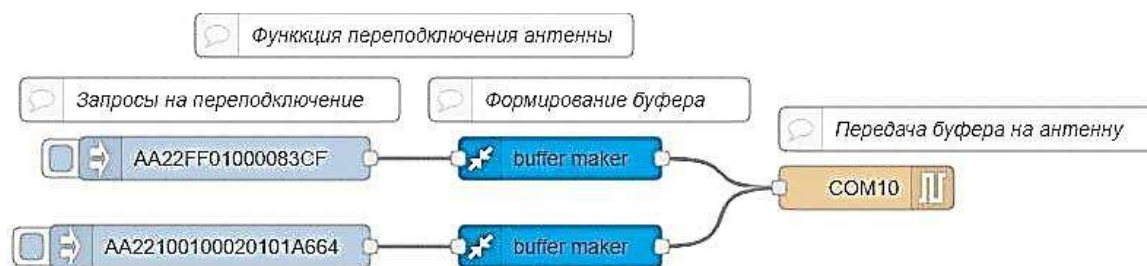


Рис. 2. Формирование запроса на переключение к антенне

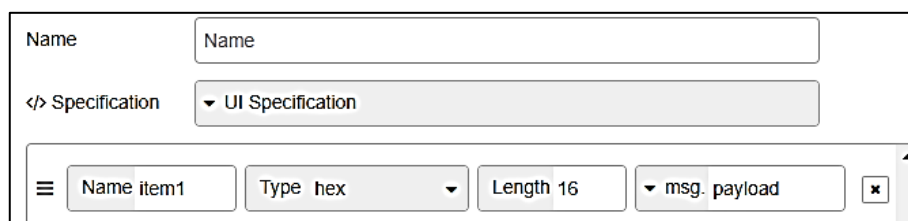


Рис. 3. Настройка узла buffer-maker

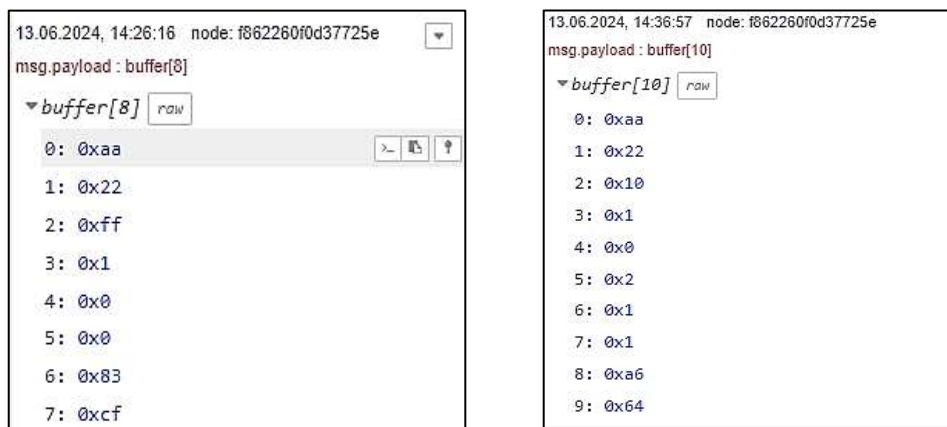


Рис. 4. Буфер команды триггера для переключения антенны

Следующей функциональной задачей, которую требовалось решить, стала программная реализация сборки состава подвижных единиц на путях машинной станции для отображения с помощью графического интерфейса пользователя. Для построения интерфейса используется подсистема Node-Red Dashboard. Однако при формировании состава в алгоритме программы возникает проблема определения направления, с которого прибыл или отправился поезд. Так как вагоны и путевая техника могут прибывать и отправляться с различных сторон, то простой анализ того, с какой антенны пришёл сигнал, приведёт к некорректному отображению информации у диспетчера. Решением данной проблемы является алгоритм создания редактируемого массива поездов с наличием счётчиков пришедших сигналов и их анализом совместно с положением вагона в массиве. Рассмотрим фрагмент ПО, реализующего данный алгоритм (рис. 5).

На рис. 5 показан блок узлов, обрабатывающий сообщения с антенны и направляющий их в последующие узлы в зависимости от прибывшего вагона. Узел

триггер необходим для задержки сообщений с антенны, так как частота её считывания значительно превышает скорость передвижения вагона в зоне считывания.

На рис. 6 показан блок узлов, отвечающих за подсчёт количества сигналов, пришедших для каждого отдельного вагона. Счётчик производит подсчёт от нуля до единицы, затем происходит его сброс. Далее идёт блок с функцией, обрабатывающей массив с вагонами по различным условиям: счётчику вагона и его положению или отсутствию в массиве состава. Фрагмент функции представлен на рис. 7.

Далее этот обработанный массив отправляется в dashboard и чат-бот Telegram. Созданный алгоритм позволяет отслеживать неограниченное количество вагонов на одном пути, для реализации алгоритма на него необходимо установить две антенны – в начале и в конце. Также добавлена возможность сохранять данные о составах на всех путях в файлы приложения Excel, что необходимо для быстрого и удобного формирования отчётных документов диспетчера путевой машинной станции. Пример формы отчёта представлен на рис. 8.



Рис. 5. Алгоритм создания редактируемого массива поездов



Рис. 6. Подсчет сигналов для каждого отдельного вагона

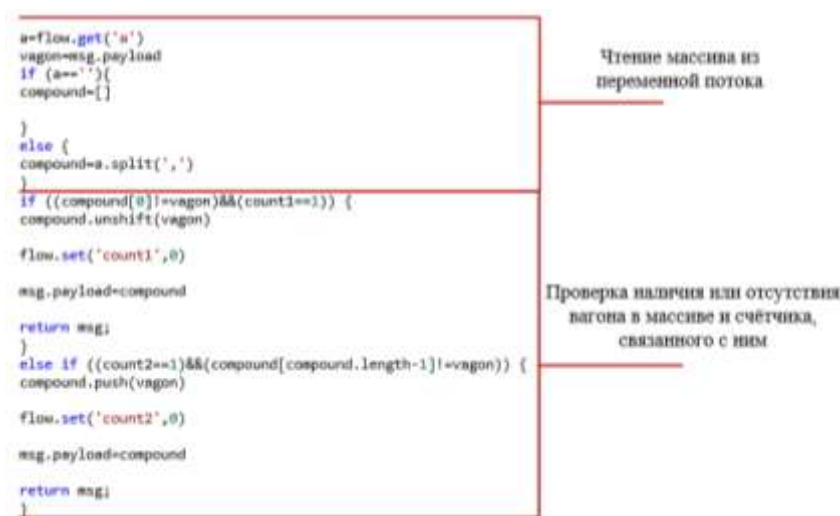


Рис. 7. Фрагмент функции со счётчиком и положением вагона

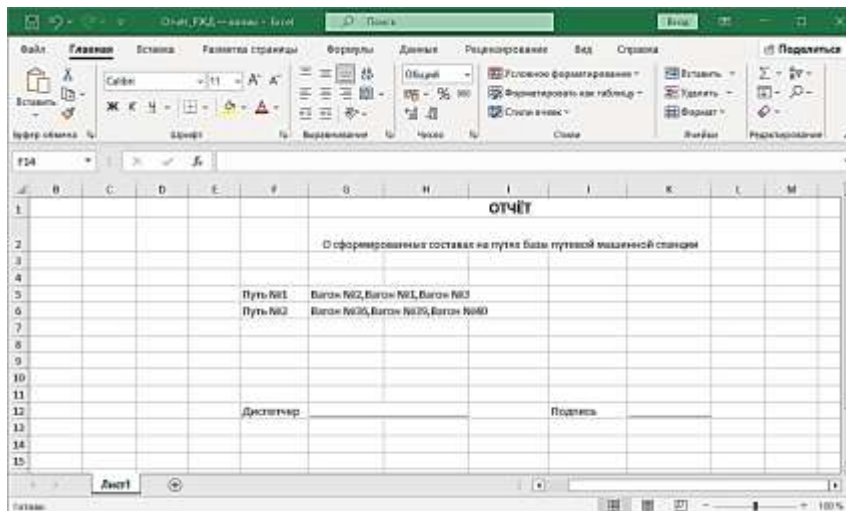


Рис. 8. Формирование отчётных документов

Заключение

В рамках производственно-научного проекта была разработана оригинальная система контроля положения подвижных единиц на путях ПМС, учитывающей специфику работы данной станции, с применением новейших технологий и методов в разработке системы контроля. Это позволило создать систему, обладающую новым уникальным функционалом (формирование виртуального состава, оценка загруженности конкретного пути, онлайн- и офлайн-мониторинг путей через кросс-платформенные приложения) при рациональной стоимости реализации и внедрения.

На основании полевых испытаний и анализа записанных данных сделан вывод о том, что предложенная система является наиболее подходящей на данном уровне развития науки и техники.

Разработанный аппаратно-программный комплекс, включающий в себя четыре ридера и АРМ со специализированным ПО [16], уже успешно прошел полевые испытания на путях производственной базы ПМС-186, где производилось тестирование на 20 различных подвижных единицах с индивидуальными RFID-метками.

В ходе проведения полевых испытаний разработанного прототипа (рис. 9) производилось сравнение временных показателей работы сотрудников ПМС, в результате были зафиксированы следующие положительные изменения.

1. Повышение скорости маневровой работы минимум в 2 раза.
2. Сокращение времени принятия решений руководителем маневровой работы на 50 %.
3. Сокращение времени на составление плана маневровых передвижений, необходимых для выполнения текущих задач.
4. Сокращение времени на оформление грузовых документов.

Ожидаемые эффекты от внедрения: снижение затрат на аренду маневровых локомотивов на 30 % за счёт повышения скорости маневровой работы; повышение качества маневровой работы; ускорение процесса формирования хозяйственных поездов и перемещения вагонов к месту погрузки/выгрузки.

Следующий этап исследований – тестирование комплексной системы мониторинга на всей базе путевой машинной станции. Применение данной системы возможно в других сферах на различных объектах транспортной отрасли.



Фрагмент графического интерфейса пользователя

Рис. 9. Демонстрация работы демо-версии программного обеспечения при проведении опытных испытаний на ПМС-186

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Node-Red Dashboard // tech.scargill.net : официальный сайт. URL : <https://tech.scargill.net/node-red-dashboard-thoughts/> (дата обращения: 18.09.2024).
2. Node.js. // nodejs.org : официальный сайт. 2017. URL : <https://nodejs.org/> (дата обращения: 18.09.2024).
3. Панели инструментов и методы пользовательского интерфейса для Node-Red // noderedguide.com : официальный сайт. URL : <https://noderedguide.com/lecture-7-dashboards-and-ui-techniques-for-node-red/> (дата обращения: 18.09.2024).
4. Соловьев В.А., Малышева О.А. Автоматизация технологических процессов : учебное пособие. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017.
5. Гуляев А.В., Тен Е.Е., Фокин Д.С. Проектирование человекомашинного интерфейса и программирование графических терминалов в Vijeo Designer : учебное пособие. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2021. 77 с.
6. Справка о ботах в Телеграм // core.telegram.org : официальный сайт. 2023. URL : <https://core.telegram.org/bots/faq#why-doesn-39t-my-bot-see-messages-from-other-bots> (дата обращения: 18.09.2024).
7. RFID-считыватель с антенной небольшой дальности CLOU CL7206B6 // rfid-scan.ru : официальный сайт. 2022. URL : https://rfid-scan.ru/catalog/rfid_schityvateli_metok/rfid_monobloki/18266/ (дата обращения: 18.09.2024).
8. Гуляев А.В., Тен Е.Е., Фокин Д.С. Программирование логических контроллеров в среде CoDeSys для автоматизированных систем управления : учебное пособие. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2022. 64 с.
9. RFID-метка UHF корпусная Syndicate HT11025, H3, 110×25×13 мм // rfid-scan.ru : официальный сайт. URL : https://rfid-scan.ru/catalog/rfid_metki/korpusnye/18584/ (дата обращения: 18.09.2024).
10. Node-Red-contrib-buffer-parser // flows.nodered.org : официальный сайт. URL : <https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-buffer-parser> (дата обращения: 18.09.2024).
11. Node-Red-writing functions // flows.nodered.org : официальный сайт. URL : <https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-buffer-parser> (дата обращения: 18.09.2024).
12. Гуляев А.В., Тен Е.Е., Фокин Д.С. Программирование логических контроллеров в программной среде SoMachine для электротехнических систем с автоматическим управлением : учебное пособие. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017.
13. Raspberri Pi. URL : <https://www.raspberrypi.org/> (дата обращения: 18.09.2024).
14. RS485: принцип действия, организация работы // pue8.ru : официальный сайт. URL : <https://pue8.ru/silovaya-elektronika/451-interfejs-rs-485.html> (дата обращения: 18.09.2024).
15. CLOU CL7206B6 (V1.0.1) // Integrated Fixed Reader User Manual. URL : <https://rfid-scan.ru/upload/iblock/c65/c65593b40a8bc4f21767b214005be9f5.pdf> (дата обращения: 10.10.2024).
16. Дистанционный контроль положения подвижных единиц на путях базы путевой машинной станции / А.М. Березнев, А.В. Гуляев, Е.Е. Тен, В.О. Мамаев // Электропривод на транспорте и в промышленности : материалы III Всероссийской научно-практической конференции (посвящается 60-летию кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика»). Хабаровск, 19–20 октября 2023 г. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2023. С. 94–101. EDN CFKLZH.
17. Железнодорожный транспорт // Технологии RFID-идентификации : официальный сайт. URL : <https://isbcrfid.ru/applications/trains/> (дата обращения: 20.10.2024).
18. Кагадий И.Г., Ермаков С.Г. Автоматизированный контроль перемещения тормозных башмаков на железнодорожном транспорте: применение RFID-технологии при закреплении подвижного состава // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2024. № 2(38). С. 77–83. doi:10.20295/2413-2527-2024-238-77-83
19. Корягин Д.В. Применение RFID-технологии на железнодорожном транспорте // Наука и техника транспорта. 2021. № 4. С. 78–80. EDN HAZVKY. doi:10.53883/20749325_2021_04_78
20. Ларионова Г.С., Чечерина Е.А., Иванова С.О. Инновационные технологии на железнодорожном транспорте // Концепт : научно-методический электронный журнал. 2015. Т. 13. С. 4176–4180. URL : <http://e-koncept.ru/2015/85836.htm> (дата обращения: 18.09.2024).
21. Цинерт Д. Модернизация российских железных дорог // Control Engineering Россия. 2014. № 1. С. 52–63
22. Принята серия стандартов на испытания RFID-систем // Росстандарт. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии : официальный сайт. URL : https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/presscenter/news?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNR_r00ABXczAAZhY3Rpb24AAAABAA5zaW5nbGVOZXdzVmllldwACaWQAAAAABAAQ4MzcAAAdfX0VPRl9f&portal:componentId=88beae40-0e16-414c-b176-d0ab5de82e16 (дата обращения: 20.10.2024).
23. ГОСТ Р 59389.1–2021 (ИСО/МЭК 18046-1:2011) Информационные технологии. Методы эксплуатационных испытаний устройств радиочастотной идентификации. Ч. 1. Методы эксплуатационных испытаний систем радиочастотной идентификации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 августа 2021 г. № 748-ст.
24. ГОСТ Р 59389.2–2021 (ИСО/МЭК 18046-2:2020) Информационные технологии. Методы эксплуатационных испытаний устройств радиочастотной идентификации. Ч. 2. Методы эксплуатационных испытаний устройства считывания/опроса : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 августа 2021 г. № 748-ст.
25. ГОСТ Р 59389.4–2021 (ИСО/МЭК 18046-4:2015) Информационные технологии. Методы эксплуатационных испытаний устройств радиочастотной идентификации. Ч. 4. Методы эксплуатационных испытаний ворот радиочастотной идентификации, применяемых в библиотеках : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 августа 2021 г. № 748-ст.

REFERENCES

1. Node-Red Dashboard // tech.scargill.net : ofitsial'ny sait. URL : <https://tech.scargill.net/node-red-dashboard-thoughts> (data obrasheniya 18.09.2024).
2. Node.js. // nodejs.org : ofitsial'ny sait. 2017. URL : <https://nodejs.org/> (data obrasheniya 18.09.2024).
3. Paneli instrumentov i metody pol'zovatel'skogo interfeisa dlya Node-Red [Toolbars and user interface methods for Node-Red] // noderedguide.com : ofitsial'ny sait. URL: <https://noderedguide.com/lecture-7-dashboards-and-ui-techniques-for-node-red/> (data obrasheniya: 18.09.2024).
4. Solovyov V.A., Malysheva O.A. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov [Automation of technological processes] : uchebnoye posobiye. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2017.
5. Gulyaev A.V., Ten E.E., Fokin D.S. Proektirovaniye chelovekomachinnogo interfeisa i programirovaniye graficheskikh terminalov v Vijeo Designer [Designing a human-machine interface and programming graphical terminals in Vijeo Designer] : uchebnoye posobiye. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2021. 77 s.

6. Spravka o botakh v Telegram [Reference about bots in Telegram] // core.telegram.org : ofitsial'ny sait. 2023. URL : <https://core.telegram.org/bots/faq#why-doesn-39t-my-bot-see-messages-from-other-bots> (data obrasheniya 18.09.2024).
7. RFID-schityvatel' s antennoj nebol'shoy dal'nosti CLOU CL7206B6 [RFID reader with short-range antenna CLOU CL7206B6] // rfid-scan.ru : ofitsial'ny sait. 2022. URL : https://rfid-scan.ru/catalog/rfid_schityvateli_metok/rfid_monobloki/18266/ (data obrasheniya 18.09.2024).
8. Gulyaev A.V., Ten E.E., Fokin D.S. Programirovaniye logicheskikh kontrollerov v srede CoDeSys dlya avtomatizirovannykh system upravleniya [Programming logic controllers in the CoDeSys environment for automated control systems]: uchebnoye posobiye. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2022. 64 s.
9. RFID-metka UHF korpusnaya Syndicate HT11025, H3, 110x25x13 mm [RFID UHF case label Syndicate HT11025, H3, 110x25x13 mm] // rfid-scan.ru : ofitsial'ny sait. URL : https://rfid-scan.ru/catalog/rfid_metki/korpusnye/18584/ (data obrasheniya 18.09.2024).
10. Node-Red-contrib-buffer-parser // flows.nodered.org : ofitsial'ny sait. URL : <https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-buffer-parser> (data obrasheniya 18.09.2024).
11. Node-Red-writing functions // flows.nodered.org : ofitsial'ny sait. URL : <https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-buffer-parser> (data obrasheniya 18.09.2024).
12. Gulyaev A.V., Ten E.E., Fokin D.S. Programirovaniye logicheskikh kontrollerov v programmoj srede SoMachine dlya elektrotekhnicheskikh system s avtomaticheskim upravleniyem [Programming of logic controllers in the SoMachine software environment for electrical systems with automatic control] : uchebnoye posobiye. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2017.
13. Raspberri Pi. URL : <https://www.raspberrypi.org/> (data obrasheniya 18.09.2024).
14. RS485: printsip dejstviya, organizatsiya raboty [RS485: principle of operation, organization of work] // pue8.ru : ofitsial'ny sait. URL : <https://pue8.ru/silovaya-elektronika/451-interfejs-rs-485.html> (data obrasheniya 18.09.2024).
15. CLOU CL7206B6 (V1.0.1) Integrated Fixed Reader User Manual. URL : <https://rfid-scan.ru/upload/iblock/c65/c65593b40a8bc4f21767b214005be9f5.pdf> (data obrasheniya 10.10.2024).
16. Dstantsionny kontrol' polozheniya podvizhnykh yedinit na putyakh bazy putevoy mashinnoy stantsii [Remote control of the position of mobile units on the tracks of the base of the track machine station] / A.M. Bereznev, A.V. Gulyaev, E.E. Ten, V.O. Mamaev // Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti : materialy III Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (posvyashchaya 60-letiyu kafedry «Elektrotehnika, elektronika i elektromekhanika»), Khabarovsk, 19–20 oktyabrya 2023 g. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2023. S. 94–101. EDN CFKLZH.
17. Zhelenodorozny transport [Railway transport] // Technologii RFID-identifikatsii : ofitsialny sait. URL : <https://isbc-rfid.ru/applications/trains/> (data obrasheniya 20.10.2024).
18. Kagady I.G., Ermakov S.G. Avtomatizirovanny kontrol' peremesheniya tormoznykh bashmakov na zheleznodorozhnom transporte: primeneniye RFID-tekhnologii pri zakreplenii podvizhnogo sostava [Automated control over transference of brake shoes in railway transport: use of RFID-technology when fixing the rolling stock] // Intellektual'nye tekhnologii na transporte. 2024. № 2(38). S. 77–83. doi:10.20295/2413-2527-2024-238-77-83
19. Koryagin D.V. Primeneniye RFID-tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte [Application of RFID technology in railway transport] // Nauka i tekhnika transporta. 2021. № 4. S. 78–80. https://doi.org/10.53883/20749325_2021_04_78
20. Larionova G.S., Checherina E.A., Ivanova, S.O. Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte [Innovative technologies in railway transport] // Kontsept : nauchno-metodicheskij elektronny zhurnal. 2015. T. 13. S. 4176–4180. URL : <http://e-koncept.ru/2015/85836.htm> (data obrasheniya 18.09.2024).
21. Zineert D. Modernizatsiya rossijskikh zheleznykh dorog [Modernization of Russian railways] // Control Engineering Russia. 2014. № 1. S. 52–63.
22. Prinyata seriya standartov na ispytaniya RFID-sistem [A series of standards on testing RFID systems has been adopted] // Rosstandart. Federal'noye Agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii : ofitsial'ny sait. URL : https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/presscenter/news?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_rO0ABXczAAZhY3Rpb24AAAAABAA5zaW5nbGVOZXdzVmllldwACaWQAAAAABAAQ4MzcxAAdfX0VPRI9f&portal:componentId=88beae40-0e16-414c-b176-d0ab5de82e16 (data obrasheniya 20.10.2024).
23. GOST R 59389.1–2021 (ISO/MEC 18046-1:2011) Informatsionnye tekhnologii. Metody ekspluatatsionnykh ispytaniy ustroystv radiochastotnoj identifikatsii. Ch. 1. Metody ekspluatatsionnykh ispytaniy sistem radiochastotnoj identifikatsii [GOST R 59389.1–2021 (ISO/MEC 18046-1:2011) Information technologies. Methods for operational testing of radio frequency identification devices. Part 1. Methods for operational testing of radio frequency identification systems] : utverzhden i vveden v deistviye Prikazom Federal'nogo Agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 20 avgusta 2021 g. № 748-st.
24. GOST R 59389.2–2021 (ISO/MEC 18046-2:2020) Informatsionnye tekhnologii. Metody ekspluatatsionnykh ispytaniy ustroystv radiochastotnoj identifikatsii. Ch. 2. Metody ekspluatatsionnykh ispytaniy ustroystva schityvaniya/oprosa [GOST R 59389.2–2021 (ISO/MEC 18046-2:2020) Information technologies. Methods for operational testing of radio frequency identification devices. Part 2. Methods for operational testing of reading/interrogation devices] : utverzhden i vveden v deistviye Prikazom Federal'nogo Agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 20 avgusta 2021 g. № 748-st.
25. GOST R 59389.4–2021 (ISO/MEC 18046-4:2015) «Informatsionnye tekhnologii. Metody ekspluatatsionnykh ispytaniy ustroystv radiochastotnoj identifikatsii. Ch. 4. Metody ekspluatatsionnykh ispytaniy vorot radiochastotnoj identifikatsii, primenyaemykh v bibliotekakh [GOST R 59389.4–2021 (ISO/MEC 18046-4:2015) Information technologies. Methods for operational testing of radio frequency identification devices. Part 4. Methods for operational testing of radio frequency identification gates used in libraries] : utverzhden i vveden v deistviye Prikazom Federal'nogo Agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 20 avgusta 2021 g. № 748-st.

Информация об авторах

А.М. Березнев – студент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика»;
Н.О. Жиров – студент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика»;
А.В. Гуляев – доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика».

Information about the authors

A.M. Bereznev – Student of the Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics;
N.O. Zhiron – Student of the Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics;
A.V. Gulyaev – Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics.

Статья поступила в редакцию 03.07.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.
The article was submitted: 03.07.2024; approved after reviewing: 17.10.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

Научная статья
УДК 621.3.07

МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА «ТОКОВЫЙ КОРИДОР» ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ СО СДВОЕННОЙ СТАТОРНОЙ ОБМОТКОЙ

Кабалык Юрий Сергеевич¹, Жаков Александр Станиславович²

^{1,2} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

¹ kabalyk@festu.khv.ru

² zhakov2206@gmail.com

Аннотация. Рассмотрен способ модернизации системы управления асинхронным двигателем с целью снижения пульсаций электромагнитного момента на валу. Для этого классический метод управления «Токовый коридор» доработан подсистемой обнаружения синхронизации пульсаций тока. Такой метод позволяет снизить пульсации электромагнитного момента в асинхронном двигателе со сдвоенной статорной обмоткой. Снижение пульсаций электромагнитного момента, в свою очередь, приводит к повышению энергетической эффективности асинхронного двигателя. Для исследования разработанного метода было проведено компьютерное моделирование асинхронного двигателя с системой управления. Критерием эффективности служил коэффициент гармонических искажений суммы токов в одноименных обмотках статора. Результаты моделирования показывают эффективность разработанной системы, а именно снижение пульсаций суммы токов одноименных обмоток, что приводит к снижению пульсаций электромагнитного момента.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, широтно-импульсная модуляция, токовый коридор, сдвоенная статорная обмотка, гармонические искажения

Original article

MODERNIZATION OF THE «CURRENT CORRIDOR» METHOD FOR CURRENT REGULATION IN AN INDUCTION MOTOR WITH DOUBLE STATOR WINDING

Kabalyk Iurii S.¹, Zhakov Aleksandr S.²

^{1,2} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

¹ kabalyk@festu.khv.ru

² zhakov2206@gmail.com

Abstract. A method for upgrading the control system of an induction motor for reduce electromagnetic torque ripples is considered. For this purpose, the classic «Current Corridor» control method has been modified with a subsystem for detecting synchronization of current ripples. This method makes it possible to reduce electromagnetic torque ripples in an induction motor with a dual stator winding. Reducing the electromagnetic torque ripples, in its turn, leads to an increase in the energy efficiency of the induction motor. To research the developed method, computer simulation of an induction motor with a control system was completed. The efficiency criterion was the coefficient of harmonic distortion of the currents sum in the same name stator windings. The simulation results show the effectiveness of the developed system, and more specifically, a reduction in the currents sum ripples of the same name stator windings, which leads to a decrease of the electromagnetic torque ripples.

Keywords: induction motor, pulse width modulation, current corridor, double stator winding, harmonic distortion

При использовании частотно-регулируемого привода с асинхронными тяговыми двигателями необходимо регулировать частоту и амплитуду тока статора в зависимости от принятого закона управления. Источником тока статора является автономный инвертор напряжения (АИН), питаемый от источника постоянного напряжения. Управление АИН заключается в открытии и закрытии определенных ключей (транзисторов) АИН. При открытии ключа (транзистора) АИН соответствующий вывод статора подключается к одному из уровней входного напряжения.

Существует множество методов управления АИН, одним из которых является метод релейной модуляции, получивший название «Токовый коридор» [1, с. 77]. Такой метод позволяет добиваться большой скорости регулирования силы тока статора, что положительно сказывается на динамических качествах привода [2]. Суть метода рассмотрим на примере системы управления асинхронным двигателем с автономным инвертором напряжения, подключенным к статору асинхронного двигателя (рис. 1).

В системе (рис. 1, а) элемент СЭ на основе сигнала частоты вращения ротора АТД задает необходимое значение величины тока статора – сигнал i_s^* . В элементе сравнения из сигнала i_s^* вычитается

реальное значение тока статора i_s , и разница этих сигналов Δi_s поступает на релейный элемент (РЭ), который реализует релейную функцию. Элемент РЭ обладает параметром δ , имеющим ту же размерность, что и Δi_s , и численно равный единицам процентов от амплитуды сигнала i_s^* . Алгоритм работы РЭ описывается следующими функциями:

$$\begin{cases} \text{если } \Delta i_s = +\delta, \text{ то } u_{s*} = -1; \\ \text{если } \Delta i_s = -\delta, \text{ то } u_{s*} = +1. \end{cases} \quad (1)$$

Выходной сигнал РЭ u_{s*} является управляющим для АИН: когда сигнал u_{s*} равен -1 , то АИН подключает соответствующую обмотку статора к отрицательному входному напряжению; когда сигнал u_{s*} равен $+1$, то АИН подключает соответствующую обмотку статора к положительному входному напряжению.

В момент времени t_0 система начинает работать, и АИН подает положительное напряжение на обмотку статора (кривая u_s). В результате ток статора (кривая i) начинает увеличиваться и в момент времени t_1 достигнет значения $i^* + \delta$. В этот момент времени (t_1) величина Δi_s достигает значения $+\delta$, и в соответствии с уравнениями (1) напряжение на выходе поменяется на отрицательное. На промежутке времени $t_1 - t_2$ благодаря отрицательному напряжению ток статора будет снижаться и в момент времени t_2 достигнет значения $i^* - \delta$, в результате чего напряжение на выходе АИН поменяется на положительное. Далее ток начнет расти, пока не достигнет величины $i^* + \delta$, после чего процессы повторяются. Таким образом, величина тока статора не отличается от заданной более чем на величину $\pm \delta$.

Вышеприведенный текст описывает работы привода с классическим асинхронным двигателем, у которого статорная обмотка выполнена в виде

трехфазной звезды, а обмотка ротора – короткозамкнутая. При работе таких двигателей от АИН наблюдается повышенное значение пульсаций электромагнитного момента [3, 4], что негативно сказывается на характеристиках привода. Для снижения пульсаций электромагнитного момента можно использовать тяговый привод на основе асинхронного двигателя с двойной статорной обмоткой [5]. В таком двигателе, вследствие использования единой системы управления, высшие гармоники (пульсации) тока статора в двух независимых обмотках статора сдвинуты относительно друг друга на 180 электрических градусов или, иными словами, находятся в противофазе. В результате происходит взаимная компенсация пульсаций магнитного поля статора, что приводит к снижению пульсаций электромагнитного момента и повышению энергоэффективности привода [6, 7].

Использование метода «Токовый коридор» на асинхронном двигателе с двойной статорной обмоткой имеет следующую проблематику. Для достижения компенсации высших гармоник магнитного поля статора необходимо, как сказано выше, чтобы пульсации тока статора в одноименных фазах первой и второй статорной обмотки находились в противофазе. Однако при использовании метода «Токовый коридор» частота и фаза пульсаций тока статора слабо зависят от работы системы управления, а формируются в зависимости от напряжения инвертора, сопротивления обмоток статора и принятой величины δ . Таким образом, используя классический способ управления «Токовый коридор», невозможно добиться эффекта взаимной компенсации пульсаций магнитного потока в статорных обмотках.

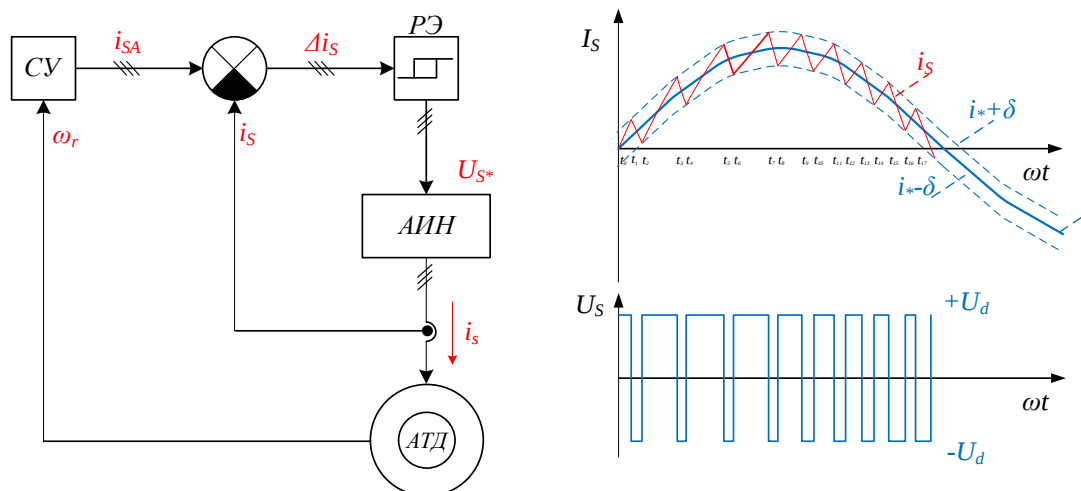


Рис. 1. Система управления асинхронным приводом по методу «Токовый коридор»:
а – структурная схема системы; б – процесс генерации тока статора в системе управления
«Токовый коридор» СУ – система задания тока статора; ЭС – элемент сравнения; РЭ – релейный элемент; АИН – автономный инвертор напряжения; АТД – асинхронный двигатель

С целью реализации условия взаимной компенсации пульсаций магнитного потока в статорных обмотках

ках можно использовать усовершенствованный способ управления «Токовый коридор» [8]. При использовании такого способа в системе осуществляется непрерывный контроль за суммой токов в одноименных фазах статора. Из этой суммы токов выделяется сигнал отклонения суммы токов от заданной величины, для фазы A он определяется по формуле

$$S_{\Sigma\delta} = |(i_{A1} + i_{A2}) - 2i_{A*}|, \quad (2)$$

где i_{A1} и i_{A2} – мгновенные значения токов в первой и второй обмотках фазы A , соответственно; i_{A*} – заданное значение тока статора (мгновенное).

Когда пульсации тока в одноименных фазах преобладают в противофазе, то сигнал $S_{\Sigma\delta}$ находится в области низких значений, а при полной взаимокомпенсации – равен нулю. Если же пульсации тока в одноименных фазах синфазны, то сигнал $S_{\Sigma\delta}$ достигает больших значений – вплоть до 2δ . Таким образом, большие значения сигнала $S_{\Sigma\delta}$ свидетельствуют о приближении пульсаций тока в одноименных обмотках к синфазности. Для исключения момента синфазности пульсаций тока в одноименных обмотках статора система при достижении сигнала $S_{\Sigma\delta}$ заданной величины $S_{\Sigma\delta MAX}$ отключает подачу сигналов на один из полумостов соответствующей фазы. В результате пульсации тока в одной фазе меняют фазу,

что приведёт к большей взаимокомпенсации. Далее по тексту такой метод будет именоваться «метод предотвращения синфазности пульсаций».

На рис. 2, a представлена структурная схема системы управления асинхронным двигателем с двойной статорной обмоткой, в которой реализован метод предотвращения синфазности пульсаций в фазах статора, описанный выше.

На рис. 2, b при достижении сигналом $S_{\Sigma\delta}$ величины $S_{\Sigma\delta MAX}$ формируется импульс заданной продолжительности, который поступает на соответствующий полумост и отключает его. За промежуток времени, когда транзисторы одного полумоста закрыты, второй полумост продолжает работать и генерировать ток соответствующей фазы. Таким образом, искусственно становится возможным развести по времени фазы пульсаций тока и тем самым достичь взаимокомпенсации магнитных потоков.

Для проверки работоспособности системы (см. рис. 2, a) она была реализована в компьютерной программе схемотехнического моделирования *SimInTech* (рис. 3). В модели системы была принята упрощенная модель обмоток статора асинхронного двигателя в виде последовательных LR -элементов на каждой фазе.

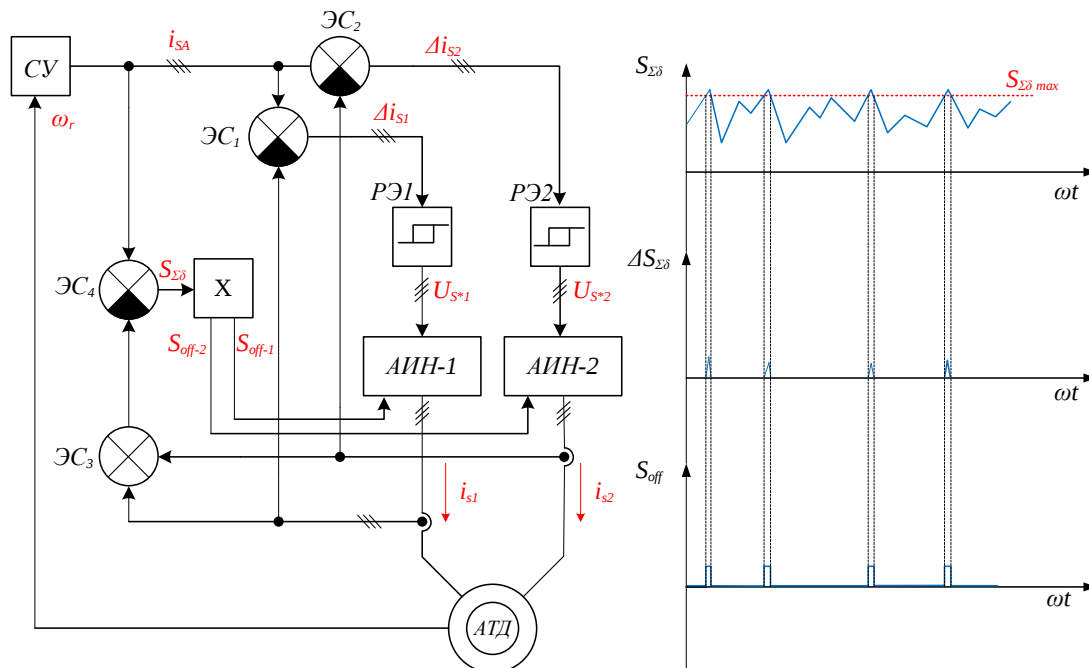


Рис. 2. Система управления асинхронным приводом по методу «Токовый коридор» с двойной статорной обмоткой, в которой реализован метод предотвращения синфазности пульсаций: a – структурная схема системы; b – процесс обнаружения синхронизации импульсов тока в статорных обмотках и генерация сигнала отключения полумостов; CV – система задания тока статора; $ЭC_1, ЭC_2, ЭC_3, ЭC_4$ – элементы сравнения; $PЭ1, PЭ2$ – релейные элементы; $АИН-1, АИН-2$ – автономные инверторы напряжения; $АТД$ – асинхронный двигатель; X – элемент слежения за синхронизацией пульсаций тока в обмотках статора

Для оценки эффективности компенсации пульсаций в системе была добавлена подсистема расче-

та гармонических искажений. За исходный сигнал принята сумма токов фазы *A* первой и второй обмотки статора, поскольку можно считать, что эти токи суммарно создают общий магнитный поток одной фазы, который является частью вращающегося магнитного поля статора в целом. Уровень гармонических искажений определялся по формуле

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}, \quad (3)$$

где I_1 , I_h – гармоники суммы токов одноименных обмоток статора.

На рис. 3 отмечены следующие части общей модели.

1. Упрощенная модель сдвоенной статорной обмотки асинхронного двигателя. Обмотки соединены по схеме «звезда».

2. Автономные инверторы напряжения (АИН),

выполненные в виде источника напряжения, управляемого дискретным сигналом. На выходе АИН может создаваться напряжение одному из трех значений: $+U_d$, 0 , $-U_d$.

3. Система управления автономными инверторами напряжения, реализующая принцип управления «токовый коридор». Система в том числе может реализовать метод предотвращения синфазности пульсаций – отключать один из АИН в случае приближения синхронизации пульсаций одноименных обмоток.

4. Система расчета уровня гармонических искажений. Система рассчитывает величину THD за каждый период переменного напряжения.

На рис. 4 представлены результаты моделирования системы.

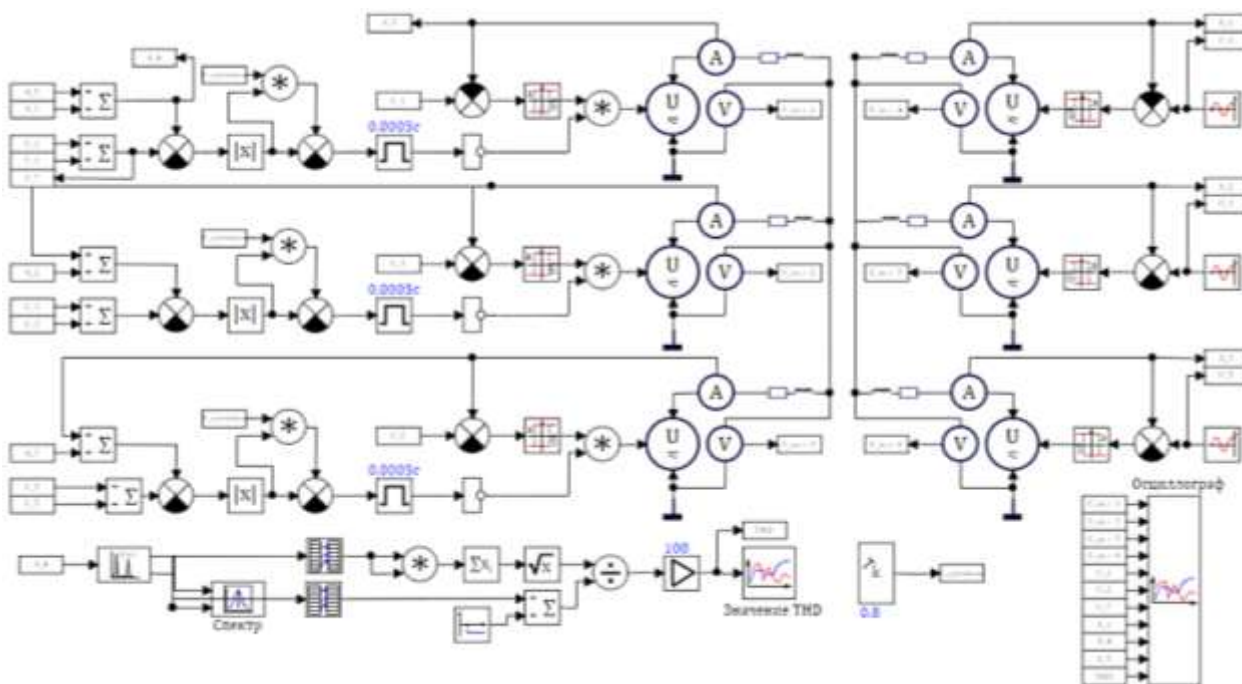


Рис. 3. Упрощенная схема управления сдвоенной статорной обмоткой АД по принципу «токовый коридор»

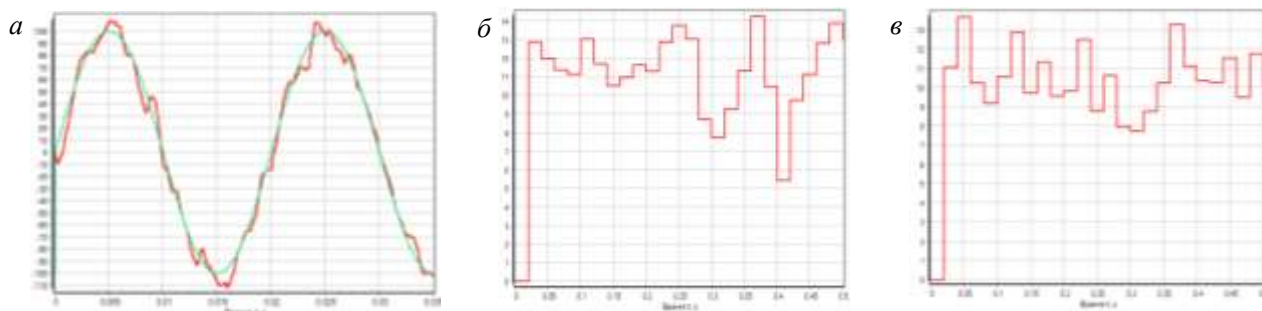


Рис. 4. Осциллограммы работы схемы: *а* – напряжение источника питания, ток на нагрузке; *б* – коэффициент THD без обратной связи; *в* – коэффициент THD при наличии обратной связи

На рис. 4, *а* представлена осциллограмма задающего сигнала i_{A*} и фактического значения тока i_A .

Разность значений этих величин не превышает заданного значения величины δ , что говорит о правильной работе системы «токовый коридор». При отключенном методе предотвращения синфазности пульсаций (рис. 4, б) коэффициент THD непостоянен и изменяет свое значение в широком диапазоне – от 5,4 до 14,2 %. Большой разброс значений THD можно объяснить непостоянством спектра кривой тока, что является особенностью такого метода управления АИН. При включении метода предотвращения синфазности пульсаций значения коэффициента THD снижаются и находятся в диапазоне от 7,7 до 13,6 % (рис. 4, в). Снижение уровня гармонических искажений происходит на относительно небольшую величину. При этом также сохраняется стохастический характер значений THD .

Для наиболее полного понимания эффективности нового алгоритма было проведено исследование его работы при различных значениях δ и $S_{\Sigma\delta MAX}$. При каждом опыте определялось среднее значение THD за промежуток времени 1 с (50 значений). Значения δ принимались в диапазоне от 2 до 20 % величины амплитуды задающего сигнала. Значение параметра $S_{\Sigma\delta MAX}$ зависит от величины δ и принималось в диапазоне от 110 до 190 % от значения принятой при соответствующем эксперименте величины δ . Например, при амплитуде сигнала $i_{A*амп} = 100$ А и величине $\delta = 10\% = 10$ А, значение параметра $S_{\Sigma\delta MAX} = (110...190\%) 10 = 11...19$ А. Результаты исследования представлены в виде трехмерного графика (рис. 5).

Результаты моделирования (рис. 5) показывают,

что при низких значениях величины δ увеличение величины $S_{\Sigma\delta MAX}$ приводит к снижению гармонических искажений THD . В свою очередь, при высоких значениях величины δ увеличение величины $S_{\Sigma\delta MAX}$ приводит к росту гармонических искажений THD . Такой разнонаправленный характер влияния величины $S_{\Sigma\delta MAX}$ можно объяснить следующими особенностями работы системы. При больших значениях величины δ синхронизация пульсаций в одноименных обмотках происходит реже, в результате получается больше времени до срабатывания системы обнаружения синхронизации пульсаций. За этот промежуток времени наблюдаются большие искажения тока, что ухудшает показатель THD . При низких значениях величины δ синхронизация пульсаций в одноименных обмотках происходит чаще, что приводит к более частому срабатыванию системы обнаружения синхронизации пульсаций и, как следствие, – к снижению показателя THD .

Выводы.

Разработан новый способ управления асинхронным двигателем, являющийся модернизацией классического метода «токовый коридор». Применение метода в определенных условиях позволяет снизить пульсации суммы токов в одноименных обмотках, что приводит к снижению пульсаций электромагнитного момента.

Статья подготовлена при поддержке гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта

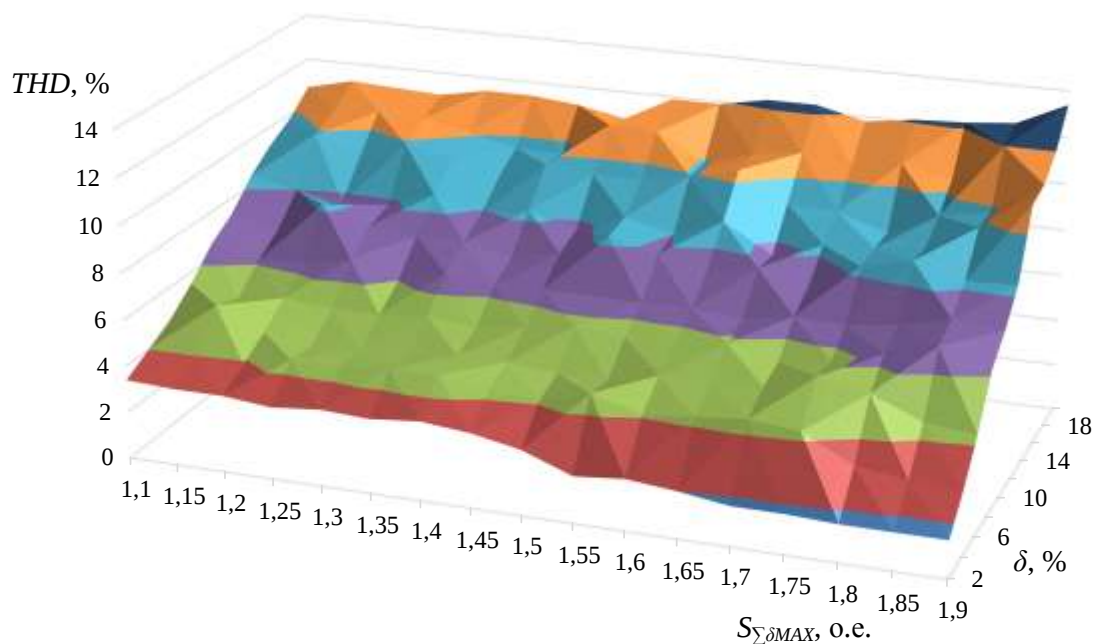


Рис. 5. Изменения значений THD при различных значениях δ и $S_{\Sigma\delta MAX}$

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
2. Torque and Current Control of Induction Motor Drives for Inverter Switching Frequency Reduction / C.-Y. Huang, C.-P. Wei, J.-T. Yu, Y.-J. Hu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. № 52(5). Pp. 1364–1371. URL : <https://doi.org/10.1109/tie.2005.855660>. doi:10.1109/tie.2005.855660
3. Пустоветов М.Ю. Теоретическое исследование пульсаций электромагнитного момента асинхронного тягового двигателя ЭТА-300, питаемого от автономного инвертора тока, при малой скорости вращения ротора // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2000. № 2. С. 54–57.
4. Чередник Ю.Н., Квашнин В.О. Построение и исследование модели системы прямого управления моментом для минимизации пульсаций электромагнитного момента // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2012. № 3(19). С. 380–382. EDN QNRQUH.
5. Патент № 2728283 С1 Российская Федерация, МПК H02P 25/22, H02K 11/33. Электропривод с асинхронным

двигателем : № 2019135411 : заявл. 05.11.2019 : опубл. 29.07.2020 / Ю.С. Кабалык ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС). EDN LEYYPY.

6. Кабалык Ю.С. Снижение пульсаций вращающего момента асинхронных двигателей при питании от инвертора напряжения // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 1(85). С. 7–12. EDN MFETRQ.

7. Кабалык Ю.С. Исследование асинхронного электрического привода с пониженными пульсациями электромагнитного момента // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 4(84). С. 56–64. EDN IAZPXD. doi:10.46973/0201-727X2021456

8. Жаков А.С., Кабалык Ю.С. Разработка метода управления «токовый коридор» для асинхронных двигателей с двойной статорной обмоткой // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI в. 2023. Т. 1. С. 77–81. EDN EZSYYP.

REFERENCES

1. Usoltsev A.A. Chastotnoye upravlenie asinhronnymi dvigatelyami [Frequency control of asynchronous motors]. Sankt-Peterburg : SPbGU ITMO, 2006. 94 s.
2. Torque and Current Control of Induction Motor Drives for Inverter Switching Frequency Reduction / C.-Y. Huang, C.-P. Wei, J.-T. Yu, Y.-J. Hu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. № 52(5). Pp. 1364–1371. URL : <https://doi.org/10.1109/tie.2005.855660>. doi:10.1109/tie.2005.855660
3. Pustovetov M.Yu. Teoreticheskoye issledovaniye pulsatsii elektromagnitnogo momenta asinkhronnogo tyagovogo dvigate-lya ETA-300, pitayemogo ot avtonomnogo invertora toka, pri maloy skorosti vrascheniya [Theoretical study of pulsations of the electromagnetic torque of the ETA-300 asynchronous traction motor, powered by an autonomous current inverter, at low rotor speed] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya. 2000. № 2. S. 54–57.
4. Cherednik Yu.N., Kvashnin V.O. Postroyeniye i issledovaniye modeli sistemy pryamogo upravleniya momentom dlya minimizatsii pul'satsiy elektromagnitnogo momenta [Construction and study of a model of a direct torque control system to minimize electromagnetic torque pulsations] // Elektromekhanicheskiye i energo-sberegayushkiye sistemy. 2012. № 3(19). S. 380–382. EDN QNRQUH.
5. Patent № 2728283 C1 Russian Federation, IPC H02P 25/22, H02K 11/33. Elektroprivod s asinkhronnym dvigatelem [Electric drive with asynchronous motor] : № 2019135411: yayavl.

05.11.2019 : opubl. 07.29.2020 / Yu.S. Kabalyk ; yayavitel' Federal'noye gosudarstvennoye budzhetnoye obrazova-tel'noye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Dal'nevostochny gosudarstvennyy universitet putej soobsheniya» (DVGUPS). EDN LEYYPY.

6. Kabalyk Yu.S. Snizheniye pul'satsiy vrashchayushchego momenta asinkhronnykh dvigateley pri pitanii ot invertora napryazheniya [Reducing torque pulsations of asynchronous motors when powered by a voltage inverter] // Vestnik transporta Povolzh'ya. 2021. № 1(85). Pp. 7–12. EDN MFETRQ.

7. Kabalyk Yu.S. Issledovaniye asinkhronnogo elektricheskogo privoda s ponizhennymi pul'satsiyami elektromagnitnogo momenta [Study of an asynchronous electric drive with reduced pulsations of the electromagnetic torque] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya. 2021. № 4(84). Pp. 56–64. EDN IAZPXD. doi:10.46973/0201-727X2021456.

8. Zhakov A.S., Kabalyk Yu.S. Razrabotka metoda upravleniya «tokovy koridor» dlya asinkhronnykh dvigateley s dvoynoy statornoj obmotkoy [Development of the «current corridor» control method for asynchronous motors with double stator winding] // Nauchno-tekhnicheskoye i ekonomicheskoye sotrudnichestvo stran ATR v XXI v. 2023. Vol. 1. S. 77–81. EDN EZSYYP.

Информация об авторах

Ю.С. Кабалык – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт железных дорог»;
А.С. Жаков – аспирант кафедры «Транспорт железных дорог».

Information about the authors

Y.S. Kabalyk – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, «Transport of Railways» Department;
A.S. Zhakov – Graduate Student, «Transport of Railways» Department.

Статья поступила в редакцию 20.08.2024; одобрена после рецензирования 16.10.2024; принята к публикации 16.10.2024.
The article was submitted: 20.08.2024; approved after reviewing: 16.10.2024; accepted for publication: 16.10.2024.

Научная статья
УДК 624.072.14

ПАРАМЕТРЫ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ. НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ НА СТАДИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ БАЛОК, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ВЫТЯЖКОЙ СТЕНКИ

Кравчук Евгений Валерьевич¹, Белуцкий Игорь Юрьевич², Кравчук Валерий Андреевич³

¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

^{2,3} Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

¹ 004938@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5419-1365>

² 000177@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3881-2050>

³ 000415@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4101-133>

Аннотация. Представлена методика оптимального проектирования тавра, как исходного элемента двутавра и результаты его экспериментального исследования в составе балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки. Предмет исследования – зависимости геометрических параметров и параметров несущей способности стального тавра и двутавра, а также сопоставительный анализ теоретических выводов о напряженно-деформированном состоянии балок с его результатом, полученным в процессе натурного эксперимента. Объект исследования – стальная балка, предварительно напряженная вытяжкой стенки.

Исследование базируется на методах сопротивления материалов, теории оптимального проектирования поперечных сечений металлических строительных конструкций и практике проведения натурных экспериментальных исследований конструкций. Выполнено оптимальное проектирование тавра и двутавра, установлена взаимосвязь геометрических параметров и параметров несущей способности элементов. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных относительных деформаций в стенке и верхнем пояском листе тавра. На основе теории вероятности определено математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение экспериментальных и среднеарифметических значений относительных деформаций, определена плотность распределения деформаций и доверительный интервал значений.

Теоретические предпосылки о напряженном состоянии тавра посредством вытяжки его стенки, являющегося исходным элементом двутавра, удовлетворительно согласующиеся с результатами натурного экспериментального исследования.

Ключевые слова: предварительное напряжение, вероятностная оценка относительных деформации и напряжений

Original article

PARAMETERS OF LOAD CAPACITY. STRESS AND DEFORMATION AT THE MANUFACTURING STAGE OF STEEL BEAMS PRE-STRESSED BY WALL STRETCHING

Kravchuk Evgenii V.¹, Belutskii Igor Yu.², Kravchuk Valerii A.³

¹ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

^{2,3} Pacific National University, Khabarovsk

¹ 004938@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5419-1365>

² 000177@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3881-2050>

³ 000415@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4101-133>

Abstract. The article presents a methodology for the optimal design of a tee as the initial element of an I-beam and the results of its experimental study as part of a beam prestressed by stretching the wall. The subject of the study is the dependence of the geometric parameters and parameters of the load-bearing capacity of a steel beam and I-beam, as well as a comparative analysis of theoretical conclusions about the stress-strain state of beams with its result obtained in the process of a full-scale experiment. The object of study is a steel beam pre-stressed by stretching the wall.

The research is based on methods of strength of materials, the theory of optimal design of cross sections of metal building structures and the practice of conducting full-scale experimental studies of structures.

The optimal design of the T-beam and I-beam was carried out, the interdependence of the geometric parameters and the parameters of the bearing capacity of the elements was established. A comparison was made of theoretical and experimental relative deformations in the wall and upper belt sheet of the tee. Based on the theory of probability, the mathematical expectation, the standard deviation of experimental and arithmetic mean values of relative deformations were determined, the distribution density of deformations and the confidence interval of values were determined.

Theoretical premises about the stressed state of the tee by stretching its wall, which is the initial element of the I-beam, are in satisfactory agreement with the results of a full-scale experimental study.

Keywords: expected stress, chance evaluation of relative strain and stress

Введение

Повышение долговечности и надежности зданий и сооружений прямо связано с решением основополагающей задачи, заключающейся в создании эффективных строительных конструкций повышенной несущей способности минимальной массы и стоимости. В полной мере этому критерию отвечают стальные тонкостенные балки, предварительно напряженные без затяжек. Из всего многообразия указанных способов предварительного напряжения наиболее эффективным оказывается способ посредством вытяжки тонкой стенки балки, которая в напряженном состоянии присоединяется к «верхнему поясу». После снятия усилий предварительного напряжения в стенке к образовавшемуся тавру присоединяется нижний пояс, остающийся без усилий предварительного напряжения. Представляет интерес соотношение параметров несущей способности тавра и двутавра. Решение этой задачи представлено в настоящей работе.

Все выдающиеся ученые России, от М.В. Ломоносова и Н.С. Стрелецкого, считают, что в процессе работы над той или иной проблемой следует руководствоваться основополагающим принципом: теория сильна практикой. Основой этого принципа является выполнение натурных экспериментов, позволяющих получить наиболее достоверные сведения о физических процессах, происходящих в элементах подвергнутых испытанию. Именно этот критерий положен в основу научно-исследовательских работ по созданию прогрессивных и надежных предварительно напряженных конструкций и сооружений. Самые первые идеи предварительного напряжения были проверены на состоянии живучести речных судов, при создании велосипедов, обжатию обручами бочек для хранения жидкостей. В оборонной отрасли России первые попытки уменьшить диаметр ствола орудия за счет его предварительного напряжения посредством намотки на ствол проволоки предприняты военным инженером А.В. Гадолиным. Об этом достаточно подробно изложено в работе Э.Г. Ратца [1].

Впервые в России практическую проверку предварительно напряженных строительных конструкций, созданные В.Г. Шуховым [2], получили на строительстве павильонов ярмарки в Нижнем Новгороде. Натурный эксперимент, подтверждающий теоретические выводы, позволил Е.И. Белене [3], Ю. Гайдарову [4], В.М. Вахуркину [5], Б.Н. Сперанскому [6], В.В. Бирюлеву [7], А.А. Воеводину [8] и другим сформулировать доказательную базу о надежности и экономической эффективности металлических строительных конструкций, предварительное напряжение в которых создавалось с помощью высокопрочной затяжки.

Совершенствование способов предварительного напряжения и методов экспериментального исследования строительных металлических конструкций нашло отражение в исследованиях И.Г. Клинова [9], М.Н. Лашенко [10], Е.И. Ванштейна [11], А.А. Иодичика [12], В.А. Кравчука и Е.В. Кравчука [13].

К настоящему моменту в практике проведения научно-исследовательских работ нашли применение экспериментальные исследования с помощью станций GPS [14], по критерию собственных колебаний элементов [15], по критерию сейсмической прочности [16], на основе динамической жесткости [17], на основе токов сверхвысоких частот [18] и др.

В 2008 г. под руководством профессора В.И. Коробко в Орловском государственном техническом университете разработан экспериментально-теоретический способ определения коэффициента жесткости решетки металлической ферм. В диссертационном совете при Орловском госуниверситете доложены экспериментальные исследования при оптимизации предварительно напряженных стержневых конструкций с выбором режимов силовых воздействий. Выполняются исследования предварительно напряженных стальных строительных конструкций в Курском государственном университете, Московском государственном строительном университете, Казанском государственном архитектурно-строительном университете и др.

Для обработки результатов натурных экспериментов разработана стройная система аналитических зависимостей, базирующихся на теории вероятности и математической статистике, изложенной в работах В.В. Болотина [19] и его последователей.

Цель работы – показать эффективность предварительного напряжения стальных строительных балок посредством вытяжки их тонкой стенки.

Объект исследования – стальные разрезные предварительно напряженные балки.

Предмет исследования – зависимость геометрических параметров и параметров несущей способности стального тавра и двутавра, а также сопоставительный анализ теоретических выводов о напряженном деформированном состоянии балок с его результатом, полученном в процессе натурального эксперимента.

Модели и методы

Способ предварительного напряжения стальной тонкостенной балки посредством вытяжки в продольном направлении ее тонкой стенки позволяет получить по поперечному сечению тавра напряжения (рис. 1):

– в анкерном верхнем поясе

$$\sigma_{wf} = -\frac{\sigma_0}{(2K+1)}; \quad (1)$$

– верхней зоне стенки

$$\sigma_{wv} = \frac{2K\sigma_0}{(2K+1)}; \quad (2)$$

– нижней зоне стенки

$$\sigma_{wn} = -\frac{\sigma_0 K}{(2K+1)}. \quad (3)$$

где K – коэффициент асимметрии поперечного сечения двутавра; σ_0 – начальные предварительные напряжения стенки балки.

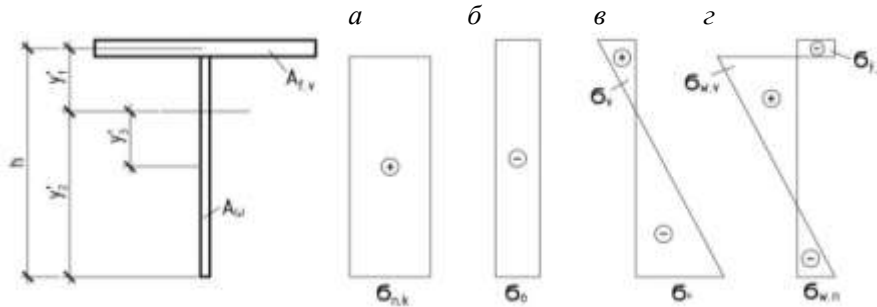


Рис. 1. График распределения предварительных нормальных напряжений по сечению тавра: а – растягивающие нормальные напряжения в стенке балки; б – сжимающие нормальные напряжения в тавре; в – изгибные нормальные напряжения в тавре; г – суммарные напряжения в тавре

Оптимальные параметры тавра и двутавра

Поскольку тавр (рис. 2, а), составленный из стенки A_{wo} и его верхнего поясного листа A_{fo} , является составной частью двутавра (рис. 2, б), целесообразно изучить соотношение параметров несущей способности тавра и двутавра. Поиск базируется на одном из методов оптимального проектирования сечений строительных металлических конструкций, в основу которого положен метод решения экстремальных задач. Суть метода заключается в оптимизации аналитических выражений, включающих в себя неизвестные оптимизации. В качестве аналитического выражения принят момент инерции сечения тавра (рис. 2):

$$I_{xt} = A_{fo} y_1'^2 + A_{wo} y_3'^2 + A_{wo} h^2 / 12. \quad (4)$$

Заметим, что $y_3' = h / 2 - y_1'$ (рис. 2). Подстановка этого значения в зависимость (4) позволяет записать

$$I_{xt} = A_{fo} y_1'^2 + A_{wo} h^2 / 4 - A_{wo} h y_1' + A_{wo} y_1'^2 + A_{wo} h^2 / 12.$$

В последней интерпретации момент инерции тавра I_{xt} представляет собой зависимость второй степени, включающую в себя неизвестные оптими-

зации – геометрические параметры y_1 и y_2 , характеризующие положение центра тяжести тавра. Степенная зависимость описывает некоторую кривую, угол поворота касательной к которой может быть характеристикой одного из неизвестных оптимизации. Поскольку угол наклона касательной в экстремуме кривой равен нулю, то, приравняв нулю первую производную от I_{xt} по переменному y_1 , можно определить аналитическое выражение, определяющее одно из положений центра тяжести тавра:

$$\frac{dI_{xt}}{dy_1'} = 0 = 2y_1' A_{fo} - A_{wo} h + 2y_1' A_{wo}, \quad (5)$$

откуда

$$y_1' = \frac{h A_{wo}}{2(A_{wo} + A_{fo})} = \frac{h}{2(\gamma_0 + 1)}, \quad (6)$$

где $\gamma_0 = A_{fo} / A_{wo}$.

С учетом выражения (6):

$$y_2 = \frac{h(2\gamma_0 + 1)}{2(\gamma_0 + 1)}, \quad (7)$$

$$y_3 = \frac{h\gamma_0}{2(\gamma_0 + 1)}. \quad (8)$$

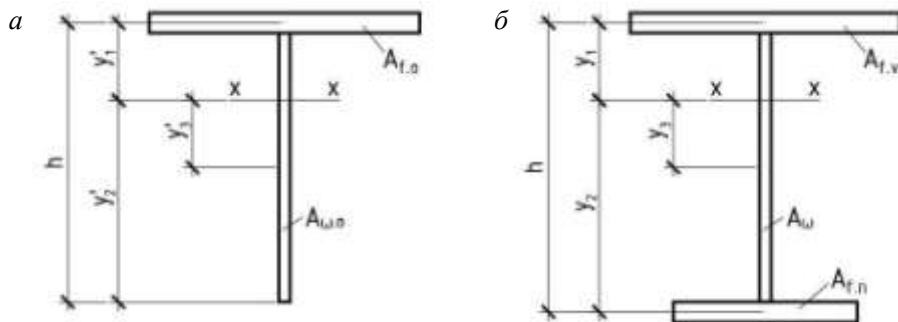


Рис. 2. Расчетная схема тавра (а) и двутавра (б) на стадии изготовления балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки

Из геометрии тавра (рис. 2) коэффициент асимметрии сечения $K_0 = y'_2 / y'_1$. Учитывая, что $y'_2 = K_0 y'_1$ и $y'_2 = h - y'_1$, соответствующие расстояния от центра тяжести тавра до характерных точек сечения, выраженные через его коэффициент асимметрии

$$\begin{aligned} y'_1 &= \frac{h}{1 + K_0}; \\ y'_1 &= \frac{hK}{1 + K_0}; \\ y'_3 &= h(K_0 - 1) / 2(K_0 + 1). \end{aligned} \quad (9)$$

После сравнения выражений (6) и (9) находим, что соотношение площадей верхнего пояса и стенки тавра подчиняется зависимости

$$\gamma_0 = \frac{K_0 - 1}{2}, \quad (10)$$

а коэффициент асимметрии тавра

$$K_0 = 2\gamma_0 + 1. \quad (11)$$

Момент инерции поперечного сечения тавра, выраженный через коэффициент асимметрии K_0 , имеет вид

$$I_{xt} = \frac{A_0 h^2}{3} \frac{2K_0 - 1}{(K_0 + 1)^2}. \quad (12)$$

Соответствующие моменты сопротивления:

$$W_{xtv} = \frac{A_0 h}{3} \frac{2K_0 - 1}{K_0 + 1}; \quad (13)$$

$$W_{xtn} = \frac{A_0 h}{3} \frac{2K_0 - 1}{K_0(K_0 + 1)}. \quad (14)$$

Взаимосвязь и зависимость параметров несущей способности тавра и двутавра устанавливается из условия, что стенка у обоих сечений является общей. В таком случае

$$A_w = \gamma_{wo}(A_w + A_{fv}); \quad (15)$$

$$A_w = \gamma_w(A_w + A_{fv} + A_{fn}). \quad (16)$$

Из (15) следует, что $A_w + A_{fv} = A_w / \gamma_{wo}$. Подставив $(A_w + A_{fv})$ в выражение (16), получим

$$A_w = \gamma_w \frac{A_w}{\gamma_{wo}} + \gamma_w A_{fn}. \quad \text{Так как } A_w = \gamma_w A, \text{ то}$$

$$A = A_w / \gamma_{wo} + A_{fn} \text{ или}$$

$$\gamma_{wo} = \frac{\gamma_w}{\gamma_w + \gamma_{fn}}. \quad (17)$$

Коэффициент распределения материала по сечению тавра, выраженный через коэффициент асимметрии тавра,

$$\gamma_{wo} = \frac{A_{wo}}{A_o} = \frac{A_{wo}}{(A_{fo} + A_{wo})} = \frac{2}{(1 + K_o)}. \quad (18)$$

Учитывая формулу (18), а также известные выражения, характеризующие распределение материала по верхнему поясу двутавра,

$$\gamma_{fv} = \frac{K}{K + 1} - \frac{\gamma_w}{2}, \quad (19)$$

где K – коэффициент асимметрии сечения двутавра; γ_w – коэффициент распределения материала по стенке двутавра, получим выражение коэффициента асимметрии тавра через параметры двутавра

$$\frac{2}{(1 + K_o)} = \frac{\gamma_w}{\gamma_w + \left(\frac{K}{K + 1} - \frac{\gamma_w}{2} \right)},$$

откуда

$$K_o = \frac{4K}{2\gamma_w(K + 1)} = \frac{2K}{\gamma_w(K + 1)}, \quad (20)$$

или же

$$K = \frac{\gamma_w K_o}{(2 - K_o \gamma_w)}. \quad (21)$$

Для определения параметров несущей способности двутавра запишем его момент инерции, включающий неизвестные оптимизации – геометрические размеры y_1, y_2 , определяющие его положение центра тяжести (см. рис. 2):

$$I_x = A_{fv} y_1^2 + A_{fn} y_2^2 + A_w y_3^2 + A_w h / 12. \quad (22)$$

Поскольку $y_2 = h - y_1$, а $y_3 = h / 2 - y_1$, после подстановки этих значений в (22) и последующей минимизации указанного выражения ($\frac{dI_x}{dy_1} = 0$) находим:

$$y_1 = \frac{h}{2} (2\gamma_{fn} + \gamma_w); \quad (23)$$

$$y_2 = \frac{h}{2} (2 - 2\gamma_{fn} - \gamma_w). \quad (24)$$

Учитывая, что коэффициент асимметрии сечения двутавра $K = \frac{y_2}{y_1}$, находим, что $K = \frac{h - y_1}{y_1}$, или

$$y_1 = \frac{h}{K+1}; \quad (25)$$

$$y_2 = \frac{hK}{K+1}; \quad (26)$$

$$y_3 = \frac{h(K-1)}{2(K+1)}. \quad (27)$$

Анализируя зависимости (23) и (24) и сопоставляя их с соответствующими аналитическими выражениями (25) и (26), находим коэффициенты распределения материала по сечениям поясных листов двутавра:

$$\gamma_{fv} = \frac{1}{K+1} - \frac{\gamma_w}{2}; \quad (28)$$

$$\gamma_{fn} = \frac{K}{K+1} - \frac{\gamma_w}{2}. \quad (29)$$

Момент инерции двутавра I_x и моменты сопротивления его крайних верхней и нижней зон W_{xv} и W_{xn} с учетом зависимостей (19), (28) и (29) преобразуются к виду:

$$I_x = \frac{Ah^2}{(K+1)^2} \frac{[6K - \gamma_w(K+1)^2]}{6}; \quad (30)$$

$$W_{xv} = \frac{Ah}{(K+1)} \frac{[6K - \gamma_w(K+1)^2]}{6};$$

$$W_{xn} = W_{xv}/K. \quad (31)$$

Общеизвестно, что высоту двутавра можно записать как

$$h = \sqrt{\gamma_w A n_w} = \gamma_w^{1/2} \sqrt{A n_w}, \quad (32)$$

где n_w – гибкость стенки.

Подстановка h в одно из выражений момента сопротивления двутавра и оптимизация его по переменному $\gamma_w (dW_{xv}/d\gamma_w) = 0$ позволяет получить выражение для оптимального коэффициента распределения материала по сечению стенки двутавра:

$$\gamma_w^{opt} = \frac{2K}{(K+1)^2}. \quad (33)$$

С учетом γ_w^{opt} :

$$I_x = \frac{2}{3} \frac{Ah^2 K}{(K+1)^2}; \quad (34)$$

$$W = \frac{2}{3} \frac{AhK}{(K+1)}; \quad (35)$$

$$\gamma_{fv} = \frac{K^2}{(K+1)^2}; \quad (36)$$

$$\gamma_{fn} = \frac{1}{(K+1)^2}. \quad (37)$$

Если $K = 1,0$, что соответствует двутавру, симметричному относительно оси $X-X$, то параметры несущей способности и распределения материала по сечению двутавра приобретают известные значения:

$$I_x^{opt} = Ah^2/6; \quad W_{xv}^{opt} = Ah/3;$$

$$\gamma_w^{opt} = 0,5; \quad \gamma_{xv}^{opt} = \gamma_{xn}^{opt} = 0,25.$$

Теперь вернемся к параметрам тавра. Выразим их через геометрические параметры двутавра:

– коэффициент соотношения площади верхнего пояса и стенки

$$\gamma_0 = \frac{\gamma_{fv}}{\gamma_w} = \frac{K}{2}; \quad (38)$$

– коэффициент асимметрии тавра

$$K_o = K + 1; \quad (39)$$

– коэффициент, характеризующий распределение материала стенки тавра

$$\gamma_{wo} = \frac{\gamma_w}{\gamma_w + \gamma_{fv}} = \frac{2}{(K+2)}; \quad (40)$$

– площадь поперечного сечения тавра

$$A_0 = \frac{AK(2+K)}{(K+1)^2}; \quad (41)$$

– момент инерции тавра

$$I_{xt} = \frac{Ah^2 K(2K+1)}{3(K+1)^2(K+2)}; \quad (42)$$

– момент сопротивления крайних и нижних точек тавра

$$W_{xtv} = \frac{AhK(2K+1)}{3(K+1)^2}; \quad (43)$$

$$W_{xtn} = \frac{AhK(2K+1)}{3(K+1)^3}; \quad (44)$$

– соотношение моментов инерции тавра и двутавра

$$\frac{I_x}{I_{xt}} = \frac{2(K+2)}{(2K+1)}; \quad (45)$$

– максимальная несущая способность тавра

$$M_{max.t} = R_y W_{xtn} = \frac{R_y AKh(2K+1)}{3(K+1)^2}. \quad (46)$$

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния тавра на стадии из-

готовления предварительно напряженной балки

Выше (1–3), на основании критериального подхода к формированию оптимального поперечного сечения тавра (38–46), сформулированы аналитические зависимости напряжений в исходном сечении балки.

Напряженное состояние стенки в процессе её предварительного напряжения контролировалось образцовым динамометром ДОР-20, тензоресторами, установленными по схеме, представленной на рис. 3, а также тензометрами Аистова ТА-2.

Проверка достоверности теоретических выводов о напряженном состоянии предварительно напряженного тавра проведена на 10 натурных образцах марки ВТ (табл. 1).

Для исключения влияния сварочных напряжений на напряжения по сечению тавра стенка к поясу из двух парных неравнополочных уголков присоединялась на эпоксидной композиции ЭД-5.

Начальное контролируемое напряжение во всех испытываемых натурных тавровых образцах принималось равным 100 МПа.

Для проверки соответствия теоретических нор-

мальных напряжений с их экспериментальными данными по стенке и поясам было установлено 225 тензорезисторов, позволяющих фиксировать продольные, поперечные и сдвиговые деформации, 180 из которых в виде «розеток» установлены в приопорных узлах (на расстоянии по 600 мм от каждого узла), 25 – на оставшейся длине конструкции и 20 – по длине пояса тавра (рис. 3).

В основу определения нормальных напряжений в конструкции положен закон Гука.

Характер распределения нормальных напряжений по длине тавра показан на рис. 4.

Эпюры распределения нормальных напряжений в характерных сечениях тавра (рис. 3) представлены на рис. 5, из которого следует, что форма распределения нормальных напряжений по стенке тавра соответствует теоретическому распределению. Результаты экспериментального исследования изложены в табл. 2. Форма распределения относительных деформаций и на их основе нормальных напряжений, полученных на клееболтовых предварительно напряженных образцах, полностью совпадает и для сварных предварительно напряженных балок (рис. 6).

Таблица 1

Геометрические размеры и параметры несущей способности тавра

Обозначение образца	Эскиз сечения	Количество, шт.	Состав сечения, мм			A_2 см ²	Геометрические характеристики			
			Верхний пояс	Нижний пояс	Стенка		I_x , см ⁴	I_y , см ⁴	W_{xy} , см ³	W_{zn} , см ³
ВТ-1		1	45×28×4		–378×2	13,6	2295	25,96	18,8	8,25
ВТ-2		1	–//–		–372,6×2,1	13,4	2295,1	25,93	18,7	8,25
ВТ-3		1	–//–		–372×2	13,6	2295	25,96	18,65	8,2
ВТ-4		1	–//–		–371×1,98	14,0	2295,2	25,90	18,73	8,24
ВТ-5		1	–//–		–372×2,1	13,5	2295	25,96	18,8	8,23
ВТ-6		1	–//–		–372×2	13,6	2295	25,98	18,65	8,2
ВТ-7		1	–//–		–372×2	13,6	2295	25,96	18,8	8,23
ВТ-8		1	–//–		–372×1,98	13,46	2294	25,95	18,9	8,24
ВТ-9		1	–//–		–372×1,98	13,56	2295	25,95	18,96	8,25
ВТ-10		1	–//–		–372×2	13,6	2295	25,96	18,8	8,25

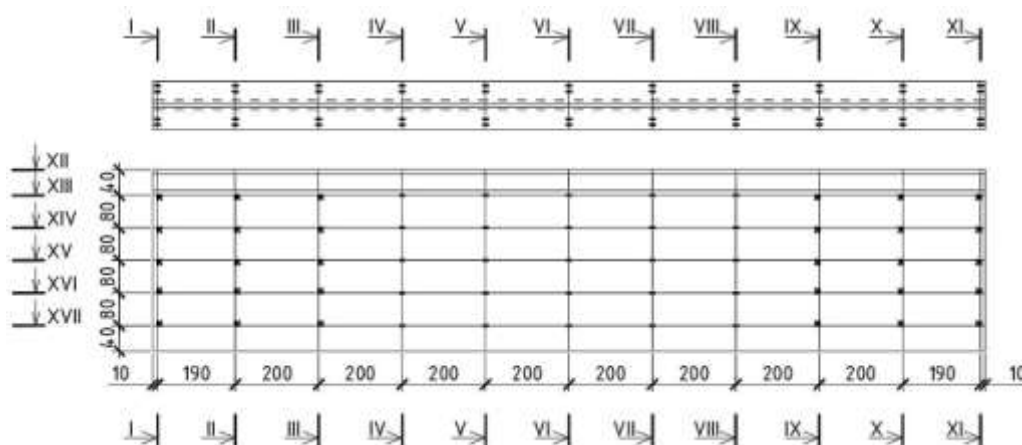


Рис. 3. Расстановка тензорезисторов по тавру (исходному элементу предварительно напряженной балки)

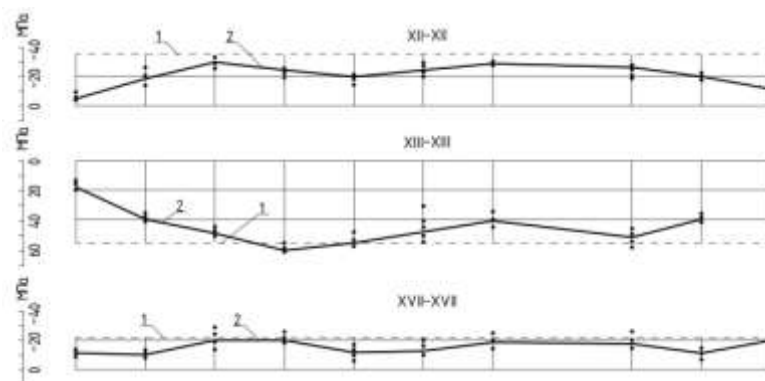


Рис. 4. Нормальные напряжения по длине экспериментального образца БТ-1

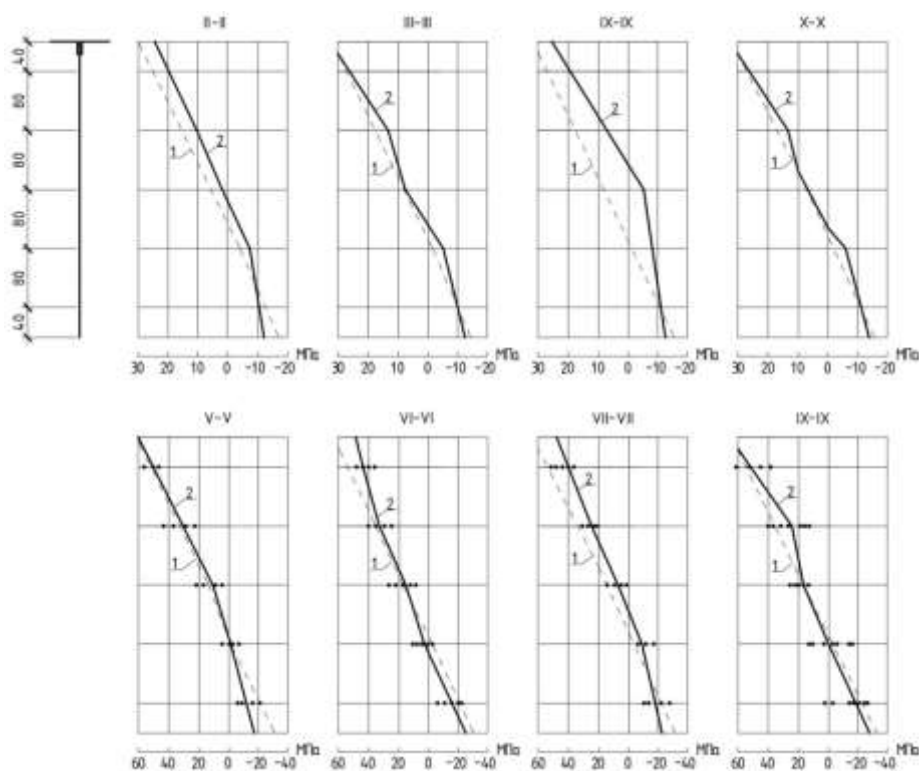


Рис. 5. Эпюры нормальных напряжений в тавре марки БТ (см. рис. 3):
1 – теоретические; 2 – экспериментальные

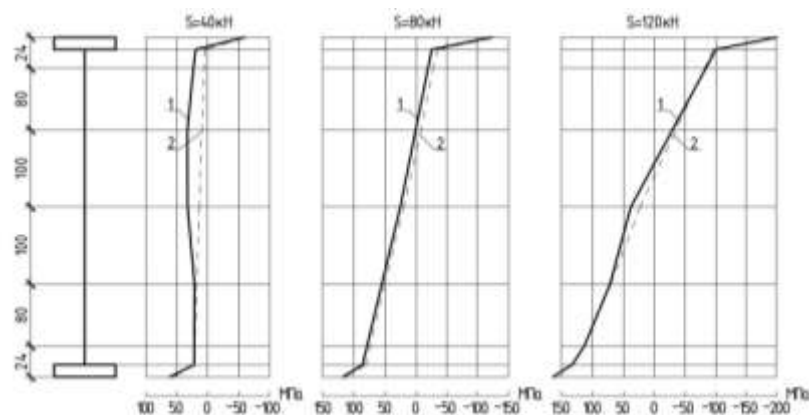


Рис. 6. Нормальные напряжения в среднем сечении
сварной предварительно напряженной балки

Таблица 2

**Относительные деформации в верхней и нижней зонах
стенки клееболтовых образцах таврового сечения 2**

Относительные деформации	Образцы									
	ВТ-1	ВТ-2	ВТ-3	ВТ-4	ВТ-5	ВТ-6	ВТ-7	ВТ-8	ВТ-9	ВТ-10
ε_v	0,000293	0,000294	0,000291	0,000292	0,000293	0,000293	0,0002926	0,0003014	0,0003015	0,0003036
ε_n	0,0001465	0,0001470	0,0001459	0,0001463	0,0001467	0,0001468	0,0001463	0,0001507	0,0001507	0,0001518

Примечания – ε_v – относительные деформации в крайних верхних зонах стенки тавра; ε_n – то же, в крайних нижних зонах стенки.

Обработка результатов численных значений относительных деформаций ε , полученных в результате натурного эксперимента методами теории ве-

роятности, показала, что математическое ожидание (среднее арифметическое значение относительных деформаций)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{2,933 \cdot 10^{-4} + 2,944 \cdot 10^{-4} + 2,912 \cdot 10^{-4} + 2,925 \cdot 10^{-4} + 2,934 \cdot 10^{-4} + 2,935 \cdot 10^{-4} + 2,926 \cdot 10^{-4} + 3,014 \cdot 10^{-4} + 3,015 \cdot 10^{-4} + 3,036 \cdot 10^{-4}}{10} = 2,957 \cdot 10^{-4}. \quad (47)$$

Среднее квадратическое отклонение, характеризующее отклонение экспериментальных данных от их среднеарифметического значения, определяется зависимостью

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (48)$$

где $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i$ – среднее арифметическое значение экспериментальных данных; x_i – численные значения отдельного эксперимента; n – количество экспериментальных данных.

$$S = \sqrt{\frac{(2,933 \cdot 10^{-4} - 2,957 \cdot 10^{-4})^2 + \dots + (3,036 \cdot 10^{-4} - 2,957 \cdot 10^{-4})^2}{10}} = \sqrt{1,749 \cdot 10^{-10}} = 1,32 \cdot 10^{-5} = 0,0000132. \quad (49)$$

Напряжение, соответствующее среднему квадратическому отклонению на основании закона Гука $\sigma_s = SE$

$$\sigma_s = 0,0000132 \cdot 21000 = 0,2777 \text{ кН/см}^2. \quad (50)$$

Достоверность экспериментальных данных определяется разностью между среднеарифметическим значением относительных деформаций и их квадратическим отклонением, делённом на среднеарифметическое значение

$$D = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i - S \right)}{\sum_{i=1}^n x_i} = \frac{(0,0002957 - 0,0000132)}{0,0002957} = \frac{0,0002825}{0,0002957} = 0,95633. \quad (51)$$

Плотность распределения экспериментальных замеров относительных деформаций

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (52)$$

где σ – дисперсия (мера разброса значений случайной величины относительно ее математического ожидания – среднее квадратическое отклонение, возведенное в квадрат)

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (53)$$

где e – экспонента, $e = 2,718$.

Поскольку численные значения замеренных относительных деформаций, их средние арифметические значения, квадратическое отклонение и дисперсия величины очень малы, экспонента в степени, приближающейся к нулю, практически равна единице, и плотность распределения $f(x)$ слишком высока. На рис. 7 представлен график распределения экспериментальных относительных деформаций ϵ , построенный по данным табл. 2. График близко напоминает нормальный закон распределения.

Выводы

Сравнение среднеарифметических нормальных напряжений, полученных экспериментальным путем, с их теоретическими значениями, свидетельствует о хорошей сходимости сопоставимых параметров, расхождение составляет 11,28 %. Изложенное позволяет утверждать о совершенстве методики определения предварительных напряжений в характерных зонах поперечного сечения балки, хорошем совпадении теоретических и экспериментальных данных, о чистоте натурного эксперимента и дает основание полагать, что теоретические выводы, касающиеся напряженно-деформированного состояния балок, будут соответствовать напряженному состоянию в предварительно напряженных балках, входящих в каркас зданий и сооружений.

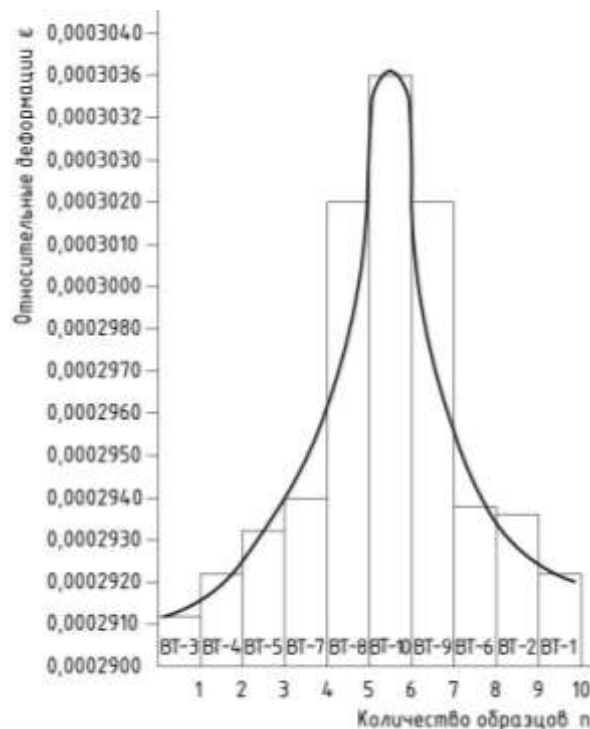


Рис. 7. График распределения относительных деформаций в предварительно напряженных образцах таврового сечения

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ратц Э.Г. Старинные предварительно напряженные конструкции // Изв. АИиА СССР. 1960. № 3. С. 54–58.
2. Шухов В.Г. Избранные труды. Строительная механика. Москва : Наука, 1977. 193 с.
3. Беленя Е.И. Предварительно напряженные металлические несущие конструкции. Москва : Стройиздат, 1963. 323 с.
4. Гайдаров Ю.В. Предварительно напряженные металлические конструкции. Ленинград : Стройиздат, 1971. 144 с.
5. Вахуркин В.М. Балки из двух марок стали (бистальные балки). Москва : Стройиздат, 1965. Вып. 9. С. 79–97.
6. Сперанский Б.Н. Решетчатые металлические пространственные металлические конструкции. Москва : Стройиздат, 1970. С. 239.
7. Бирюлев В.В. Металлические неразрезные конструкции с регулированием уровня опор. Москва : Стройиздат, 1984. 88 с.
8. Воеводин А.А. Предварительно напряженные системы элементов конструкций. Москва : Стройиздат, 1989. 304 с.
9. Клинов И.Г. К вопросу о расчете по прочности предварительно напряженных металлических балок, изготовленных под нагрузкой. Ленинград : Труды ЛИСИ, 1963. Вып. 40. С. 28–33.
10. Лашенко М.Н. Повышение надежности металлических конструкций зданий и сооружений. Ленинград : Стройиздат, 1987. 136 с.
11. Ванштейн Е.И. Предварительно напряженные бесшовные конструкции. Челябинск, 1983. 48 с.
12. Экспериментальное исследование стальных двухтавровых балок, предварительно напряженных без затяжек / А.А. Иодчик, А.А. Чебровский [и др.] // Инженерный сборник Дона. 2021. № 7. С. 411–422.
13. Кравчук В.А., Кравчук Е.В. Надежные стальные изгибаемые строительные конструкции. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2020. 277 с.
14. Gatti M. Elasn timer period of vibration calculated experimentally in building hosting permanent GPS stations // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2018 Vol. 17, № 3. Pp. 607–625.
15. Определение технического состояния пролетных строений по частоте собственных колебаний / А.М. Сычева, С.В. Зарин [и др.] // Транспортное строительство. 2019. № 3. С. 25–28.
16. Time – variant fragility analysis of the bridge system considering time-varying dependence among typical component seismic demands / S. Song, Y. Qian, J. Liu, S. Xie, G. Wu // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2019. Vol. 18. Issue 2. Pp. 363–377.
17. Free and forced vibration analysis of multiple cracked FGM multi span continuous beams using dynamic stiffness method / T.V. Lien, N.T. Duc, N.T. Khiem // Latin American Journal of Solids and Structures. 2019. Vol. 16(2). Pp. 1–26. doi:10.1590/1679-78255242
18. Смирнова Н.Д., Белуцкий И.Ю. Исследование влияния длительности СВЧ излучения на повышение температуры бетона // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2022. С. 141–144.
19. Болотин В.В. Методы теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1982. 351 с.

REFERENCES

1. Ratts E.G. Starinnye predvaritel'no napryazhennyye konstruksii [Ancient prestressed structures] // *Izv.AliA SSSR*, 1960. №3. С. 54–58.
2. Shukhov V.G. Izbrannyye trudy. Stroitel'naya mekhanika [Selected Works. Structural mechanics]. Moskva : Nauka, 1977. 193 s.
3. Belenya Ye.I. Predvaritel'no napryazhennyye metallicheskiye nesushchiye konstruksii [Prestressed metal bearing structures]. Moskva : Stroyizdat, 1963. 323 s.
4. Gaydarov Yu.V. Predvaritel'no napryazhennyye metallicheskiye konstruksii [Prestressed metal structures]. Leningrad : Stroyizdat, 1971. 144 s.
5. Vakhurkin V.M. Balki iz dvukh marok stali (bistal'nye balki) [Beams from two grades of steel (bi-steel beams)]. Moskva : Stroyizdat, 1965. Vyp. 9. S. 79–97.
6. Speranskiy B.N. Reshchatyye metallicheskiye prostranstvennyye metallicheskiye konstruksii [Lattice metal spatial metal structures]. Moskva : Stroyizdat, 1970. S. 239.
7. Biryulev V.V. Metallicheskiye nerazreznyye konstruksii s regulirovaniem urovnya opor [Metal continuous constructions with regulation of level of supports]. Moskva : Stroyizdat, 1984. 88 s.
8. Voyevodin A.A. Predvaritel'no napryazhennyye sistemy elementov konstruksii [Prestressed systems of structural elements]. Moskva : Stroyizdat, 1989. 304 s.
9. Klinov I.G. K voprosu o raschete po prochnosti predvaritel'no napryazhennykh metallicheskiykh balok, izgotovlennykh pod nagruzkoy [On the calculation of the strength of prestressed metal beams made under load]. Leningrad : Trudy LISI, 1963. Vyp. 40. S. 28–33.
10. Lashchenko M.N. Povysheniye nadezhnosti metallicheskiykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy [Improving the reliability of metal structures of buildings and structures]. Leningrad : Stroyizdat, 1987. 136 s.
11. Vanshtein Ye.I. Predvaritel'no napryazhennyye bestrosnyye konstruksii [Prestressed ropeless structures]. Chel'yabinsk, 1983. 48 s.
12. Eksperimental'noye issledovaniye stal'nykh dvukhtavrovyykh balok, predvaritel'no napryazhennykh bez zatyazhek [Experimental study of steel two-tee beams prestressed without tightening] / A.A. Iodchik, A.A. Chebrovskiy [et al.] // *Inzhenernyy sbornik Dona*. 2021. № 7. S. 411–422.
13. Kravchuk V.A., Kravchuk E.V. Stal'nye sterzhni, predvaritel'no napryazhennyye bez zatyazhek [Steel rods prestressed without tightening]. Khabarovsk : Izd-vo TOGU, 2020. 277 s.
14. Gatti M. Elasniki period of vibration calculated experimentally in building hosting permanent GPS stations // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2018. Vol. 17, № 3. Pp. 607–625.
15. Opredeleniye tekhnicheskogo sostoyaniya proleynykh stroyeniy po chastote sobstvennykh kolebaniy [Determination of the technical condition of span structures according to the frequency of natural oscillations] / A.M. Sycheva., S.V. Zarin [et al.] // *Transportnoye stroitel'stvo*. 2019. № 3. S. 25–28.
16. Time – variant fragility analysis of the bridge system considering time-varying dependence among typical component seismic demands / S. Song, Y. Qian, J. Liu, S. Xie, G. Wu // *Earth-quake Engineering and Engineering Vibration*. 2019. Vol. 18, Issue 2. Pp. 363–377.
17. Free and forced vibration analysis of multiple cracked FGM multi span continuous beams using dynamic stiffness method / T.V. Lien, N.T. Duc, N.T. Khiem // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2019. Vol. 16(2). Pp. 1–26. doi:10.1590/1679-78255242
18. Smirnova N.D., Belutskiy I.Yu. Issledovaniye vliyaniya prodolzhitel'nosti SVCh izlucheniya na povysheniye temperatury betona. [Study of the influence of the duration of microwave radiation on the increase in the temperature of concrete] // *Dal'ny Vostok : Problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*. Khabarovsk : Izd-vo TOGU, 2022. S. 141–44.
19. Bolotin V.V. Metody teorii veroyatnosti i teorii nadezhnosti v raschetakh konstruksiy [Methods of the theory of probability and theory of reliability in the calculations of structures]. Moskva : Stroyizdat, 1982. 351 s.

Информация об авторах

Е.В. Кравчук – старший преподаватель кафедры «Строительство»;
И.Ю. Белуцкий – доктор технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги»;
В.А. Кравчук – доктор технических наук, профессор Высшей школы промышленного и гражданского строительства.

Information about authors

E.V. Kravchuk – Senior Lecturer of the Construction Department;
I.Yu. Belutsky – Doctor of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Motor Roads;
V.A. Kravchuk – Doctor of Science (Engineering), Professor, Graduate School of Industrial and Civil Engineering.

Статья поступила в редакцию 15.08.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.
The article was submitted: 15.08.2024; approved after reviewing: 17.10.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

Научная статья
УДК 656.21.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПУСКА ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ЧЕРЕЗ ГОРЛОВИНУ УЧАСТКОВОЙ СТАНЦИИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Куклев Денис Николаевич¹, Куклева Наталья Владимировна²

¹ АО «Мосгипротранс», Санкт-Петербург, boblok@mail.ru

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, kukleva.natalya@bk.ru

Аннотация. Повышение пропускной способности железнодорожных станций является важнейшей задачей, стоящей перед железнодорожной отраслью наряду с необходимостью увеличения пропускных способностей перегонов. Обоснование предлагаемых решений, направленных на совершенствование работы, в том числе и железнодорожных станций, может быть выполнено различными инструментами, среди которых выделяется современный метод – метод имитационного моделирования. Выполнено краткое описание реализации моделирования процесса пропуска транспортных потоков – поездов и поездных локомотивов через центральную горловину участковой станции. Цель моделирования – определение загрузки различных элементов – приемоотправочных путей, стрелочной горловины, тупикового пути для перемены направления движения поездных локомотивов, выходной горловины приемоотправочного парка при различных размерах грузового и пассажирского движения. Получены частные результаты моделирования при определенных параметрах, размерах движения и принятых допущениях. Реализация модели осуществлена на языке GPSS в среде имитационного моделирования GPSS World (учебная версия).

Ключевые слова: участковая станция, горловина станции, смена локомотивов, моделирование, имитационная модель, язык моделирования GPSS

Original article

RESEARCH OF THE PROCESS OF PASSING TRAFFIC FLOW THROUGH THE NECK OF A DISTRICT STATION USING THE METHOD OF SIMULATION MODELING

Kuklev Denis N.¹, Kukleva Natalya V.²

¹ JSC Mosgiprotrans, Saint Petersburg, boblok@mail.ru

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, kukleva.natalya@bk.ru

Abstract. Increasing the throughput capacity of railway stations is the most important task facing the railway industry, along with the need to increase the capacity of hauls. Justification of the proposed solutions aimed at improving the work, including that of railway stations, can be done using various tools, among which the modern method stands out – the method of simulation modeling. The article provides a brief description of the implementation of modeling the process of passing traffic flows – trains and train locomotives – through the central neck of the precinct station. The purpose of the simulation is to determine the load of various elements – receiving and departure tracks, a turnout neck, a dead-end track for changing the direction of movement of train locomotives, the exit neck of the receiving and dispatching fleet for various sizes of freight and passenger traffic. Partial modeling results were obtained for certain parameters, motion sizes and accepted assumptions. The model is implemented in the GPSS language in the GPSS World simulation environment (training version).

Keywords: precinct station, yard neck, locomotive changing, modeling, simulating model, GPSS modeling language

Введение

Вопросы повышения пропускной способности железнодорожной инфраструктуры по-прежнему актуальны [1, 2], особенно в свете задач, возникающих перед железнодорожной отраслью в целом на всех уровнях. В теоретическом плане могут представлять интерес даже объекты, по которым, казалось бы, по истечении многих лет не должно быть вопросов. К таким, по мнению авторов, можно отнести центральную горловину участковой

станции продольного или полупродольного типов и вопрос ее развития за счет сооружения обхода, что связано с тем, что нормативные документы МПС России, содержащие в себе рекомендации по развитию в том числе и данной инфраструктуры, были отменены [3], а в научной литературе (в открытых источниках) подобных рекомендаций авторам найти не удалось, несмотря на то, что схемы участковых станции в принципе исследовались.

Ретроспективный анализ технической, в том числе, нормативной литературы по вопросу сооружения обхода на участковой станции [4] показал, что обход рекомендуется сооружать при достижении определенного порога числа поездов, идущих со сменой локомотива. При этом очевидно, что данного условия недостаточно, поскольку оно не учитывает как конструктивные особенности горловины, так и эксплуатационные факторы [5], заключающиеся, например, в наличии неравномерности пассажирского и грузового движения, что должно быть, несомненно, учтено [6].

В связи с этим авторы считают целесообразным с помощью метода имитационного моделирования, активно используемого при обосновании каких-либо мероприятий на различных станциях, исследовать процесс пропуска транспортных потоков через горловину участковой станции по двум вариантам – при отсутствии и наличии обхода. В данной статье рассматривается имитационная модель, разрабатываемая на языке GPSS, который успешно может использоваться для систем массового обслуживания [7], для схемы (рис. 1) для базового варианта (без обхода) при отсутствии в горловине параллельных маршрутов [8].

Формализация процесса пропуска поездных локомотивов и поездов через горловину участковой станции для данного варианта была рассмотрена ранее [9], но в данной статье авторы решили дать Q-схему, более детализированную по операциям (рис. 2).

При разработке модели были сделаны следующие допущения:

- в цепочке «приемоотправочный парк – локомотивный тупик – локомотивное депо – локомотивный тупик – приемоотправочный парк» элемент «локомотивное депо» не рассматривался [10] как таковой, продолжительность нахождения в нем транзакта-поездной локомотив определялась таким образом, чтобы соответствовать моменту, когда должен быть подан локомотив, т.е. к окончанию выполнения технологических операций на приемоотправочных путях;
- не учитывалось влияние четного потока поездных локомотивов на проследование в локомотивном депо нечетных поездных локомотивов;
- набор и продолжительность выполнения технологических операций на приемоотправочных путях принимались для усредненных условий аналогичной станции;
- не устанавливались ограничения по работе бригад, выполняющих техническое обслуживание и коммерческий осмотр составов поездов с расчетом, что их будет достаточно, и они не станут «узким» местом.

Фрагмент алгоритма имитационной модели следования поездов и поездных локомотивов в системе «приемо-отправочный парк – локомотивное депо» приведен на рис. 3.

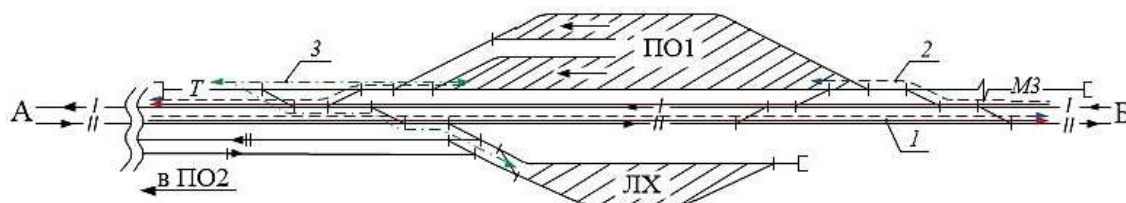


Рис. 1. Принципиальная схема горловины участковой станции при отсутствии параллельных передвижений:
1 – маршруты следования пассажирских поездов; 2 – маршруты следования грузовых поездов;
3 – маршруты следования поездных локомотивов

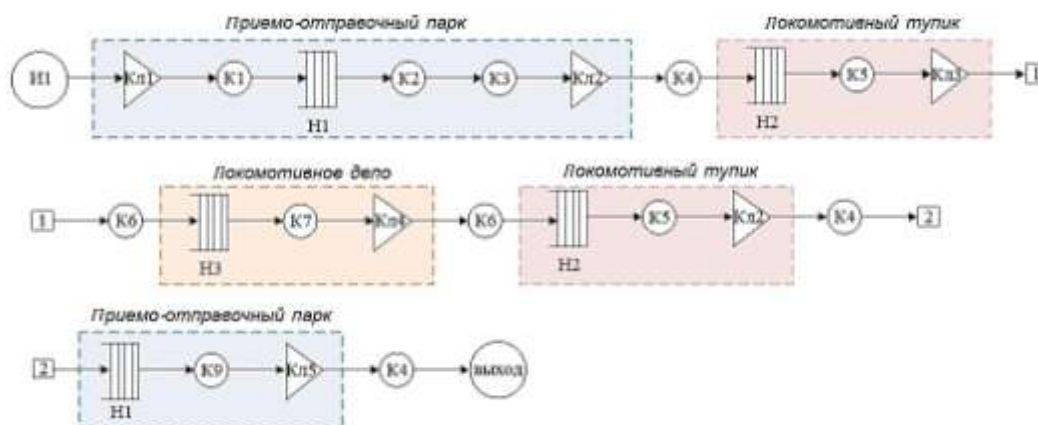


Рис. 2. Q-схема следования транзакта через железнодорожную станцию (приемо-отправочный парк – локомотивное депо): И1 – источник генерации входящего потока; К1–К7 – каналы обслуживания; Кл1–Кл4 – проверка выполнения условий; Н1–Н3 – накопители

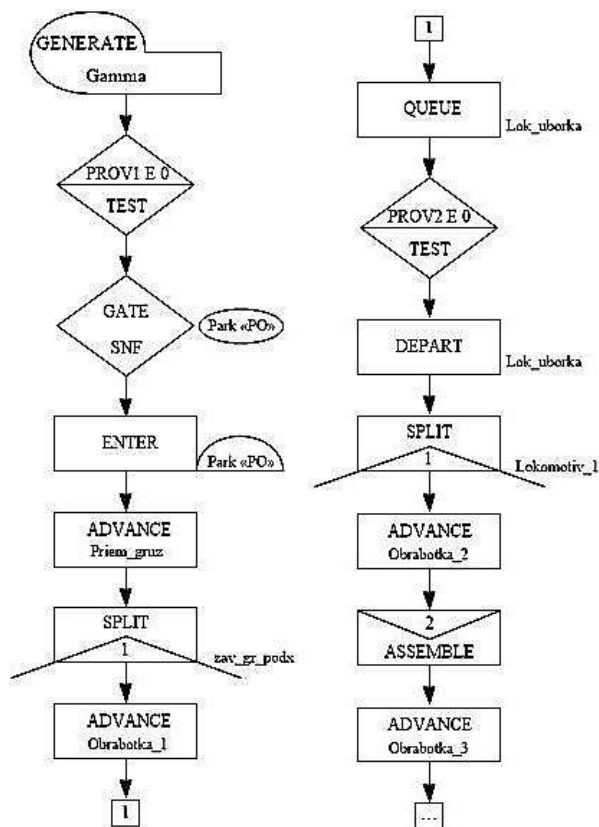


Рис. 3. Фрагмент блок-диаграммы имитационной модели

После генерации входящего потока транзактов-грузовых поездов¹ (блоком GENERATE, с использованием гамма-распределения), выполняется проверка возможности приема поездов по непересечению с поездом более высокой категории, соблюдение интервала между прибывающими поездами (условие свободности определенных элементов выполняется блоком TEST). После проверки свободности приемоотправочных путей (многоканальное устройство Park «PO» блоком GATE) выполняется занятие (устройство Park «PO» блоком ENTER) поездом пути парка (блок ADVANCE). Далее создается копия транзакта (SPLIT) для реализации алгоритма попутного поступления поездов. С транзактом-поездом выполняются первичные технологические операции на приемоотправочных путях, включая отцепку поездного локомотива (продолжительность обработки, реализуется блоком ADVANCE). Перед проверкой возможности проследования через горловину – свободности горловины, локомотивного тупика и т.д. (TEST), транзакт-локомотив входит в очередь для снятия статистики по задержке (блок QUEUE). После выхода из очереди (DEPART) создается копия

транзакта-поездной локомотив (SPLIT), который следует через горловину в локомотивный тупик. Транзакт-оригинал остается в многоканальном устройстве (Park «PO») для технологической обработки (ADVANCE) и ожидания транзакта-поездного локомотива (ASSEMBLE) в целях имитации его прицепки, после чего происходит технологическая обработка поезда (ADVANCE).

Результаты моделирования при росте числа грузовых поездов, принимаемых в нечетный приемоотправочный парк, начиная от 24 поездов, и пяти парax пассажирских поездов приведены на рис. 4–7.

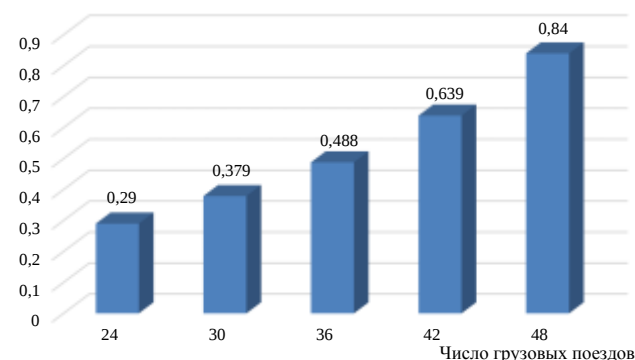


Рис. 4. Загрузка приемоотправочных путей нечетного парка

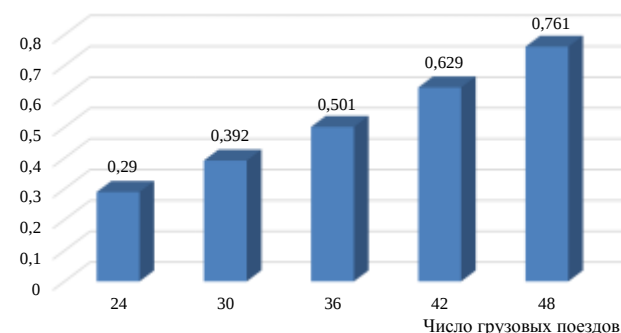


Рис. 5. Загрузка локомотивного тупика

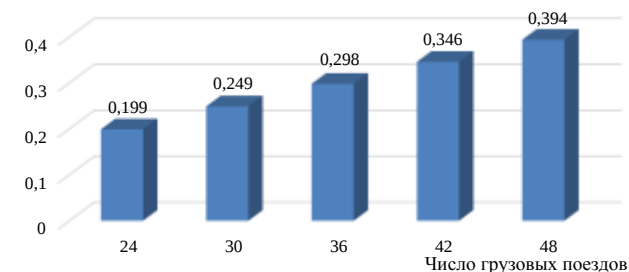


Рис. 6. Загрузка центральной горловины станции

¹ Под транзактом понимается любой движущийся в модели элемент, имитирующий как продвижение транспортных потоков (поезда, локомотивы), так и элемент, необходимый для выполнения определенных действий в процессе реализации алгоритма моделирования.

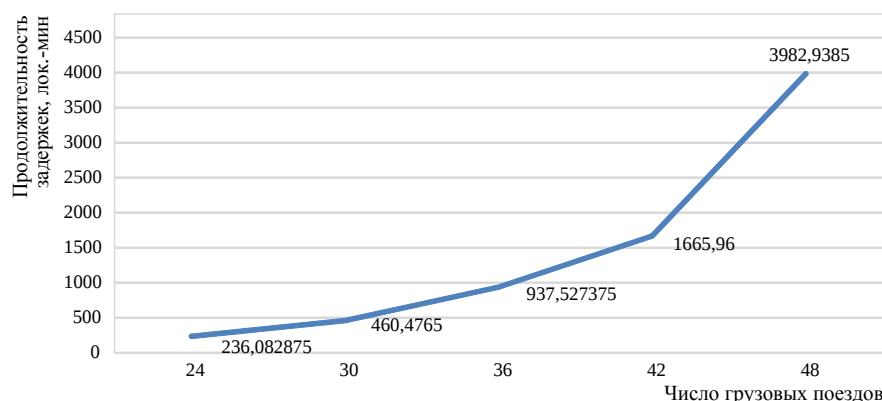


Рис. 7. Продолжительность задержек поездных локомотивов

Выводы

Анализируя полученные при заданных условиях и параметрах результаты моделирования, можно сделать следующие выводы:

- максимальное количество нечетных грузовых поездов, которое удалось пропустить через приемоотправочный парк, составило 48 %;
- приемоотправочные пути загружены до 84 %;
- локомотивный тупик имеет загрузку до 76 %;
- центральная горловина загружена до 39 %;
- задержки поездных локомотивов составили от 10 до 83 мин.

Таким образом, самым загруженным элементом в рассматриваемой системе являются приемоотправочные пути, но при этом очевидно, что их высокая загрузка является, в том числе, следствием задержек поездных локомотивов на элементе «локомотивный тупик» в ожидании освобождения горловины. В этой связи вариант с сооружением обходного пути, позволяющим разгрузить горловину от отправляющихся нечетных грузовых поездов, а значит, уменьшить продолжительность нахождения поездных локомотивов в локомотивном тупике, является единственно возможным. Для определения границ эффективности данного варианта целесообразно использовать метод имитационного моделирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Организация тяжеловесного движения на восточном участке Байкало-Амурской магистрали / Т.Н. Каликина, Ю.А. Давыдов, А.К. Пляскин [и др.] // Инновационный транспорт. 2016. № 2 (20). С. 72–74.
2. Четчуев М.В., Костенко В.В., Хомич Д.И. Санкт-Петербургский железнодорожный узел: перспективы развития // Транспорт Российской Федерации. 2020. № 1(86). С. 11–13.
3. Четчуев М.В. Об отмене устаревших нормативных актов // Железнодорожный транспорт. 2020. № 12. С. 52–53.
4. Хабаров М.Д., Куклев Д.Н. Об обосновании строительства местного обхода на станции // Научно-техническое экономическое сотрудничество стран АТР в XXI в. 2021. Т. 1. С. 112–115.
5. Куклев Д.Н., Трофимов А.Ю. О факторах, определяющих целесообразность строительства местных обходов на участковых станциях / Д.Н. Куклев, // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2017. № 1(10). С. 14–16.
6. Куклев Д.Н. Обоснование целесообразности сооружения обходов железнодорожных узлов : автореф. дисс. ...

канд. техн. наук, 05.22.08 / Куклев Денис Николаевич. Санкт-Петербург, 2007. 24 с.

7. Медведева Н.В. Переустройство промежуточных раздельных пунктов для повышения скорости движения пассажирских поездов до 200 км/ч : дисс. ... канд. техн. наук, 05.22.08 / Медведева Наталья Владимировна. Санкт-Петербург, 2008. 188 с.

8. Куклев Д.Н., Куклева Н.В. О вариантах схемы горловины участковой станции при наличии обхода // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2020. № 2 (23). С. 15–17.

9. Куклев Д.Н., Куклева Н.В. Формализация процесса пропуска поездных локомотивов на участковой станции // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 2(19). С. 26–28.

10. Куклев Д.Н. Общие принципы имитационного моделирования пропуска локомотивов через локомотивное депо // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2017. № 2(11). С. 15–17.

REFERENCES

1. Organizatsiya tyazhelovesnogo dvizheniya na vostochnom uchastke Bajkalo-Amurskoj magistrali [Organization of heavy weight traffic at the eastern section of the Baikal-Amur mainline] / T.N. Kalikina, Yu.A. Davydov, A.K. Plyaskin [et al.] // Innovatsionnyj transport. 2016. № 2(20). S. 72–74.
2. Chetchuev M.V., Kostenko V.V., Homich D.I. Sankt-Peterburgskij zheleznodorozhnyj uzol: perspektivy razvitiya [Saint-Petersburg railroad junction: perspectives for development] // Transport Rossijskoj Federatsii. 2020. № 1(86). S. 11–13.

3. Chetchuev, M.V. Ob otmene ustarevshih normativnyh aktov [On cancelling outdated normative acts] // Zheleznodorozhnyj transport. 2020. № 12. S. 52–53.

4. Habarov M.D., Kuklev D.N. Ob obosnovanii stroitel'stva mestnogo obhoda na stantsii [On justification of construction of local rounds at section stations] // Nauchno-tehnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI v. 2021. Vol. 1. S. 112–115.

5. Kuklev D.N., Trofimov A.Yu. O faktorakh, opredelyayushchikh tselesoobraznost' stroitel'stva mestnykh obhodov na uchastkovykh stantsiyah [On factors, determining expedience of the construction of local rounds at section stations] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2017. № 1(10). S. 14–16.
6. Kuklev D.N. Obosnovanie tselesoobraznosti sooruzheniya obhodov zheleznodorozhnykh uzlov [Justification of expedience of construction of the railroad junctions' rounds] : avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk, 05.22.08 / Kuklev Denis Nikolaevich. Sankt-Peterburg, 2007. 24 s.
7. Medvedeva N.V. Pereustrojstvo promezhutochnykh razdel'nykh punktov dlya povysheniya skorosti dvizheniya passazhirskikh poezdov do 200 km/ch [Restructuring intermediate separation points to increase passenger trains' speed up to 200 km per hour] : diss. ... kand. tekhn. nauk, 05.22.08 / Medvedeva Natal'ya Vladimirovna. – Sankt-Peterburg, 2008. 188 s.
8. Kuklev D.N., Kukleva N.V. O variantakh skhemy gorloviny uchastkovoy stantsii pri nalichii obkhoda [On variants of the scheme of a section station's neck if a round is available] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2020. № 2 (23). S. 15–17.
9. Kuklev D.N., Kukleva N.V. Formalizatsiya processa propuska poezdnykh lokomotivov na uchastkovoy stantsii [Formalization of the process of train locomotives' passage at a section station] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2019. № 2(19). S. 26–28.
10. Kuklev D.N. Obshchie printsipy imitatsionnogo modelirovaniya propuska lokomotivov cherez lokomotivnoe depo [General principles of imitation modelling of locomotives' passage through a locomotive depot] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2017. № 2(11). S. 15–17.

Информация об авторах

Д.Н. Куклев – кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер отдела станций и узлов;

Н.В. Куклева – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы».

Information about the authors

D.N. Kuklev – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Lead Engineer of the Department of Stations and Nodes;

N.V. Kukleva – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Stations and Nodes.

Статья поступила в редакцию 23.07.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.
The article was submitted: 23.07.2024; approved after reviewing: 17.10.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

Научная статья
УДК 624.9

К РАСЧЕТУ НА УСТОЙЧИВОСТЬ П-ОБРАЗНОЙ РАМЫ С ЖЕСТКИМИ ОПОРАМИ

Ловцов Александр Дмитриевич

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, 000260@pnu.edu.ru

Аннотация. Рассматривается расчет на устойчивость П-образной рамы с жесткими опорами. Введено понятие ρ -подобных рам как рам с одинаковым отношением ρ -погонных жесткостей ригеля и стойки. Показано, что параметр v_{cr} , определяющий критическую нагрузку на раму, одинаков для ρ -подобных рам. Получены приближенные формулы, позволяющие определить критический параметр нагрузки v_{cr} и расчетные длины сжатых стержней с погрешностью не более 2 %.

Ключевые слова: плоская рама, устойчивость, критическая сила, коэффициент приведенной длины, ρ -подобные рамы, аппроксимация, метод наименьших квадратов

Original article

CALCULATION OF STABILITY OF П-SHAPED FRAME WITH RIGID SUPPORTS

Lovtsov Alexander D.

Pacific State University, Khabarovsk, 000260@pnu.edu.ru

Abstract. The stability calculation of a П-shaped frame with rigid supports is considered. The concept of ρ -like frames is introduced as frames with the same ratio of ρ linear stiffnesses of transom and strut. It is shown that the parameter v_{cr} which determines the critical load on the frame, is the same for ρ -like frames. Approximate formulas allowing to determine the critical load parameter v_{cr} and design lengths of compressed bars with an error not exceeding 2 % are obtained.

Keywords: plane frame, stability, critical force, reduced length coefficient, ρ -like frames, approximation, least squares method

Введение

Причинами отказов конструкции в 18–51 % случаев являются ошибки проектирования [1]. Для металлических конструкций потеря устойчивости является причиной отказов в 22–44 % случаев. На этапе эскизного проектирования важно иметь простые способы определения расчетных длин сжатых элементов конструкции [2–4]. В статье [5] для однопролетной двухэтажной шарнирно опертой рамы удалось получить простое выражение для параметра v_{cr} , определяющего критическую нагрузку на раму. В настоящей статье показано получение аналогичной зависимости для П-образной рамы с жесткими опорами.

Изменение критической нагрузки на этаж при произвольном распределении сил, сжимающих стойки рамы. Рассмотрим одноэтажную однопролетную раму с жесткими опорами (рис. 1). В случае многоэтажных многопролетных рам величина критической нагрузки на раму F_{cr} зависит от распределения сил F_i по этажам рамы [6, 7].

Для рассматриваемой же рамы замечено, что распределение сжимающих стойки сил $F_1 = \alpha F$, $F_2 = (1 - \alpha)F$ ($\alpha \leq 1$) (рис. 1, а) практически не влияет на величину равнодействующей $R_{cr} = F_{1cr} + F_{2cr} = F_{cr}$ этих сил. Минимальное значение F_{cr}^{min} наблюдается при загрузении одной стой-

ки (рис. 1, б), максимальное значение F_{cr}^{max} – при загрузении стоек двумя одинаковыми силами (рис. 1, в). Равнодействующая F_{cr} , именуемая в дальнейшем «нагрузка на этаж», для всех остальных комбинаций загрузки лежит в пределах $F_{cr}^{min} \leq F_{cr} \leq F_{cr}^{max}$. Разница значений F_{cr}^{max} и F_{cr}^{min} составляет не более 1,5 %.

На рис. 2, а, б представлены две рамы и результаты расчета (рис. 2, в), полученные классическим методом перемещений [8].

Максимальная разница в значениях v_{cr} составила $\frac{4,1071 - 4,0767}{4,0767} \cdot 100 = 0,746 \%$, в значениях критической силы $-\frac{1,8742 - 1,8466}{1,8466} \cdot 100 = 1,495 \%$. В таблице на рис. 2, в значения критических сил F_{cr} а, F_{cr} б приведены в долях от EI и соответствуют, первая – раме на рис. 2, а, вторая – раме на рис. 2, б.

Из факта практической неизменности величины F_{cr} вытекает упрощение расчета. А именно: достаточно рассчитать раму на действие единственной силы $F_1 = F$; определить критический параметр v_{cr} и силу $F_{cr} = v_{cr}^2 \frac{EI}{h^2}$; полученная F_{cr} будет, как показали расчеты, с погрешностью в 1,5 % определять равнодействующую сжимающих сил при любом другом их распределении по стойкам.

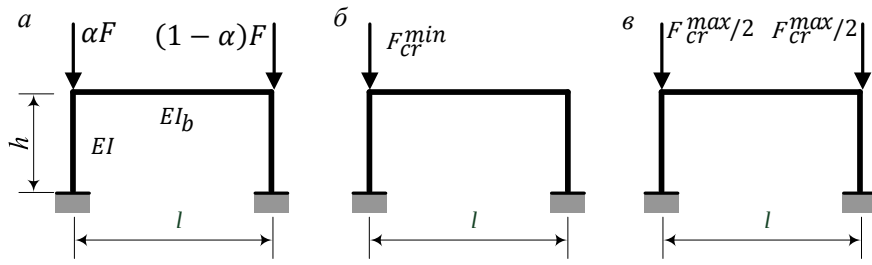


Рис. 1. Расчетная схема рамы. Варианты загрузки: а – произвольная нагрузка на этаж; б – минимальная нагрузка на этаж; в – максимальная нагрузка на этаж

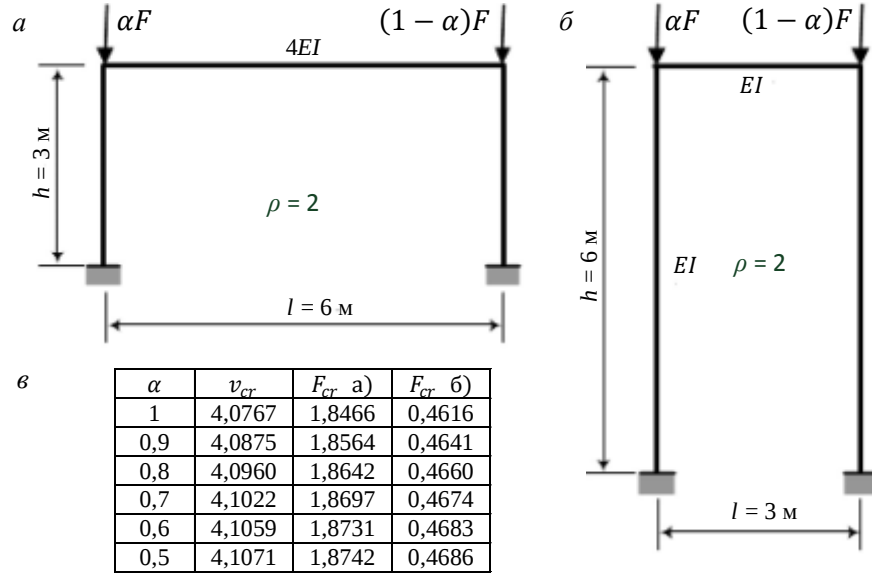


Рис. 2. Расчетные схемы рам (а, б), результаты расчета при разном распределении нагрузки на этаж (в)

Пусть рама пролетом l , высотой $h = l/2$, жесткостью стоек EI , жесткостью ригеля $4EI$ загружена двумя силами F_1 и $F_2 = 2F_1$. Тогда решается более простая задача загрузки рамы одной силой F и определяется $v_{cr} = 4,0767$, $F_{cr} = 16,619 \frac{EI}{h^2}$. Этот результат отличается от точного $16,839 \frac{EI}{h^2}$ (учитывающего $\alpha = 1/3$) на 1,3 %.

ρ -подобные рамы

Решим упрощенную задачу расчета рамы с загрузкой одной стойки. Обозначим: $i_b = EI_b/l$ – погонная жесткость ригеля; $i = EI/h$ – погонная жесткость стоек; $\rho = i_b/i$ – отношение погонных жесткостей ригеля и стойки; $v = h\sqrt{F/EI}$.

Для основной системы метода перемещений обозначим z_1, z_2 – угловые перемещения левого и правого жестких узлов рамы, z_3 – линейное перемещение ригеля. Тогда матрица жесткости

$$R(v, \rho, i, h) = i \begin{pmatrix} 4(\varphi_2(v) + \rho) & 2\rho & -6\varphi_4(v)/h \\ 2\rho & 4(1 + \rho) & -6/h \\ -6\varphi_4(v)/h & -6/h & 12/h^2 (1 + \eta_2(v)) \end{pmatrix},$$

где $\eta_2(v) = \frac{(v/2)^3}{3(\text{tg}^2 \frac{v}{2})}$, $\varphi_2(v) = \frac{v}{8\text{tg} v} \frac{\text{tg} v - v}{\text{tg}^2 \frac{v}{2}}$, $\varphi_4(v) = \frac{(v/2)^2}{3} \frac{\text{tg}^2 \frac{v}{2}}{\text{tg}^2 \frac{v}{2} - \frac{v}{2}}$ – функции, применяемые при расчете на устойчивость методом перемещений.

Определитель матрицы жесткости

$$D(\rho, v, i, h) = |R(v, \rho, i, h)| = \frac{48i^3}{h^2} \bar{D}(\rho, v),$$

где

$$\bar{D}(\rho, v) = [4(\rho + 1)\eta_2(v) + 4\rho + 1]\varphi_2(v) - 3(\rho + 1)\varphi_4^2(v) + 3\rho\varphi_4(v) + (3\rho^2 + 4\rho)\eta_2(v) + 3\rho^2 + \rho.$$

Таким образом, уравнение устойчивости

$$\bar{D}(\rho, v_{cr}) = 0 \quad (1)$$

не зависит в явном виде от EI, EI_b, l, h , а зависит от отношения погонных жесткостей ригеля и стойки ρ и параметра v_{cr} , задавая тем самым неявную функцию $v_{cr} = v_{cr}(\rho)$.

Получить аналитическое выражение из (1) для $v(\rho)$ не представляется возможным. Однако можно сделать вывод о том, что критический пара-

метр v_{cr} зависит только от отношения погонных жесткостей ригеля и стойки. Следовательно, для множества рам с одинаковыми ρ и α параметр v_{cr} останется неизменным. Нагрузка на этаж при этом $F_{cr} = v_{cr}^2 \frac{EI}{h^2}$.

Назовем такое множество рам ρ -подобными рамами.

Например, рама с $h = 2l$ и жесткостью ригеля EI (см. рис. 2, б) подобна вышерассмотренной раме (см. рис. 2, а), поскольку для нее $\rho = 2$. Следовательно, для этой рамы v_{cr} также равно 4,0767 (см. рис. 2, в).

Аппроксимация зависимости $v_{cr} = v_{cr}(\rho)$

Поскольку нелинейное уравнение (1) не поддается аналитическому решению, проведем серию расчетов для рамы, меняя в ней только жесткость ригеля EI_r , что приводит к изменению отношения погонных жесткостей $\rho = 1 \times 10^m$ ($m = \log \rho$). Результаты расчета сведены в таблицу (рис. 3, а) и представлены крестиками на рис. 3, б. Графически эти результаты удобно представить в логарифмической шкале.

Прокомментируем полученный график.

При $\rho \rightarrow \infty$ имеем предельный случай ригеля абсолютно жесткого и на изгиб, и на растяжение/сжатие

(рис. 4, а). Решение уравнения устойчивости $\eta_2(v) + 1 = 0$ дает $v_{cr} = 4,407\,287 = 1,403\pi \approx 1,4\pi$.

При $\rho \rightarrow 0$ имеем предельный случай ригеля бесконечно малой жесткости на изгиб и бесконечно большой жесткости на растяжение/сжатие (рис. 4, б). Решение уравнения устойчивости $\eta_1(v) + 1 = 0$ дает $v_{cr} = 2,203\,644 = 0,701\pi \approx 0,7\pi$.

Таким образом, критический параметр v_{cr} лежит в пределах $0,7\pi \leq v_{cr} \leq 1,4\pi$.

На отрезке от $-6 \leq \log \rho \leq -4$ параметр v_{cr} практически не меняется и близок к предельному $0,7\pi$. На отрезке от $4 \leq \log \rho \leq 6$ параметр v_{cr} также практически не меняется и близок к предельному $1,4\pi$ (см. таблицу рис. 3, а). На отрезке $-4 \leq \log \rho \leq 4$ зависимость $v_{cr} = v_{cr}(\log \rho) = v_{cr}(m)$ была аппроксимирована (с использованием метода наименьших квадратов) выражением следующего вида:

$$v_{cr}(m) = 3,303 + 0,785 \operatorname{arctg}(2,05m + 0,821),$$

где $m = \log \rho$.

В общем случае

$$v(m) = \begin{cases} 0,701\pi & \text{если } m \leq -4, \\ 3,303 + 0,785 \operatorname{arctg}(2,05m + 0,821) & \text{если } -4 < m < 4, \\ 1,403\pi & \text{если } m \geq 4. \end{cases} \quad (2)$$

График полученной зависимости показан сплошной линией на рис. 3, б.

Алгоритм расчета П-образной рамы на устойчивость:

а) по данным расчетной схемы определяется относительная погонная жесткость ригеля $\rho = \frac{EI_r h}{EI_c l}$ и $m = \log \rho$;

б) по зависимости (2) определяется значение параметра $v_{cr} = v_{cr}(m)$;

в) определяется равнодействующая сжимающих раму сил $F_{cr} = \frac{v_{cr}^2 EI}{h^2}$;

г) задаем $\alpha \leq 1$, распределяя тем самым нагрузку на этаж по стойкам: $F_1 = \alpha F$, $F_2 = (1 - \alpha)F$;

д) определяем $v_1 = h \sqrt{\frac{F_1}{EI}} = v_{cr} \sqrt{\alpha}$, $v_2 = h \sqrt{\frac{F_2}{EI}} = v_{cr} \sqrt{1 - \alpha}$;

е) определяем коэффициенты приведенных длин $\mu_1 = \frac{\pi}{v_1}$, $\mu_2 = \frac{\pi}{v_2}$.

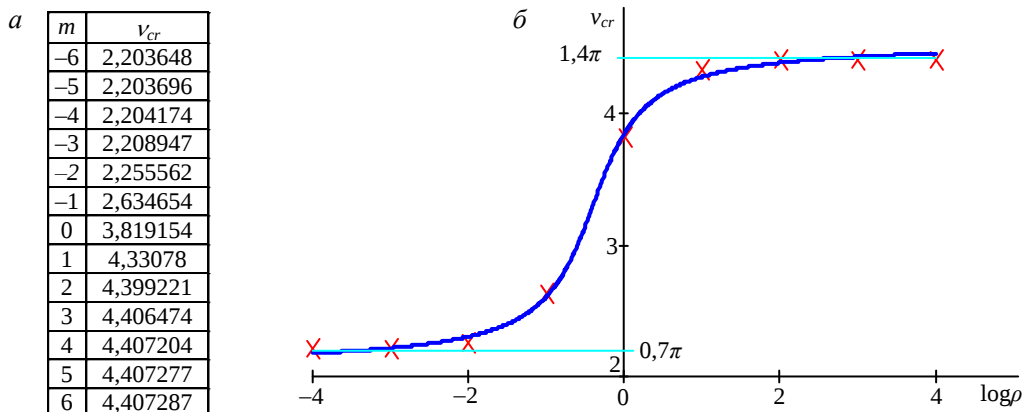


Рис. 3. Результаты численного эксперимента: а – табличное; б – графическое представление результатов

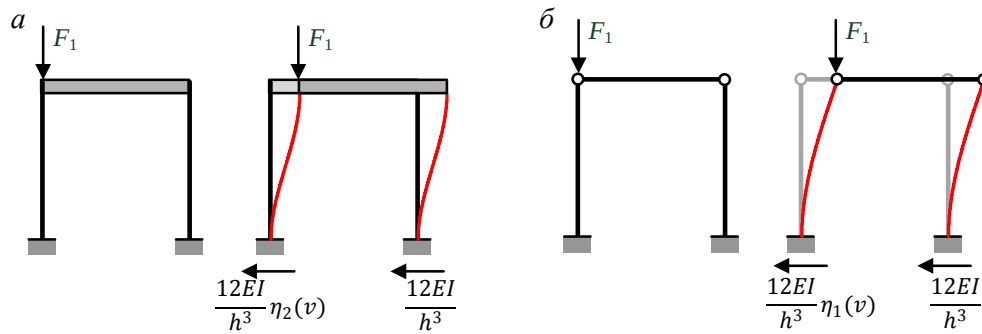


Рис. 4. Предельные случаи относительной жесткости: а – бесконечно большая жесткость на изгиб; б – бесконечно малая жесткость на изгиб

Пример: $l = 24$ м; $h = 5$ м; $EI_b = 13EI$;

$F_2 = 3,5F_1$;

а) $\rho = \frac{13 \cdot 5}{1 \cdot 24} = 2,708$, $m = \log 2,708 = 0,4327$;

б) $v_{cr} = 3,303 + 0,785 \arctg(2,05 \log 2,708 + 0,821) = 4,120$;

в) $F_{cr} = \frac{v_{cr}^2 EI}{h^2} = \frac{4,12^2 EI}{5^2} = 0,679 EI$;

г) $\alpha = \frac{1}{1+3,5} = \frac{2}{9}$;

д) $v_1 = v_{cr} \sqrt{\alpha} = 4,12 \sqrt{\frac{2}{9}} = 1,942$, $v_2 =$

$= v_{cr} \sqrt{1-\alpha} = 4,12 \sqrt{1-\frac{2}{9}} = 3,634$;

е) $\mu_1 = \frac{\pi}{v_1} = \frac{\pi}{1,942} = 1,617$; $\mu_2 = \frac{\pi}{v_2} = \frac{\pi}{3,634} =$

$= 0,865$.
Точное решение: $v_{cr} = 4,177$; $F_{cr} = 0,698 EI$.

Погрешность определения v_{cr} составила 1,4 %, F_{cr} – 2,8 %.

Выводы

Для однопролетной одноэтажной рамы с жестким опиранием стоек при расчете на устойчивость введено понятие ρ -подобных рам как рам с одинаковым отношением ρ погонных жесткостей ригеля и стойки.

Критический параметр v_{cr} , определяющий критическую нагрузку на раму, зависит только от ρ и для ρ -подобных рам одинаков.

Получены приближенные формулы, позволяющие определить критический параметр нагрузки v_{cr} («в запас») во всем диапазоне ρ и расчетные длины сжатых стержней с погрешностью не более 2 %.

Показано, что величина критической нагрузки на раму определяется «в запас» и практически не зависит от распределения сил по узлам рамы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Арушонюк Ю.Ю. Об ошибках проектирования строительных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2021. № 11. URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7285 (дата обращения: 18.09.2024).
2. Лиманцев А.А. Универсальные формулы для определения расчетной длины элементов крестовой решетки // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5. URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6951 (дата обращения: 18.09.2024).
3. Aghayere A., Vigil J. Structural steel design: a practice-oriented approach. Prentice Hall, 2009. P. 692.
4. Sukhvarsh J. Structural stability theory and practice: buckling of columns, beams, plates, and shells. Hoboken : Wiley, 2021. P. 642.
5. Ловцов А.Д., Мишакин И.Е., Пак Ю.А. К определению критической нагрузки на однопролетную двухэтажную шарнирно опертую раму // Инженерный вестник Дона. 2022. № 7. URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7803 (дата обращения: 18.09.2024).

6. Дворников В.А., Ловцов А.Д., Чернобров Е.О. Влияние схемы нагружения на величину критической силы для многопролетной многоэтажной плоской рамы // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса : материалы Международной научно-практической конференции. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2015. Вып. 15. С. 345–347.
7. Дворников В.А., Ловцов А.Д., Чернобров Е.О. Влияние схемы нагружения на расчетные длины стержней многопролетной многоэтажной рамы // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса : материалы Международной научно-практической конференции. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2016. Вып. 16. С. 460–462.
8. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / А.Ф. Смирнов [и др.]. Москва : Стройиздат, 1984. 415 с.

REFERENCES

1. Arushonok Yu.Yu. Ob oshibkakh proektirovaniya stroitel'nykh konstruktсий [About errors of building structures design] // Inzhenemy vestnik Dona. 2021. № 11. URL : ivdon.ru/en/magazine/archive/n11y2021/7285 (data obrasheniya: 18.09.2024).

2. Limantsev A.A. Universal'nye formuly dlya opredeleniya raschetnoj dliny elementov krestovoj reshetki [Universal formulas for determining the design length of cross lattice elements] // Inzhenemy vestnik Dona. 2021. № 5. URL : ivdon.ru/en/magazine/

archive/n5y2021/6951 (data obrasheniya: 18.09.2024).

3. Aghayere A., Vigil J. Structural steel design: a practice-oriented approach. Prentice Hall, 2009. P. 692.

4. Sukhvarsh J. Structural stability theory and practice: buckling of columns, beams, plates, and shells. Hoboken: Wiley, 2021. P. 642.

5. Lovtsov A.D., Mishakin I.E., Park Yu.A. K opredeleniyu kriticheskoy nagruzki na odnoproletnuyu dvukhetazhnuyu shamirnuyu opertuyu ramu [To determination of critical load on a single-span double-deck hinged frame] // Inzhenerny vestnik Dona. 2022. № 7. URL : ivdon.ru/en/magazine/archive/n7y2022/7803 (data obrasheniya: 18.09.2024).

6. Dvornikov V.A., Lovtsov A.D., Chernobrov E.O. Vliyanie skhemy zagruzheniya na velichinu kriticheskoy sily dlya mnogoproletnoj mnogoetazhnoj ploskoj ramy [Influence of loading scheme on the value of critical force for a multi-span multi-storey flat frame] // Dal'ny Vostok : problemy razvitiya

arkhitekturno-stroitel'nogo i dorozhno-transportnogo kompleksa : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Khabarovsk : Izd-vo TOGU, 2015. Vyp. 15. S. 345–347.

7. Dvornikov V.A., Lovtsov A.D., Chernobrov E.O. Vliyanie skhemy zagruzheniya na raschetnye dannye sterzhnej mnogoproletnoj mnogoetazhnoj ramy [Influence of loading scheme on design lengths of rods of a multi-span multi-storey frame] // Dal'ny Vostok : problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo i dorozhno-transportnogo kompleksa : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Khabarovsk : Izd-vo TOGU, 2016. Vyp. 16. S. 460–462.

8. Stroitel'naya mekhanika. Dinamika i ustojchivos' sooruzhenij [Structural mechanics. Dynamics and stability of structures] / A.F. Smirnov [et al.]. Moskva : Stroyizdat, 1984. 415 s.

Информация об авторе

А.Д. Ловцов – доктор технических наук, профессор Высшей школы промышленного и гражданского строительства.

Information about the author

A.D. Lovtsov – Doctor of Science (Engineering), Professor, Graduate School of Industrial and Civil Engineering.

Статья поступила в редакцию 10.07.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.
The article was submitted: 10.07.2024; approved after reviewing: 17.10.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

Научная статья
УДК 625.745.12

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕПАДОВ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УСТОЯ И СВАИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПУТЕПРОВОДА В УСЛОВИЯХ МЬЯНМЫ

Попов Виктор Иванович¹, Хтет Аунг²

^{1,2} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва

¹ vpopov@stpr.ru

² 1stonly90@gmail.com

Аннотация. Интегральные мосты имеют много преимуществ перед мостами с компенсаторами с точки зрения экономичности и затрат на техническое обслуживание. Для исследования поведения интегрального моста была разработана трехмерная нелинейная конечно-элементная модель, учитывающая нелинейность материала. Нелинейность материала учитывается при взаимодействии грунта и свай с помощью модели грунта Винклера с нелинейными пружинами грунта. Представлен современный уровень знаний и последние достижения в понимании поведения интегральных мостов в ответ на изменения температуры, включая перемещение устоя и свай. Для интегральных путепроводов важно понимать величину перемещений в сваях и в верхней части устоя, где расположена конструкция проезжей части. Влияние перепадов температуры на перемещения устоев и свай анализируется с помощью программного комплекса MIDAS Civil. При проектировании интегральных мостов температурные нагрузки играют ключевую роль.

Ключевые слова: интегральные мосты, перепад температуры, перемещение, устой, сваи

Original article

THE EFFECT OF TEMPERATURE CHANGES ON THE MOVEMENT OF THE ABUTMENT AND PILE OF THE INTEGRAL ABUTMENT BRIDGE IN CONDITIONS OF MYANMAR

Popov Viktor I.¹, Htet Aung²

^{1,2} Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow

¹ vpopov@stpr.ru

² 1stonly90@gmail.com

Abstract. Integral bridges have many advantages over bridges with expansion joints in terms of cost savings and maintenance costs. To study the behavior of integral abutment bridge, a three-dimensional non-linear finite element model has been developed that takes into account material nonlinearity. The nonlinearity of the material is considered for soil-pile interaction by using Winkler soil model with non-linear soil springs. This article presents the current level of knowledge and recent advances in understanding the behavior of integral bridges in response to temperature changes, including the displacement of abutments and piles. For integral overpasses, it is important to understand the amount of movement in the piles and in the upper part of the abutment, where the roadway structure is located. The effect of temperature changes on the displacement of abutments and piles is analyzed using the MIDAS Civil software. Temperature loads play a key role in the design of integral abutment bridges.

Keywords: Integral bridges, temperature changes, displacement, abutment, piles

Введение

Интегральный мост состоит из сплошного настила, жестко соединенного с опорами, что позволяет исключить деформационные швы. Затраты на техническое обслуживание деформационных швов и подшипников шарнирных мостов привели к более широкому использованию неразъемных опорных мостов по всему миру, особенно в США, Канаде, Великобритании и Южной Корее, где они становятся предпочтительной конструкцией для коротких и средних пролетов [1]. Благодаря исключению деформационных швов и компенсационных подшипников снижаются затраты на строительство и техническое обслуживание. Интегральный мост может

повысить эффективность проектирования, обеспечить резервирование и пропускную способность при катастрофических явлениях, улучшить распределение нагрузки на балки на концах моста, ускорить строительство, уменьшить проблемы с допусками и обеспечить больший диапазон передаточных чисел в концевых пролетах [2, 3].

Использование железобетонных свай в интегральных мостах не получило широкого распространения из-за опасений по поводу гибкости свай и возможности растрескивания бетона. Именно по этой причине в Соединенных Штатах предпочтительнее отдается стальным сваям. Однако в различных странах еще используются железобетонные сваи,

которые более доступны и экономичны. Следовательно, понимание поведения интегральных мостов с железобетонными сваями может привести к более широкому внедрению интегральных решений [4]. В Германии монолитные сваи большого диаметра используются для ограничения закручивания пролетного строения средних пролетов. Эти сваи обычно имеют диаметр 900 мм. Желаемое ограничение можно также получить, используя распространенные широкие опоры. Сборные железобетонные сваи и предварительно напряженные железобетонные сваи обычно не используются в Европе, за исключением Швеции, где они распространены во всех типах мостов, включая интегральные, благодаря их низкой стоимости и доступности [5].

Пролетное строение интегрального моста прикреплено к опорной конструкции, все перемещения и повороты пролетного строения передаются на опорную конструкцию. При температурном расширении устои смещаются к засыпке и от нее, тем самым увеличивая горизонтальное давление грунта за ними и создавая изгибающие моменты на свайных фундаментах. Жесткость устоя и давление грунта, воздействующее на устоя, сдерживают перемещения пролетного строения. Это приводит к взаимодействию пролетного строения, основания и окружающего грунта [6, 7].

Моделирование расчетных моделей и исходные данные

Климат в Мьянме носит тропический муссонный характер. Юг страны находится в субэкваториальной климатической зоне. Относительная влажность в стране в зависимости от месяца изменяется в диапазоне от 62 до 86 %. При этом минимальная влажность наблюдается в марте, максимальная влажность – в июле. Вследствие этого расчет интегральных путепроводов и мостов на действие температурных нагрузок является одной из актуальных проблем.

Данные собраны с официальной метеостанции в городе Мандалае на высоте 76 м над уровнем моря. Все данные соответствуют среднемесячным значениям за последние 20 лет. Средние температуры по месяцам для Мандалае даны на рис. 1. При расчетах приняты положительный и отрицательный перепады, определенные следующим образом: $TU(+) = +21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $TU(-) = -14,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для проведения исследований был принят однопролетный путепровод длиной пролетного строения переменной. В данной работе рассмотрено изменение длины пролета 20, 30 и 40 м. Пролетное строение состоит из пяти железобетонных балок с напрягаемой арматурой. В основании устоев расположены железобетонные сваи диаметром 600 мм и длиной 20 м.

Результаты геологических изысканий типовых разрезов центральной части Мьянмы (г. Мандалай) использовались для моделирования грунтового основания (рис. 3). Грунт насыпи за устоем имеет высоту 6 м.

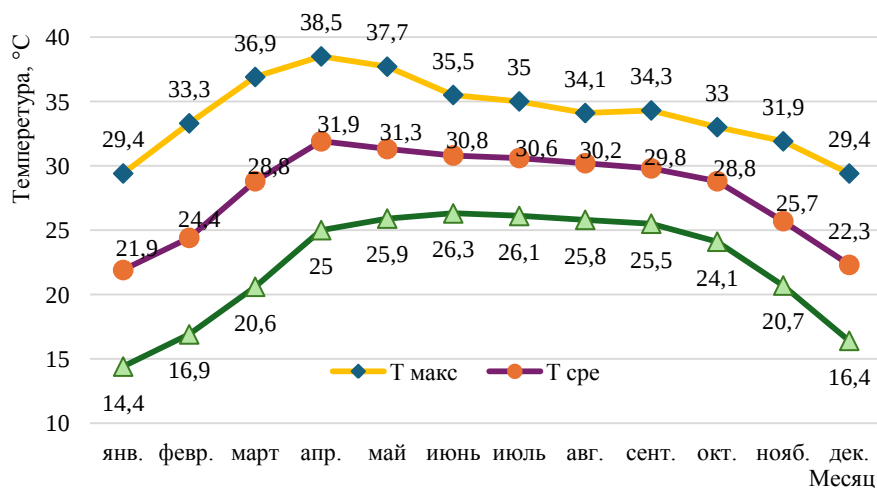


Рис. 1. Средние температуры по месяцам для города Мандалай

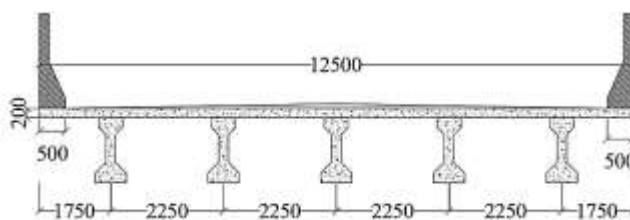


Рис. 2. Поперечное сечение пролетного строения путепровода

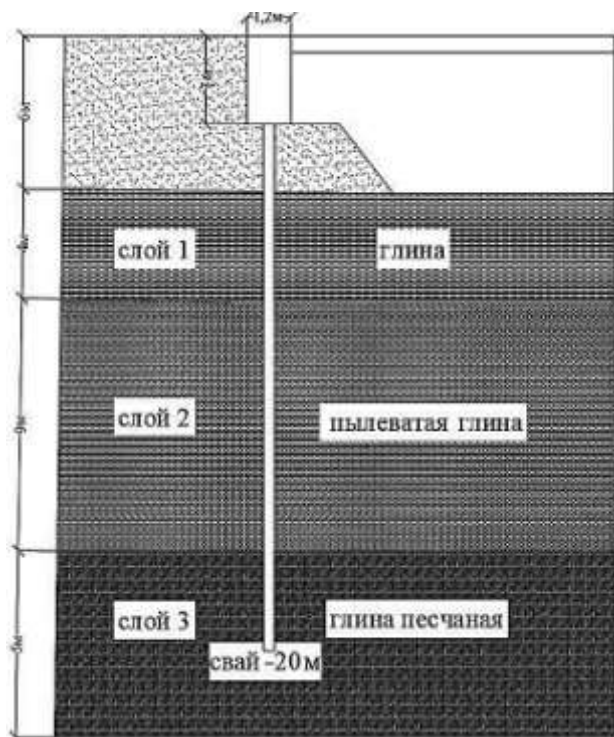


Рис. 3. Геологическая структура города Мандалая

Взаимодействие устоев, свай и насыпи описывалось пружинными моделями (модель Винклера). В модели пружинные опоры устанавливаются к узлам, являющимся точками разделения устоя и свай по их глубине. Жесткость пружины зависит от коэффициента постели грунта основания C и эффективной площади, прилегающей к соответствующим узлам. В данном случае необходимо учитывать, что грунт работает только на сжатие [8].

Модель Винклера является упругой линейной моделью местных деформаций и характеризуется коэффициентом постели $C = p/s$, где p – давление на основание; s – осадка основания. Значения коэффициента постели приводятся в справочниках в зависимости от вида грунта и его состояния.

С помощью программного обеспечения MIDAS Civil была создана трехмерная конечно-элементная модель (рис. 5) для анализа однопролетной конструкции интегрированного путепровода. Проезжая часть путепровода смоделирована с использованием элементов-оболочек с соответствующими конструктивными параметрами. Балки и сваи также смоделированы как стержневые элементы. Устои смоделированы с использованием пластинчатых элементов, а взаимодействие между устоями, сваями и насыпями описано с использованием пружинных моделей [9].

Результаты расчетов

Путем загрузки расчетной модели путепровода, с учётом перепада температур были получены перемещения верха свай и верха устоя.

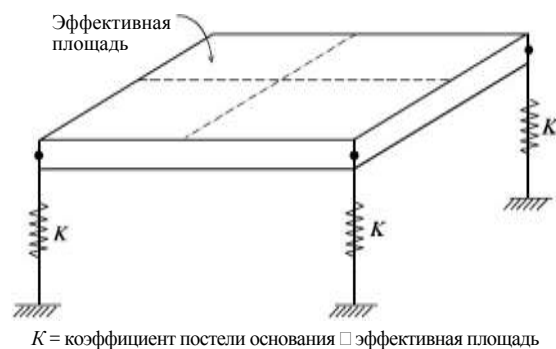


Рис. 4. Моделирование граничных условий с помощью пружинных опор



Рис. 5. Трехмерная конечно-элементная модель путепровода

В первом случае учитывался положительный перепад, равный $TU(+) = +21,1^\circ\text{C}$, что характерно для теплого времени года в Мьянме; во втором случае – отрицательный перепад температур, равный $TU(-) = -14,9^\circ\text{C}$, что характерно для холодного времени года.

Результаты расчетов перемещения верха устоя представлены на графиках рис. 6.

Наибольшее перемещение устоя для путепровода длиной 40 м составляет $-3,7$ мм при положительном перепаде температур и $2,8$ мм – при отрицательном. Для других путепроводов эти перемещения по абсолютной величине несколько меньше (рис. 6). Из графиков видно, что перемещение верха устоя от положительного перепада $+21,1^\circ\text{C}$ составили большие абсолютные величины, чем от отрицательного перепада $-15,6^\circ\text{C}$ соответственно.

Результаты расчетов перемещения верха свай представлены на графиках рис. 7.

Наибольшее перемещение свай для путепровода длиной 40 м составляет $-0,8$ мм при положительном перепаде температур и $1,4$ мм – при отрицательном. Для других путепроводов эти перемещения по абсолютной величине несколько меньше (рис. 7). Из графиков видно, что перемещение верха устоя от положительного перепада $+21,1^\circ\text{C}$ составили меньшие абсолютные величины, чем от отрицательного перепада $-15,6^\circ\text{C}$ соответственно.

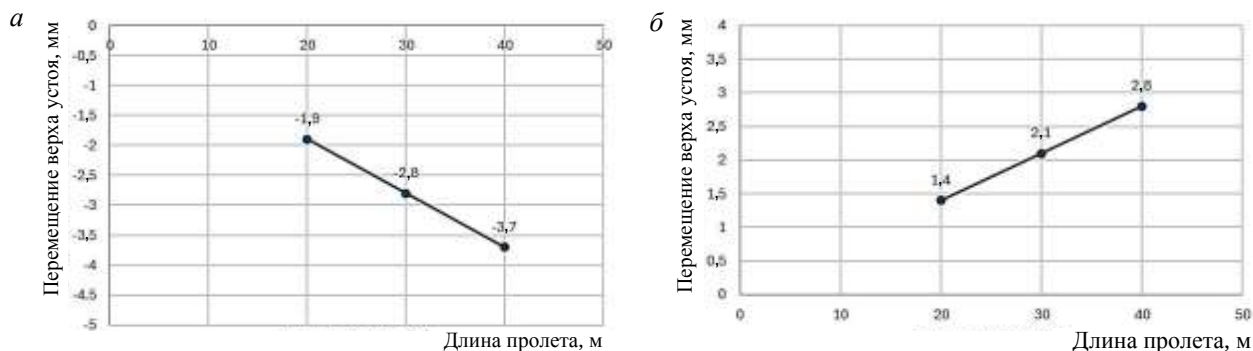


Рис. 6. Перемещения верха устоя: а – от воздействия положительных перепадов температур; б – отрицательных перепадов температур

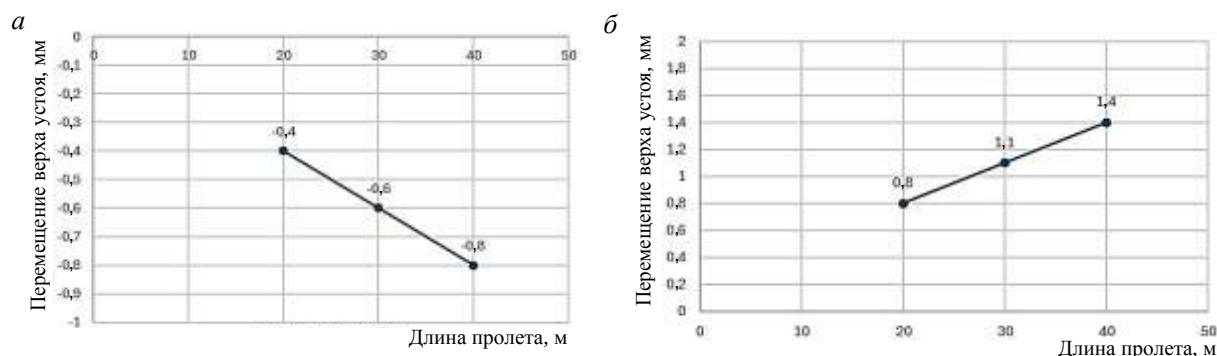


Рис. 7. Перемещения верха свай: а – от воздействия положительных перепадов температур; б – отрицательных перепадов температур

Закключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. С увеличением длины пролета путепровода перемещения как устоев, так и свай увеличиваются. Наибольшие перемещения наблюдаются для путепровода длиной 40 м, что подтверждает зависимость перемещений конструкций от длины пролета.

2. При положительном перепаде температур перемещения верхней части устоев составляют большие значения по сравнению с отрицательным перепадом. При отрицательном перепаде температур перемещения свай превышают перемещения, вызванные положительным перепадом.

3. Из результатов исследований видно, что устои подвержены большему перемещению при положительном перепаде температур, тогда как сваи испытывают большее перемещение при отрицательном перепаде. Это различие в поведении конструктивных элементов указывает на разные реакции на температурные воздействия.

Таким образом, температурные перепады оказывают существенное влияние на перемещения конструкций путепровода, и для более длинных пролетов их влияние становится особенно заметным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Narges Eisazadeh Far, Shervin Maleki, Majid Bargain. Design of integral abutment bridges for combined thermal and seismic loads // Earthquakes and Structures. 2015. Vol. 9, № 2. Pp. 415–430. doi:http://dx.doi.org/10.12989/eas.2015.9.2.415
2. Dunker K.F., Liu D., Magliola R. Foundation types for integral abutments // Conference paper. 2009. PCI CONFERENCE.
3. Dunker K.F., Liu D. Foundations for integral abutments // ASCE practice periodical on structural design and construction. February 2007. Pp. 22–30.
4. David J., Joao F. Almeida. Concrete integral abutment bridges with reinforced concrete piles. URL : <https://doi.org/10.1002/suco.201300081> (дата обращения: 18.09.2024).
5. Thomas Ch. An evaluation of the effect of skew on integral bridges by computer-based grillage analysis // MEng Individual Research Project. University of Portsmouth. January 2014.
6. Liu H., Han J., Parsons R.L. Integral bridge abutments in response to seasonal temperature changes: state of knowledge and recent advances. Front. Built environ. 2022. № 8. P. 916782. doi:10.3389/built.2022.916782
7. Krizek J. Integrated bridges. Integral Bridges, Dissertation Work // Czech Technical University in Prague. 2009. 136 p.
8. Analysis for Civil Structures. URL : https://www.midasoft.com/hubfs/Analysis_Reference.pdf (дата обращения: 18.09.2024).
9. MIDAS Civil Online Manual, Civil structure design system (Civil 2022). URL : https://manual.midasuser.com/EN_Common/Civil/910/index.htm (дата обращения: 18.09.2024).

REFERENCES

1. Narges Eisazadeh Far, Shervin Maleki, Majid Bargain. Design of integral abutment bridges for combined thermal and seismic loads // *Earthquakes and Structures*. 2015. Vol. 9, № 2. Pp. 415–430. doi:<http://dx.doi.org/10.12989/eas.2015.9.2.415>
2. Dunker K.F., Liu D., Magliola R. Foundation types for integral abutments // Conference paper. 2009. PCI CONFERENCE.
3. Dunker K.F., Liu D. Foundations for integral abutments // *ASCE practice periodical on structural design and construction*. February 2007. Pp. 22–30.
4. David J., Joao F. Almeida. Concrete integral abutment bridges with reinforced concrete piles. URL : <https://doi.org/10.1002/suco.201300081> (дата обращения: 18.09.2024).
5. Thomas Ch. An evaluation of the effect of skew on integral bridges by computer-based grillage analysis // MEng Individual Research Project. University of Portsmouth. January 2014.
6. Liu H., Han J., Parsons R.L. Integral bridge abutments in response to seasonal temperature changes: state of knowledge and recent advances. *Front. Built environ.* 2022. № 8. P. 916782. doi:10.3389/built.2022.916782
7. Krizek J. Integrated bridges. Integral Bridges, Dissertation Work // Czech Technical University in Prague. 2009. 136 p.
8. Analysis for Civil Structures. URL : https://www.midasoft.com/hubfs/Analysis_Reference.pdf (дата обращения: 18.09.2024).
9. MIDAS Civil Online Manual, Civil structure design system (Civil 2022). URL : https://manual.midasuser.com/EN_Common/Civil/910/index.htm (дата обращения: 18.09.2024).

Информация об авторах

В.И. Попов – кандидат технических наук, профессор кафедры «Мосты, тоннели и строительные конструкции»;
Хтет Аунг – аспирант кафедры «Мосты, тоннели и строительные конструкции».

Information about the authors

V.I. Popov – Candidate of Science (Engineering), Professor at the Departments of Bridges, Tunnels and Civil Engineering Structures;
Htet Aung – Postgraduate at the Departments of Bridges, Tunnels and Civil Engineering Structures.

Статья поступила в редакцию 21.09.2024; одобрена после рецензирования 16.10.2024; принята к публикации 16.10.2024.
The article was submitted: 21.09.2024; approved after reviewing: 16.10.2024; accepted for publication: 16.10.2024.

Научная статья
УДК 620.92

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВТОРИЧНЫХ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Кузнецов Павел Николаевич¹, Штепа Кирилл Витальевич², Губин Владимир Евгеньевич³,
Муровский Сергей Петрович⁴, Кувшинов Владимир Владиславович⁵

^{1, 2, 3, 5} Севастопольский государственный университет, Севастополь

⁴ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

¹ PNKuznetsov@sevsu.ru

² stillen75@mail.ru

³ VEGubin@sevsu.ru

⁴ murovski@inbox.ru

⁵ vvkuvshinov@mail.sevsu.ru

Аннотация. Представлен комплексный анализ технологических решений по использованию вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов в специфических условиях Сибирского и Дальневосточного регионов. Разработаны две матрицы технологических решений: первая систематизирует проблемы внедрения и пути их преодоления для различных видов возобновляемой энергетики, вторая содержит оптимальные технологические схемы для разных типов потребителей с учетом доступных локальных энергоресурсов. Рассмотрены особенности применения солнечной, ветровой, малой гидроэнергетики, биоэнергетики и использования вторичных энергоресурсов промышленных предприятий. Особое внимание уделено анализу технологических барьеров и путей их преодоления с учетом климатических и инфраструктурных ограничений Сибири и Дальнего Востока. Результаты исследования могут быть использованы при разработке стратегий развития энергетического комплекса региона, а также при проектировании и модернизации систем энергообеспечения на принципах рационального природопользования и энергоэффективности.

Ключевые слова: матрица технологических решений, энергоэффективность, вторичные энергоресурсы, возобновляемые источники энергии, Сибирь, Дальний Восток, ветроэнергетика, солнечная энергетика, малая гидроэнергетика, биоэнергетика, геотермальная энергия, энергоснабжение, климатические условия

Original article

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE USE OF SECONDARY AND RENEWABLE ENERGY RESOURCES IN SIBERIA AND FAR EAST

Kuznetsov Pavel N.¹, Shtepa Kirill V.², Gubin Vladimir E.³,
Murovsky Sergey P.⁴, Kuvshinov Vladimir V.⁵

^{1, 2, 3, 5} Sevastopol State University, Sevastopol

⁴ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

¹ PNKuznetsov@sevsu.ru

² stillen75@mail.ru

³ VEGubin@sevsu.ru

⁴ murovski@inbox.ru

⁵ vvkuvshinov@mail.sevsu.ru

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of technological solutions for the use of secondary and renewable energy resources in the specific conditions of the Siberian and Far Eastern regions. Two matrices of technological solutions have been developed: the first systematizes the problems of implementation and ways to overcome them for various types of renewable energy, the second contains optimal technological schemes for different types of consumers, taking into account available local energy resources. The features of the application of solar, wind, small hydropower, bioenergy and the use of secondary energy resources of industrial enterprises are considered. Special attention is paid to the analysis of technological barriers and ways to overcome them, taking into account the climatic and infrastructural constraints of Siberia and Far East. The results of the study can be used in the development of strategies for the development of the energy complex of the region, as well as in the design and modernization of energy supply systems based on the principles of rational environmental management and energy efficiency.

Keywords: matrix of technological solutions, energy efficiency, secondary energy resources, renewable energy sources, Siberia, Far Eastern, wind energy, solar energy, small hydropower, bioenergy, geothermal energy, energy supply, climatic conditions

Введение

В современных условиях все большую актуаль-

ность приобретает вопрос рационального и эффективного использования энергетических ресурсов. Особенно остро эта проблема стоит в регионах с суровыми климатическими условиями, таких как Сибирь и Дальний Восток. Обширные территории, низкие температуры и удаленность от крупных энергетических центров создают дополнительные сложности в обеспечении надежного энергоснабжения. В связи с этим, использование вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов представляется перспективным направлением для повышения энергоэффективности и экологичности энергетических секторов Сибири и Дальнего Востока. Однако внедрение соответствующих технологий сопряжено с рядом технических, экономических и климатических барьеров, требующих детального анализа и поиска оптимальных решений.

Цель работы: комплексный анализ существующих и перспективных технологических решений по использованию вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов в специфических условиях Сибирского и Дальневосточного регионов. Рассматриваются особенности применения различных видов альтернативной энергетики, включая солнечную, ветровую, малую гидроэнергетику, биоэнергетику и использование вторичных энергоресурсов промышленных предприятий. Особое внимание уделяется анализу технологических барьеров и путей их преодоления с учетом климатических и инфраструктурных ограничений [1–4].

Результаты исследования могут быть использованы при разработке стратегий развития энергетического комплекса Сибири и Дальнего Востока, а также при проектировании конкретных объектов альтернативной энергетики в регионах.

Задачи исследования:

- разработать и проанализировать матрицу технологических решений по использованию вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов в условиях рассматриваемых регионов;
- по результатам анализа матрицы дать оценку возможности использования ВИЭ в условиях рассматриваемых регионов;
- в ходе анализа технологических решений выделить закономерности и взаимосвязи по использованию вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов для различных потребителей в условиях рассматриваемых регионов;
- дать оценку проведенного комплексного анализа существующих и перспективных технологических решений по использованию вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов в специфических условиях Сибири и Дальнего Востока.

Научная новизна заключается в разработке матрицы технологических решений по использованию вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов в условиях Сибири и Дальнего Востока для

систем тепло- и электроснабжения автономных и централизованных потребителей регионов. Эффективное использование вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов в условиях рассматриваемых регионов представляет собой комплексную научно-техническую задачу, требующую системного подхода с учетом специфических региональных особенностей. Данные регионы характеризуются рядом уникальных факторов, включая экстремальные климатические условия, обширные малонаселенные территории, неравномерное распределение энергетических ресурсов и инфраструктурные ограничения. Эти факторы оказывают существенное влияние на эффективность и целесообразность применения различных технологий альтернативной энергетики.

Для систематизации и структурирования имеющихся данных, а также с целью оптимизации процесса принятия решений при планировании и реализации энергетических проектов, была разработана многопараметрическая матрица технологических решений (табл. 1) [5–8]. Данный инструмент основан на методологии системного анализа и учитывает широкий спектр взаимосвязанных факторов, влияющих на выбор и эффективность энергетических технологий в условиях Сибири и Дальнего Востока.

Анализ разработанной матрицы технологических решений по использованию вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов в условиях рассматриваемых регионов выявляет ряд ключевых закономерностей и взаимосвязей.

Во-первых, очевидна общая тенденция: суровые климатические условия создают уникальный набор технологических вызовов для всех рассмотренных видов ВИЭ. Низкие температуры, обледенение, снежный покров и экстремальные погодные явления выступают универсальными факторами, ограничивающими эффективность и надежность энергетических систем. Это указывает на необходимость разработки комплексных инженерных решений, способных обеспечить устойчивое функционирование оборудования в широком диапазоне климатических условий.

Во-вторых, анализ выявляет значительную дифференциацию в характере и масштабе проблем для различных технологий ВИЭ. Если для ветроэнергетики и солнечной энергетики ключевыми являются вопросы адаптации оборудования к низким температурам и обледенению, то для малой гидроэнергетики на первый план выходят риски, связанные с сезонными колебаниями водности и ледовыми явлениями. Это подчеркивает важность дифференцированного подхода к развитию ВИЭ в регионе, учитывающего локальные природно-климатические особенности.

**Матрица технологических решений по использованию вторичных
и возобновляемых энергетических ресурсов**

Технология использования ВИЭ и ВЭР	Особенности территории	Проблемы использования технологий	Технологические решения
Ветро-энергетика	Низкие температуры воздуха (–20 °С...–50 °С) Высокая скорость ветра Частые метели и снегопады	Обледенение лопастей ветрогенераторов Сложность доступа для технического обслуживания в непогоду Повреждение оборудования при сильных ветрах и метелях	Использование специальных антиобледенительных покрытий Применение морозостойких материалов для ветрогенераторов Создание укрытий и ангаров для обслуживания ВЭУ Разработка автоматизированной системы мониторинга и диагностики
Солнечная энергетика	Низкая температура воздуха зимой Длительный снежный покров Полярная ночь на севере Высокая облачность	Обледенение и снег на поверхности солнечных панелей Снижение эффективности ФЭУ зимой и в полярную ночь Затрудненный доступ к очистке панелей	Разработка автоматизированных систем регулярной очистки Использование эффективных ФЭУ при низкой освещенности Сезонное использование солнечной энергии
Малая гидроэнергетика	Высокий уровень весеннего половодья Наличие ледохода на реках Удаленность и слабая транспортная инфраструктура	Риск разрушения гидросооружений при половодье Повреждение оборудования льдом при ледоходе Высокая стоимость логистики и строительства	Использование прочных конструкций с повышенным запасом надежности Разработка средств защиты от ледохода Применение местных строительных материалов
Геотермальная энергетика	Наличие многочисленных геотермальных источников и месторождений в Забайкалье, на Камчатке и др. Высокие температуры геотермальных вод (100–250 °С)	Высокая стоимость бурения и обустройства скважин (до \$2–5 млн за 1 МВт) Необходимость прокладки теплотрасс к потребителям	Создание кластеров из нескольких малых ГеоТЭС для снижения удельных затрат Использование бинарных энергоблоков для утилизации тепла Использование существующих скважин (например, после добычи нефти и газа)
Биоэнергетика	Значительные запасы древесных отходов в леспромпхозах Наличие отходов сельскохозяйственного производства	Сезонность поставок биомассы из-за погодных условий Высокие затраты на транспортировку сырья	Строительство био-ТЭС с резервуарами для хранения биотоплива Использование местных видов биомассы
Использование вторичных энергоресурсов	Большое количество металлургических, нефтехимических и других предприятий Наличие отходящего тепла, дымовых газов	Сложность сбора и транспортировки ВЭР от предприятий Неравномерность выработки ВЭР во времени	Строительство мини-ТЭЦ для утилизации ВЭР непосредственно на предприятиях Внедрение автоматизированных систем учета и контроля параметров

В-третьих, матрица демонстрирует, что многие технологические решения носят междисциплинарный характер и требуют интеграции достижений из различных областей науки и техники. Например, разработка антиобледенительных покрытий для ветрогенераторов или создание эффективных фотоэлектрических установок для работы при низкой освещенности предполагает синергию материаловедения, физики твердого тела и инженерных наук.

Четвертый важный аспект – это выявленная матрицей необходимость системного подхода к развитию ВИЭ в Сибири и на Дальнем Востоке. Многие технологические решения, такие как создание автоматизированных систем мониторинга или разработка средств защиты от экстремальных природных явлений, актуальны для нескольких видов ВИЭ одновременно [9, 10]. Это открывает возможности для создания универсальных техно-

логических платформ и стандартизации ряда технических решений.

Пятый ключевой момент связан с экономическими аспектами. Матрица показывает, что многие технологические решения направлены не только на повышение эффективности, но и на снижение капитальных и эксплуатационных затрат. Это особенно важно в контексте рассматриваемых территорий, где логистические и инфраструктурные ограничения существенно увеличивают стоимость проектов ВИЭ.

Шестой аспект касается потенциала локализации производства и использования местных ресурсов. Матрица демонстрирует, как многие технологические решения могут быть реализованы с использованием доступных в регионе материалов и компетенций, что открывает перспективы для развития местной промышленности и создания но-

вых рабочих мест.

Наконец, анализ матрицы позволяет выделить ряд критических технологий, развитие которых может стать ключевым фактором успеха ВИЭ в Сибири и на Дальнем Востоке. К ним относятся технологии энергоаккумулирования, интеллектуальные системы управления энергетическими объектами, а также технологии повышения энергоэффективности в экстремальных климатических условиях.

В целом матрица технологических решений демонстрирует, что, несмотря на значительные вызовы, существуют реальные технические возможности для эффективного использования ВИЭ в условиях Сибири и Дальнего Востока [11, 12]. Ключом к успеху является комплексный, междисциплинарный подход, ориентированный на разработку адаптированных к местным условиям инновационных решений.

Таким образом, составление матрицы, систематизирующей сведения об особенностях территории рассматриваемых регионов, проблемах внедрения технологий ВИЭ и путях их решения, является важной научно-практической задачей. Разработанная матрица может быть использована для создания эффективных проектов в области «зеленой» энергетики на территории Сибири и Дальнего Вос-

тока с учетом региональных климатических и географических факторов.

Матрица технологических решений по использованию вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов для различных потребителей. В рамках данного исследования была разработана матрица технологических решений по использованию вторичных (отходы производства и потребления) и возобновляемых (энергия солнца, ветра, воды) энергоресурсов в системах тепло- и электро-снабжения автономных и централизованных потребителей Сибирского и Дальневосточного регионов (табл. 2) [13, 14]. Матрица учитывает специфические климатические условия рассматриваемых территорий и особенности структуры топливно-энергетического баланса регионов. Для каждой категории потребителей предложены оптимальные технологические решения использования местных вторичных и возобновляемых энергоресурсов с учетом экономических и экологических критериев. Разработанная матрица может быть использована при планировании, проектировании и модернизации систем тепло- и энерго-снабжения с максимальным учетом местного энергетического потенциала.

Таблица 2

Матрица технологических решений по использованию вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов для различных потребителей

Тип потребителей	Доступные местные ресурсы	Технологические решения	Преимущества	Барьеры
Централизованное тепло-снабжение городов	Отходы деревообработки и ЖКХ	Теплофикационные котельные на биотопливе	Экологичность, низкая стоимость топлива, снижение зависимости от импорта ископаемого топлива	Сезонность сырья, логистика, необходимость строительства новых котельных или модернизации существующих
	Низкопотенциальное тепло промышленных стоков	Тепловые насосы	Высокая эффективность, экономия энергии, сокращение выбросов парниковых газов	Высокая стоимость, сложность монтажа и обслуживания, необходимость дополнительных источников энергии для работы насосов
	Ветровая энергия	Ветро-дизельные станции	Замещение дизтоплива, экологичность, возможность использования в отдаленных районах	Нестабильность выработки, высокая стоимость, шум и вибрация, воздействие на птиц и ландшафт
Сельскохозяйственные предприятия	Отходы животноводства	Биогазовые установки	Утилизация отходов, автономность, получение дополнительного продукта – биогумуса	Сложность эксплуатации, высокая стоимость, необходимость соблюдения санитарных норм и правил
	Солома и другая биомасса	Котлы на соломе	Доступность топлива, экологичность, использование отходов сельского хозяйства	Сезонность сырья, низкая энергетическая плотность топлива, необходимость специального оборудования для подачи и сжигания топлива
	Солнечная энергия	Солнечные водонагреватели	Экологичность, возможность использования в любых климатических условиях, долговечность	Высокая стоимость, зависимость от интенсивности солнечного излучения, необходимость дополнительных систем накопления и подогрева воды
Удаленные дома и поселки	Местные дрова и торф	Печи и котлы на твердом биотопливе	Доступность топлива, простота установки и обслуживания, традиционность	Трудоемкость эксплуатации, низкая эффективность, высокий уровень загрязнения воздуха
	Малые реки	МикроГЭС	Возобновляемость, экологичность, низкая стоимость производства электроэнергии	Неустойчивость генерации, зависимость от гидрологических условий, воздействие на экосистемы рек

Окончание табл. 2

Тип потребителей	Доступные местные ресурсы	Технологические решения	Преимущества	Барьеры
Автономные котельные в поселках	Местная древесина и торф	Котлы на древесном топливе	Доступность топлива, экологичность, снижение зависимости от импорта ископаемого топлива	Сезонность сырья, логистика, необходимость строительства новых котельных или модернизации существующих
	Солнечная энергия	Солнечные коллекторы	Экологичность, возможность использования в любых климатических условиях, долговечность	Высокая стоимость, зависимость от интенсивности солнечного излучения, необходимость дополнительных систем накопления и подогрева воды
	Гидроресурсы	МикроГЭС	Возобновляемость, экологичность, низкая стоимость производства электроэнергии	Неустойчивость генерации, зависимость от гидрологических условий, воздействие на экосистемы рек
Тепличные комбинаты	Геотермальная энергия	Тепловые насосы на геотермальном тепле	Высокая эффективность, экономия энергии, сокращение выбросов парниковых газов	Высокая стоимость бурения, риск засоления почвы и подземных вод, необходимость дополнительных источников энергии для работы насосов
	Отработанный пар турбин	Теплообменники утилизации тепла	Утилизация вторичных энергоресурсов, повышение эффективности тепловой генерации, снижение выбросов парниковых газов	Ограниченные объемы, высокая стоимость оборудования и монтажа, необходимость согласования с сетевыми организациями

Анализ разработанной матрицы технологических решений по использованию вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов для различных потребителей в условиях Сибири и Дальнего Востока выявляет ряд существенных закономерностей и взаимосвязей.

Прежде всего, обращает на себя внимание высокая степень дифференциации технологических решений в зависимости от типа потребителей и доступных локальных ресурсов. Это указывает на необходимость применения системного подхода при планировании энергетической инфраструктуры региона, учитывающего не только технические, но и социально-экономические факторы.

Примечательна тенденция к комплексному использованию различных видов энергоресурсов, что свидетельствует о потенциале создания гибридных энергетических систем. Такой подход может обеспечить повышение надежности энергоснабжения и эффективности использования ресурсов в условиях Сибири и Дальнего Востока. Анализ преимуществ и барьеров для внедрения различных технологий позволяет выявить ключевые факторы, определяющие их применимость. К таковым относятся: экономическая эффективность, экологичность, технологическая зрелость и соответствие местным условиям. При этом наблюдается определенный конфликт между экологическими преимуществами большинства решений на основе ВИЭ и экономическими барьерами их внедрения, что указывает на необходимость разработки специальных механизмов стимулирования и поддержки.

Особый интерес представляет преобладание биоэнергетических решений для ряда категорий потребителей, что может быть обусловлено как доступностью биоресурсов в регионе, так и относительной простотой их использования. Однако это также под-

нимает вопросы о долгосрочной устойчивости такого подхода и потенциальном воздействии на лесные экосистемы Сибири и Дальнего Востока.

Также важным аспектом является выявленная матрицей тенденция к повышению энергетической автономности потребителей, особенно в удаленных районах. Это может рассматриваться как адаптивная стратегия, учитывающая обширность территории и сложности с развитием централизованной инфраструктуры в условиях рассматриваемых регионов.

Анализ технологических барьеров указывает на ряд критических областей, требующих инновационных решений. К ним относятся: проблемы нестабильности генерации возобновляемых источников, необходимость адаптации оборудования к суровым климатическим условиям, а также вопросы интеграции новых технологий в существующие энергетические системы.

В целом матрица демонстрирует многогранность и комплексность задачи внедрения ВИЭ в Сибирском и Дальневосточном регионах. Она подчеркивает необходимость междисциплинарного подхода, объединяющего технологические инновации, экономическое моделирование, экологическую оценку и социальный инжиниринг. Результаты анализа могут служить основой для разработки адаптивной стратегии развития энергетики Сибири и Дальнего Востока, учитывающей уникальные особенности региона и потенциал инновационных технологий в области возобновляемой энергетики.

Заключение

Исследование позволило систематизировать имеющиеся данные о возможностях использования вторичных и возобновляемых энергоресурсов в системах жизнеобеспечения рассматриваемых регио-

нов. Основным результатом стала разработка двух матриц технологических решений для внедрения альтернативных энергетических технологий с учетом природно-климатических и инфраструктурных особенностей территории. Первая матрица систематизирует данные о проблемах и путях их преодоления для различных видов возобновляемой энергетики в условиях Сибири и Дальнего Востока. Она может быть использована при планировании проектов в этой сфере для выбора оптимальных технических решений. Вторая матрица содержит технологи-

ческие решения для разных типов потребителей с учетом доступных локальных энергоресурсов. Данная матрица позволяет выбрать наиболее подходящие для конкретных объектов способы использования вторичных и возобновляемых источников энергии.

Таким образом, разработанные в ходе исследования матрицы могут быть применены как инструмент оптимизации при проектировании и модернизации систем энергообеспечения в Сибирском и Дальневосточном регионах на принципах рационального природопользования и энергоэффективности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Развитие ВИЭ в России: потенциал и практические шаги / В.Х. Бердин, В.Ю. Поташников, А.О. Кокорин, Г.М. Юлкин // *Экономическая политика*. 2020. № 2. С. 106–135.
2. Горбачева Н.В. Управление возобновляемой энергетикой: мировой опыт и Сибирь // *Вопросы государственного и муниципального управления*. 2020. № 2. С. 85–113.
3. Муровский С.П. Повышение эффективности электро-снабжения удаленных объектов // *Строительство и техно-гическая безопасность*. 2021. № 20(72). С. 69–77.
4. Кузнецов П.Н., Котельников Д.Ю. Автоматизированный комплекс интеллектуального мониторинга ветровых электростанций // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2022. № 1(135). С. 4–10.
5. Кузнецов П.Н., Юфев Л.Ю. Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при последовательном подключении // *Вестник ВИЭСХ*. 2017. № 1(26). С. 90–97.
6. Любимова Е.В. Развитие возобновляемой энергетики в Сибирском федеральном округе на фоне общероссийских тенденций // *Экономика Сибири в условиях глобальных вызовов XXI века : сборник статей*. В 6 т. Т. 3. Новосибирск : Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 2018. С. 89–100.
7. Носачева Т.В., Морозова С.А. Использование возобновляемых источников электроэнергии при энергоснабжении удаленных и изолированных потребителей // *Современные прикладные исследования : материалы 5-й национальной научно-практической конференции, Шахты, 17–19 марта 2021 г.* Т. 1. Новочеркасск : Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2021. С. 264–271.
8. Носкова А.И., Токранова М.В. Обзор автоматизированных систем мониторинга // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2017. № 1.
9. Поваров О.А., Томаров Г.В., Кошкин Н.Л. Состояние и перспективы развития геотермальной энергетики России // *Теплоэнергетика*. 1994. № 2. С. 15–22.
10. Транспортная и энергетическая инфраструктура в развитии производительных сил макрорегиона / М.Б. Петров, В.В. Литовский, А.Ю. Домников [и др.]. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2022. 275 с.
11. Фиашев А.Г., Хамоков М.М., Кильчукова О.Х. Использование вторичных энергетических ресурсов // *Актуальные вопросы энергетики в АПК: Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Благовещенск, 19 февраля 2020 г.* Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2020.
12. Техничко-экономические аспекты развития автономных солнечных энергетических систем / Е.Г. Какушина, Б.А. Якимович, В.В. Кувшинов [и др.] // *Энергетические установки и технологии*. 2018. Т. 4, № 4. С. 55–60.
13. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading / P.N. Kuznetsov, V.V. Kuvshinov, A.G. Al-Bairmani [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science*. 2020. Vol. 18, № 3. С. 313–330.
14. Methods improving energy efficiency of photovoltaic systems operating under partial shading / P. Kuznetsov, L. Yuferev, V.A. Panchenko [et al.] // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11, № 22.

REFERENCES

1. Razvitie VIE v Rossii: potentsial i prakticheskie shagi [Development of renewable energy sources in Russia: potential and practical steps] / V.Kh. Berdin, V.Yu. Potashnikov, A.O. Kokorin, G.M. Yulkin // *Ekonomiceskaya politika*. 2020. № 2. S. 106–135.
2. Gorbacheva N.V. Upravlenie vozobnovlyаемoj energetikoj: mirovoj opyt i Sibir' [Management of renewable energetics: world experience and Siberia] // *Voprosy gosudarstvennogo i municipal'nogo upravleniya*. 2020. № 2. S. 85–113.
3. Murovskiy S.P. Povysenie effektivnosti elektrosnabzheniya udalennykh obektov [Improvement of the efficiency of electricity supply to remote facilities] // *Stroitel'stvo i tehnogennaya bezopasnost'*. 2021. № 20(72). S. 69–77.
4. Kuznetsov P.N., Kotelnikov D.Yu. Avtomatizirovannyj kompleks intellektual'nogo monitoringa vetrovykh elektro-
- stantsij [Automated complex of intellectual monitoring of wind power stations] // *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2022. № 1(135). S. 4–10.
5. Kuznetsov P.N., Yuferev L.Yu. Povyshenie effektivnosti raboty fotoelektricheskikh preobrazovatelej pri posledovatel'nom podklyuchenii [Increase of operation efficiency of photoelectric converters with series connection] // *Vestnik VIESKh*. 2017. № 1(26). S. 90–97.
6. Lyubimova E.V. Razvitie vozobnovlyаемoj energetiki v Sibirskom federal'nom okruge na fone obshherossijskikh tendentsij [Development of renewable energetics in the Siberian federal district at the background of all-Russia trends] // *Ekonomika Sibiri v usloviyakh global'nykh vyzovov XXI v. : sbornik statej*. V 6 t. Vol. 3. Novosibirsk : Institut ekonomiki i organizatsii promyshlennogo proizvodstva SO RAN, 2018. S. 89–100.

7. Nosacheva T.V., Morozova S.A. Ispolzovanie vozobnovlyaemykh istochnikov elektroenergii pri energosnabzhenii udalennykh i izolirovannykh potrebitel'ev [Use of renewable energy sources when supplying electricity to remote and isolated consumers] // *Sovremennye prikladnye issledovaniya : materialy 5-j natsional'noj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Shakhty, 17–19 marta 2021 g. T. 1. Novocherkassk : Yuzhno-Rossiiskij gosudarstvenny politekhnicheskij universitet (NPI) imeni M.I. Platova, 2021. S. 264–271.*

8. Noskova A.I., Tokranova M.V. Obzor avtomatizirovannykh sistem monitoringa [Review of automated monitoring systems] // *Intellektual'nye tekhnologii na transporte. 2017. № 1.*

9. Povarov O.A., Tomarov G.V., Koshkin N.L. Sostoyanie i perspektivy razvitiya geotermal'noj energetiki Rossii [Condition and perspectives for geothermal energetics in Russia] // *Teploenergetika. 1994. № 2. S. 15–22.*

10. Transportnaya i energeticheskaya infrastruktura v razvitii proizvoditel'nykh sil makroregiona [Transport end energy infrastructure in development of the production forces of a macro region] / M.B. Petrov, V.V. Litovskij, A.Yu. Domnikov [et al.]. Ekaterinburg : Institut ekonomiki UrO RAN, 2022. 275 s.

11. Fiapshev A.G., Khamokov M.M., Kilchukova O.Kh. Ispol'zovanie vtorichnykh energeticheskikh resursov [Use of secondary energy sources] // *Aktual'nye voprosy energetiki v APK : Materialy vserossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Blagoveshensk, 19 fevralya 2020 g. Blagoveshensk : Dal'nevostochny gosudarstvenny agrarny universitet, 2020.*

12. Tekhniko-ekonomicheskie aspekty razvitiya avtonomnykh solnechnykh energeticheskikh sistem [Technical and economic aspects of development of autonomous solar energy systems] / E.G. Kakushina, B.A. Yakimovich, V.V. Kuvshinov [et al.] // *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii. 2018. Vol. 4. № 4. S. 55–60.*

13. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading / P.N. Kuznetsov, V.V. Kuvshinov, A.G. Al-Bairmani, [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science. 2020. Vol. 18. № 3. C. 313–330.*

14. Methods improving energy efficiency of photovoltaic systems operating under partial shading / P. Kuznetsov, L. Yuferev, V.A. Panchenko [et al.] // *Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. № 22.*

Информация об авторах

П.Н. Кузнецов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»;

К.В. Штепа – аспирант кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»;

В.Е. Губин – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»;

С.П. Муровский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика»;

В.В. Кувшинов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников».

Information about the authors

P.N. Kuznetsov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Sources;

K.V. Shtepa – Postgraduate Student of the Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Sources;

V.E. Gubin – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Sources;

S.P. Murovsky – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics;

V.V. Kuvshinov – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Sources.

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.

The article was submitted: 17.09.2024; approved after reviewing: 17.10.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

Научная статья
УДК 656.222.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СХЕМ МНОГОСУТОЧНЫХ ЗАКРЫТИЙ ПЕРЕГОНОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ

Горшков Василий Васильевич¹, Оленцевич Виктория Александровна²

¹ Центр управления перевозками на Восточном полигоне – структурное подразделение центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД», Иркутск, vg17081972@mail.ru

² Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, olencevich_va@mail.ru

Аннотация. В современных условиях интенсивного развития транспортных систем Восточного полигона железных дорог и стабильного наращивания объемов грузовых перевозок на восточном направлении Российской Федерации вопросы оптимизации схем технического обслуживания инфраструктурного комплекса железных дорог становятся особо актуальными и стратегически важными. В данном контексте особое внимание необходимо уделить целесообразности эффективного функционирования и технического обслуживания Восточного полигона железных дорог и входящих в его состав структурных подразделений как ключевых транспортных секторов экономического блока развития страны.

Цель исследования – моделирование схем многосуточных закрытий перегонов на примере организации работы инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог, в условиях увеличения объемов ремонтных работ и стабильного бесперебойного пропуска планового поездопотока. Для достижения данной цели проведен комплексный анализ текущих проблем, связанных с проведением ремонтных работ на Восточном полигоне, предложены некоторые стратегические решения по планированию данных работ, которые будут способствовать минимизации времени простоя подвижного состава и снижению негативного влияния на пропуск планового размера грузопотока. Разработаны и проанализированы варианты модели графиков движения поездов в условиях бесперебойной работы инфраструктурного комплекса Восточного полигона, проведено технико-экономическое обоснование значений текущих затрат на простои поездов в ожидании пропуска в «окно» и потерянного дохода ОАО «РЖД» от съема грузовых поездов по вариантам организации продвижения поездопотока.

Ключевые слова: Восточный полигон железных дорог, объекты инфраструктурного комплекса, методы математического моделирования, поездопоток, схемы и механизмы многосуточного закрытия перегонов, ремонтные работы, графиковое «окно», лимитирующие пропускные мощности элементы, технология «створ»

Original article

DETERMINATION OF OPTIMAL SCHEMES OF MULTI-DAY CLOSURES OF SPANS FOR REPAIR WORK AT THE EASTERN POLYGON

Gorshkov Vasily V.¹, Olentsevich Viktoriya A.²

¹ The Transportation Management Center at the Eastern landfill – a structural subdivision of the Central Directorate of Traffic Management – a branch of JSC Russian Railways, Irkutsk, vg17081972@mail.ru

² Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, olencevich_va@mail.ru

Abstract. In modern conditions of intensive development of the transport systems of the Eastern Railway Polygon and the steady increase in freight traffic volumes in the eastern direction of the Russian Federation, the issues of optimizing maintenance schemes for the railway infrastructure complex are becoming particularly relevant and strategically important. In this context, special attention should be paid to the expediency of effective functioning and maintenance of the Eastern Railway Polygon and its constituent structural units as key transport sectors of the economic block of the country's development.

The purpose of the presented scientific research is to model the schemes of multi-day closures of spans, using the example of the organization of the work of the infrastructure complex of the Eastern Polygon of railways, in conditions of increasing repair work and stable uninterrupted passage of scheduled train traffic. To achieve this goal, a comprehensive analysis of the current problems associated with the repair work at the Eastern polygon was carried out, some strategic solutions for planning these works were proposed, which will help minimize the downtime of rolling stock and reduce the negative impact on throughput of the planned size of freight traffic. Variant models of train schedules have been developed and analyzed in the conditions of uninterrupted operation of the infrastructure complex of the Eastern polygon, a feasibility study has been carried out on the values of the current costs of downtime of trains waiting for admission to the «window» and the lost income of JSC Russian Railways from the removal of freight trains according to the options for organizing the movement of train traffic.

Keywords: The Eastern polygon of railways, infrastructure facilities, mathematical modeling methods, train traffic, schemes and mechanisms for multi-day closure of spans, repair work, a schedule «window», capacity-limiting elements, range technology

Введение

На Транссибирской магистрали (Транссиб) расположено 87 городов с населением от 300 тыс. до 15 млн чел. 14 городов, через которые проходит Транссиб, являются центрами субъектов Российской Федерации. В регионах, обслуживаемых магистралью, добывается более 65 % всего угля, производимого в России, осуществляется почти 20 % всей нефтепереработки страны и производится около 25 % выпускаемой древесины. Здесь сосредоточено свыше 80 % месторождений основных природных ресурсов, включая нефть, газ, уголь, лес, а также руды черных и цветных металлов. Регионы, прилегающие к магистрали, играют ключевую роль в российской экономике благодаря богатым природным ресурсам и развитой промышленной инфраструктуре. На востоке Транссиб обеспечивает выход на железнодорожные сети Северной Кореи, Китая и Монголии через пограничные станции Хасан, Гродеково, Забайкальск и Наушки. На западе – соединяет российские порты и пограничные переходы с бывшими республиками Советского Союза, обеспечивая транспортное сообщение с европейскими странами. Магистраль играет ключевую роль в международной торговле и логистике, связывая Азию и Европу и способствуя развитию экономических связей между регионами [1–3].

В условиях растущего объема грузоперевозок увеличивается степень интенсивности износа инфраструктурного комплекса железных дорог на данном направлении, а значит, и вопросы применения оптимальных схем многосуточных закрытий перегонов для проведения технического обслуживания и ремонтных работ объектов инфраструктурного комплекса на Восточном полигоне приобретают стратегическое значение. Объемы производства ремонтных работ на инфраструктуре Восточного полигона в современных условиях интенсивности движения, при повороте 80 % грузопотоков на Восток, необходимо увеличивать. Такие изменения накладывают дополнительные вызовы на планирование и организацию работы перегонов, требуя разработки эффективных и оптимальных схем многосуточных закрытий с целью производства всех видов ремонтной деятельности [1, 4, 5].

Применение методов математического моделирования для решения данных задач предоставит ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») большие возможности по реализации плановых значений грузопотоков, а также позволит выполнить перспективные планы по пропуску поездов без ограничений по пропускным мощностям, обеспечив при этом высокий уровень безопасности перевозочного процесса [6–8].

Ключевые элементы при выработке технологических мер повышения эффективности работы действующей инфраструктуры Восточного полигона железных дорог

В настоящее время железнодорожный транспортный комплекс играет ключевую роль в мировой транспортной системе, обеспечивая эффективное

перемещение грузов и пассажиров. Одним из наиболее загруженных направлений в стране является Восточный полигон железных дорог, который обладает высокой интенсивностью грузоперевозки и является важнейшей стратегической артерией для связи экономических партнеров запада и востока. Глобальные изменения в распределении грузовой базы государства, особенно ее разворот на восток, ставят перед данным транспортным направлением как вызовы, так и перспективы [9, 10].

В условиях, когда речь идет о выработке технологических мер, способствующих повышению эффективности действующей инфраструктуры Восточного полигона железных дорог, важно учитывать ряд ключевых составляющих элементов, которые могут варьироваться в зависимости от конкретных условий и задач, но в общем можно выделить несколько основных аспектов:

- совершенствование объектов инфраструктурного комплекса: обновление и модернизация железнодорожных путей, станций и других элементов инфраструктуры, задействованных в реализации перевозочного процесса; внедрение современных технологий и материалов для увеличения пропускной и перерабатывающих мощностей, снижения степени износа основных производственных фондов ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»);

- автоматизация и цифровизация производственных процессов: широкое внедрение систем автоматизации управления движением поездов с целью оптимизации времени в пути следования и снижения величины графиковых задержек; внедрение цифровых технологий с целью мониторинга и управления состоянием объектов инфраструктурного комплекса; предотвращение и минимизация последствий случаев наступления риска и увеличение общей эффективности перевозочного процесса;

- энергосбережение и устойчивость функционирования: разработка и применение энергоэффективных технологий; внедрение устойчивых практик в строительстве и эксплуатации инфраструктуры с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду;

- повышение кадрового потенциала: подготовка персонала для работы с новыми технологиями; внедрение систем обучения и повышения квалификации для обеспечения безопасности и эффективности производства сложноструктурированных железнодорожных операций;

- безопасность перевозочного процесса: разработка и внедрение мер по обеспечению безопасности движения поездов и технической эксплуатации инфраструктуры; модернизация системы мониторинга и предотвращения чрезвычайных ситуаций;

- стандартизация и согласованность производственных процессов: обеспечение соответствия инфраструктуры стандартам безопасности и эффективности; согласование действий с другими транспортными системами для повышения общей эффективности работы транспортной системы.

DETERMINATION OF OPTIMAL SCHEMES OF MULTI-DAY CLOSURES OF SPANS
FOR REPAIR WORK AT THE EASTERN POLYGON

Ключевые элементы, упомянутые выше, могут служить основой для разработки комплексной стратегии повышения эффективности инфраструктуры Восточного полигона железных дорог, исключения элементов, которые в той или иной степени выступают как лимитирующие при реализации заданного уровня пропускных мощностей, учитывая технологические, экологические, экономические и социальные аспекты [11–16].

В связи с данными факторами авторами научного исследования, на основе построения моделей графика движения поездов и суточных планов-графиков работы станций на Восточном полигоне железных дорог, проведен комплексный анализ работы объектов инфраструктурного комплекса, входящих в состав полигона, что позволило выявить их элементы, лимитирующие (ограничивающие) пропускные мощности. Результаты анализа представлены в таблице.

Таблица

Элементы Транссибирской магистрали, лимитирующие пропускные мощности

Участок железнодорожной линии	Коэффициент заполнения	Лимитирующий (ограничивающий) элемент		
		Тяговые подстан- ции станций	Контактная сеть на участках	Железнодорожная станция (перегон)
Красноярская железная дорога				
Мариинск–Боготол	1,08	Мариинск	Мариинск–Тяжин	–
		Тяжин	Тяжин–Каштан	
		Каштан		
Чернореченская– Бугач	1,09	Чернореченская	Чернореченская–Кемчуг	–
		Кемчуг		
		Кача		
Бугач–Красноярск	0,998	–	–	Нечетный приемоотправочный парк станции Бугач
Красноярск–Северный– Красноярск–Восточный	0,94	–	–	«Г» станции Красноярск- Восточный
Красноярск–Восточный– Уяр	1,02	Зыково	Зыково–Камарчага	–
		Камарчага		
Уяр–Заозерная	1,37	Уяр	Уяр–Камала	–
		Камала		
Заозерная– Канск–Енисейский	1,05	Камала	Уяр–Камала	–
		Иланская		
Канск–Енисейский– Юрты	0,99	Иланская	Иланская–Юрты	–
		Ключи		
Восточно-Сибирская железная дорога				
Слюдянка I– Слюдянка II	1,11	–	–	Перегон Слюдянка I– Слюдянка II
				Четная горловина станции Слюдянка I
Большой Луг– Слюдянка II	1,09	–	–	Перегон Ангасолка– Андриановская
Забайкальская железная дорога				
Лесная–Чита II	1,01	Лесная	Сохондо–Лесная	Четная стрелочная горловина станции Чита I
Ерофей Павлович– –Уруша–Штурм	1,20	Ерофей Павлович	Ерофей Павлович– Большая Омутная	–
		Большая Омутная	Большая Омутная– Уруша	
		Уруша	Могоча–Семиозерный	
		Бамовская Сковородино	Уруша–Бамовская	
Горелый–Сковородино	1,13	Уруша	Уруша–Бамовская	–
		Бамовская		
		Сковородино		
Сковородино–Магдагачи	1,18	Магдагачи	Магдагачи–Сулус	–
		Сулус		
		Чалганы		

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СХЕМ МНОГОСУТОЧНЫХ ЗАКРЫТИЙ ПЕРЕГОНОВ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ

Окончание таблицы

Участок железнодорожной линии	Коэффициент заполнения	Лимитирующий (ограничивающий) элемент		
		Тяговые подстанции станций	Контактная сеть на участках	Железнодорожная станция (перегон)
Магдагачи–Ушумун	1,17	Михайло–Чесноковская Белогорск I	–	–
Белогорск II–Завитая	1,23	–	–	Стрелочная горловина нечетная Белогорск II
Буря–Архара	1,00	Белогорск I Короли Завитая	Белогорск I–Короли	–
<i>Дальневосточная железная дорога</i>				
Хабаровск II–Вяземская	1,20	Хабаровск II Кругликово	Хабаровск II–Кругликово Кругликово–Дормидонтовка	–
Вяземская–Бикин	0,88	Розенгартовка	Аван–Розенгартовка Розенгартовка–Бикин	–
Бикин–Лучегорск	0,78	–	–	Приемоотправочный парк станции Лучегорск
Лучегорск–Дальнереченск I	0,83	–	Ружино–Свиягино	–
Дальнереченск I–Ружино	0,94	Ружино	Ружино–Свиягино	–
Хабаровск II–Ружино	1,11	–	–	Перегон хабаровск II–Лучегорск
Ружино–Уссурийск	1,08	–	–	Перегон Дубининский–Уссурийск
Ружино–Сибирцево	1,00	Ружино Сибирцево	Ружино–Свиягино	–
Сибирцево–Дубининский	0,86	–	–	Нечетная стрелочная горловина станции Сибирцево
Дубининский–Уссурийск	0,86	–	–	Центральная стрелочная горловина станции Уссурийск
Барановский–Амурский Залив	0,94	Надеждинская Смоляниново	Надеждинская–Смоляниново	–
Амурский Залив–Угловая	0,49	Надеждинская Смоляниново	Надеждинская–Смоляниново Смоляниново–Анисимовка	–
Угловая–Смоляниново	0,92	–	–	Четная стрелочная горловина станции Смоляниново
Находка–Мыс Астафьева	0,91	–	–	Четная стрелочная горловина станции мыс Астафьева

Анализ показал, что организация перевозочного процесса на Восточном полигоне строится в условиях увеличения объема перевозок, рост которых значительно превзошел планируемые ранее параметры. Железные дороги работают на пределе допустимых коэффициентов использования инфраструктуры. При росте плотности поездопотока и 100%-ном использовании пропускной способности возникновения даже незначительных отказов в работе технических средств приводит к снижению скорости движения поездов и к увеличению количества и продолжительности задержек поездов. В настоящее время развитие инфраструктуры не позволяет расставлять поезда без негативных последствий для пропускной способности.

По Красноярской дороге наиболее негативные последствия от отказов в работе технических средств по содержанию пути на Абаканском регионе –

538 поездо-часов, или 31,5 % от общей продолжительности задержек поездов, на Красноярском регионе – 548 поездо-часов, или 18,5 % от общей продолжительности задержек по региону.

По Восточно-Сибирской дороге наиболее негативное влияние оказали отказы в работе технических средств:

- по Тайшетскому региону – на ответственности дирекции тяги и сервисных организаций дирекции тяги (26,2 % от общей продолжительности задержек поездов по региону);
- по Иркутскому региону – на ответственности службы пути Дирекции инфраструктуры (48 % от общей продолжительности задержек поездов по региону);
- по Улан-Удэнскому региону – на ответственности службы автоматики и телемеханики Дирекции инфраструктуры (28,7 %).

На Забайкальской дороге по Читинскому, Могочинскому и Свободнинскому региону наиболее негативные последствия – от отказов в работе технических средств по причине неудовлетворительного содержания пути.

По Дальневосточной дороге наибольшим сдерживающим фактором по Владивостокскому региону являются отказы в работе технических средств по ответственности дирекции тяги и сервисных организаций дирекции тяги (по причине неисправностей локомотивов на станциях и в пути следования), по Хабаровскому региону – отказы в работе технических средств по службе пути по причине неудовлетворительного содержания пути.

Определение оптимальных схем многосуточных закрытий перегонов для производства ремонтных работ на Восточном полигоне

На Восточном полигоне на основании нормативного документа [17] действует установленный порядок планирования, разработки, предоставления и использования технологических «окон» для производства ремонтных и строительно-монтажных работ на объектах инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД», выполняемых силами структурных подразделений, дочерних обществ ОАО «РЖД» и сторонних организаций с учетом местных условий. Сформирован перечень створовых направлений, на которых, ввиду высокой загрузки пропускной способности, длительные закрытия должны осуществляться преимущественно по технологии «в створе». Данные направления располагаются между крупными станциями зарождения и погашения поездопотока либо узловыми станциями, где сходится несколько направлений. Длительное закрытие перегона, пути перегона, станционного пути предполагает «окно», предоставляемое для ремонта, реконструкции или строительства железнодорожной инфраструктуры, продолжительностью свыше 24 ч [18].

Согласно [18, 19] построены базовые модели схем многосуточного закрытия перегонов для производства ремонтных работ на Восточном полигоне. Фрагмент одной из разработанных базовых моделей закрытия перегонов на примере организации работы участка железнодорожной линии для производства «окна» в рамках функционирования инфраструктурного комплекса Восточного полигона представлен на рис. 1.

Анализ базовой модели схемы многосуточного закрытия перегонов на примере организации работы участка железнодорожной линии в условиях увеличения объемов производства ремонтных работ позволил выявить ряд проблем.

1. Ранее формируемые для оценки сценариев проведения ремонтно-путевых работ поездные модели предполагали расчет пропускной способности, потребности смежных хозяйств в использовании ниток графика движения поездов, влияния отказов технических средств для организации производственной деятельности, структуры погрузки

только для четного направления. Базовая модель сформирована для организации «коридоров», в период которых обеспечивается пропуск четного поездопотока, при этом нечетный поездопоток в учет моделей обычно не брался.

2. Нечетный поездопоток не имеет вышеуказанных коридоров для пропуска. Фактически весь анализируемый период нечетный поездопоток следует через длительные закрытия.

3. При прохождении через длительные закрытия:

- формируется разрывной нечетный поездопоток (формирования пакетов нечетных грузовых поездов для пропуска через «окна»);
- образуется избыточное накопление нечетного поездопотока на подходах к закрытиям (смены локомотивных бригад и нарушения режима времени работы локомотивных бригад приобретают характер технологической необходимости);
- происходит незапланированное замедление оборота локомотивов;
- образуется дефицит локомотивов на станциях окончания плеч работы тягового подвижного состава.

Для Восточного полигона станции Мариинск и Карымская – разрывной подход нечетного поездопотока к станциям вывоза в период отсутствия «окон» в четном направлении и массового подхода четного поездопотока.

Ранее во всех разрабатываемых моделях учитывался только четный поездопоток (рис. 2).

Возникает пропорциональная зависимость. Дефицит локомотивов по станциям вывоза ведет к накоплению четного поездопотока и в конечном итоге к образованию избыточного четного поездопотока, что требует в свою очередь отмены «окон» для нормализации эксплуатационной обстановки (рис. 3).

Кроме того, избыточное накопление нечетного поездопотока оказывает влияние на пропуск четных грузовых поездов:

- значительные задержки в движении поездов обоих направлений: длительные перерывы в движении приводят к накоплению поездов на подходах к закрытым участкам, что вызывает сбои в расписании и длительное ожидание;
- нарушения графика пассажирских перевозок: пассажирские поезда, особенно дальнего следования, не могут следовать по запланированным маршрутам и расписаниям, что приводит к опозданиям и неудобствам для пассажиров;
- увеличение нагрузки на соседние участки: пассажирские и грузовые потоки перенаправляются на альтернативные маршруты, что вызывает перегрузку и ухудшение пропускной способности на других участках;
- увеличение времени восстановления движения: после завершения работ необходимо время для восстановления нормативного графика движения поездов, что продлевает период нарушения работы железнодорожной сети.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СХЕМ МНОГОСУТОЧНЫХ ЗАКРЫТИЙ ПЕРЕГОНОВ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ

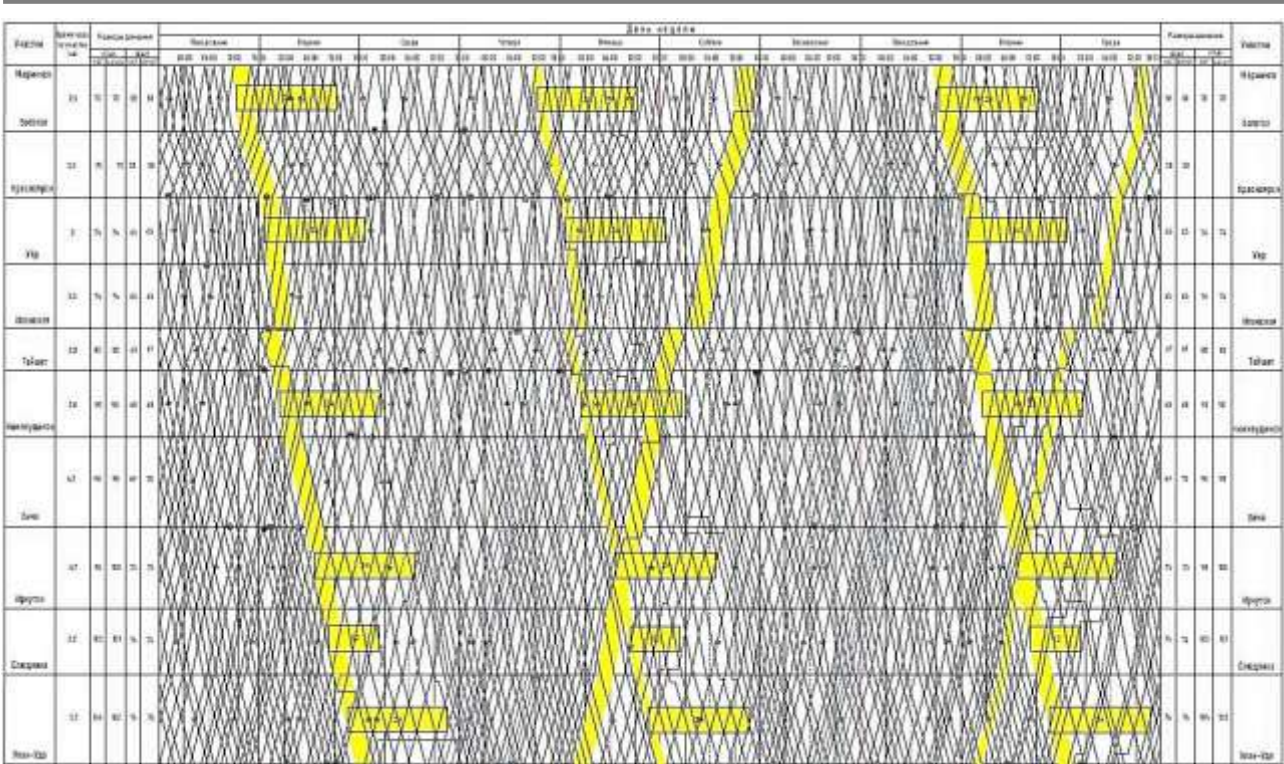


Рис. 1. Фрагмент базовой модели длительного закрытия на участке



Рис. 2. Модель длительного закрытия на участке с учетом нечетного поездопотока



Рис. 3. Зависимость дефицита локомотивов – избыточного четного поездопотока – процедуры отмены «окон» с целью нормализации эксплуатационной обстановки

Съем поездов в четном направлении составил 382 поезда/10 сут, в нечетном направлении – 291 поезд/10 сут.

С целью устранения представленных проблем было принято техническое решение по уменьшению продолжительности «окна» с целью оптимизации уровня пропускной способности и исключения финансово-экономических потерь ОАО «РЖД».

Фрагмент предлагаемой модели закрытия перегонов с изменением продолжительности на примере организации работы участка железнодорожной линии для производства «окна» в рамках функционирования инфраструктурного комплекса Восточного полигона представлен на рис. 4.

Уменьшение продолжительности «окна» для производства ремонтно-строительных работ на участках Восточного полигона позволяет оптимизировать процессы, уменьшить простои и съем поездов и обеспечить более стабильное и эффективное движение поездов.

Согласно предлагаемой модели закрытия перегонов с изменением продолжительности производства ремонтных работ на инфраструктурном комплексе, проведено моделирование графика движения поездов с учетом условия, что расположение «окон» на графике движения поездов будет чередоваться, будучи необходимым по следующим причинам:

- минимизация простоя поездов: чередование «окон» позволяет поочередно закрывать один из путей для проведения ремонтных или строительных работ, в то время как второй путь остается доступным для движения поездов. Это помогает избежать полного прекращения движения и минимизировать финансовые издержки;

- оптимизация ресурсов: чередование «окон» позволяет более эффективно распределять рабочую силу и специализированное оборудование, необходимое для проведения работ, так как работы могут проводиться на одном пути, в то время как другой путь используется для пропуска поездов;

- снижение нагрузки на инфраструктуру: чередование «окон» способствует равномерному распределению нагрузки на железнодорожную инфраструктуру, предотвращая чрезмерный износ одного железнодорожного пути и обеспечивая тем самым равномерный износ обоих путей перегона;

- повышение безопасности движения поездов: чередование времени проведения «окон» улучшает условия для производства работ, так как один путь полностью освобождается для ремонтных бригад, что снижает риск возникновения аварий и прочих инцидентов на рабочем участке;

- гибкость в планировании производства работ: чередование «окон» обеспечивает большую гибкость в планировании и позволяет оперативно реагировать на изменения в расписании движения поездов, а также на непредвиденные ситуации;

- увеличение пропускной способности: за счет чередования «окон» удастся поддерживать высокий уровень пропускной способности участка, так как один из путей всегда остается доступным для

движения поездов [20–23].

Фрагмент предлагаемой модели графика движения поездов с учетом разработанных авторами методических предложений и рекомендаций по предоставлению длительных закрытий и «окон» большой продолжительности при выполнении ремонтно-путевых работ по технологии «в створе» представлен на рис. 5.

Кроме того, при изменении технологии образуется возможность варьирования порядка предоставления «окон», оперативного принятия решения по переходу на предоставление «окон» в нечетном створе для формирования коридоров пропуска нечетного поездопотока, предоставления «окон» в четном створе – на участке Мариинск–Карымская и в нечетном на участке Находка–Карымская. Варьирование технологии предоставления «окон» при разрешении закрытий на 24 ч и более невозможно.

Результаты

Рекомендованная технология построения модели предусматривает обеспечение высокого уровня безопасности и эффективности движения на железнодорожных путях Восточного полигона. Сокращение времени закрытия участков позволяет:

- снизить задержки и накопление поездов: более короткие периоды закрытия уменьшают вероятность накопления поездов и способствуют более быстрому восстановлению движения;

- сохранить стабильность расписания движения пассажирских поездов: пассажирские поезда могут более точно следовать согласно графику, что уменьшает степень неудобства для пассажиров;

- сбалансировать нагрузку на железнодорожную сеть: сокращение времени закрытия помогает избежать перегрузки на альтернативных маршрутах и соседних участках;

- ускорить восстановление нормативного графика: меньшее время закрытия требует меньше времени для восстановления обычного режима работы железнодорожной сети.

Выводы

В научной статье авторы рассмотрели вопросы организации и определения оптимальных схем и механизмов многосуточных закрытий отдельных объектов инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог в условиях увеличения объемов ремонтных работ и прироста поездопотока на перспективу.

На основе результатов проведенного научного исследования можно сделать вывод, что применение разработанных авторами методических предложений по предоставлению длительных закрытий и «окон» большой продолжительности при выполнении ремонтно-путевых работ по технологии «в створе» позволит упорядочить систему использования передовых технологических методов, повысит эффективность организации ремонтных работ и улучшит управление перевозочным процессом. Финансовые потери от задержек поездов сократятся на 111,99 млн руб./10 сут. Появится возможность для устранения величины потеряннного дохода от съема

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СХЕМ МНОГОСУТОЧНЫХ ЗАКРЫТИЙ ПЕРЕГОНОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ

поездов в размере 14,566 млрд руб./10 сут.

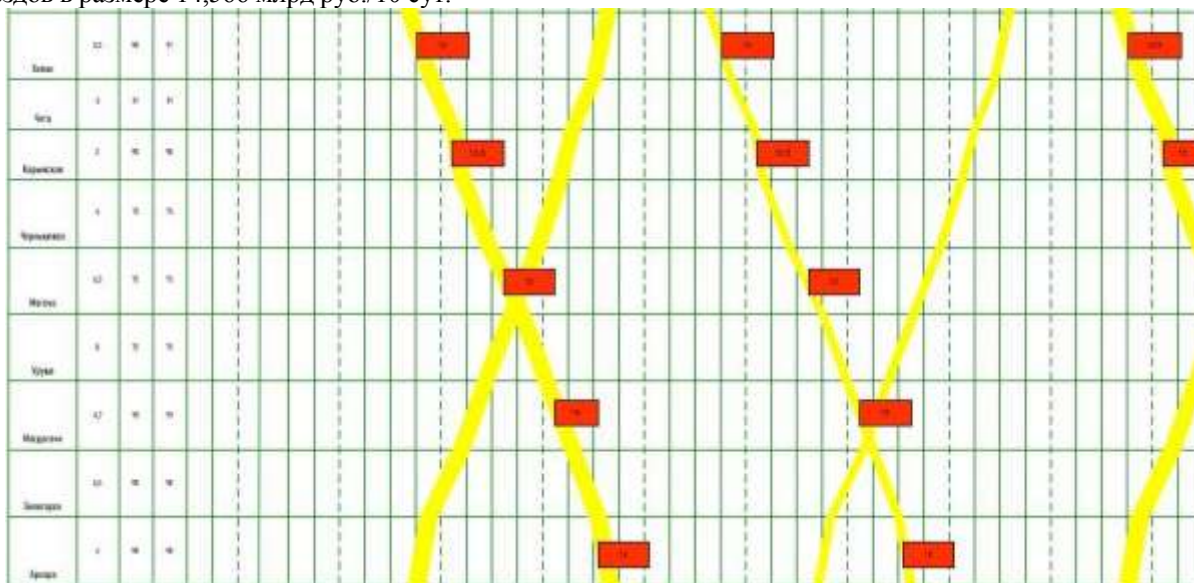


Рис. 4. Фрагмент предлагаемой модели закрытия перегонов с изменением продолжительности на участке

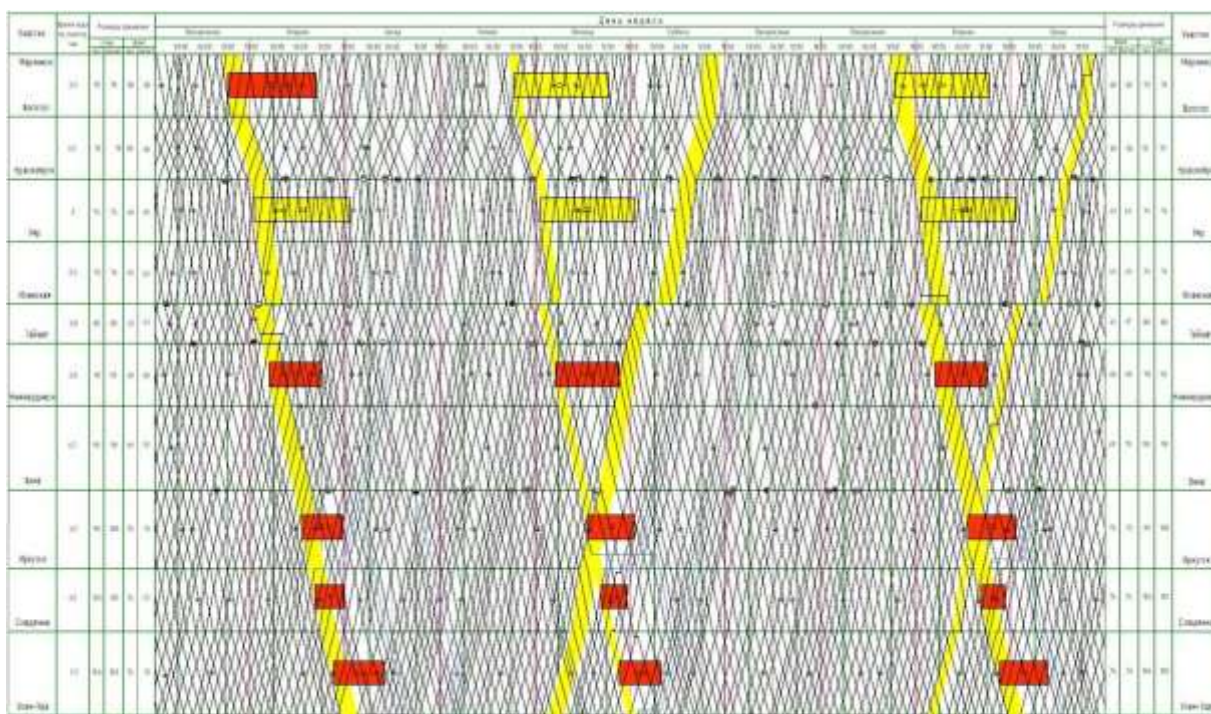


Рис. 5. Фрагмент модели графика движения поездов с учетом методических предложений и рекомендаций

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Российские железные дороги : официальный сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (дата обращения: 01.09.2024).
2. Организационно-экономическая модель управления инновационным потенциалом Иркутской области : монография / В.Н. Гордеев, В.Ю. Конюхов, К.И. Новикова [и др.]. Иркутск, 2014.
3. Динец Д.А., Меркулов А.С. Риски транзита восточного транспортного коридора // Экономика железных дорог. 2021. № 2. С. 66–77.
4. Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г. : распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р (ред. 24.06.2023). URL : <http://government.ru/docs/34297/> (дата обращения: 09.09.2024).
5. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Куныгина Л.В. Организация работы решающих станций полигона в период реконструкции // Современные методы, принципы и системы автоматизации управления на транспорте : сборник материалов Международной научно-практической конференции. 2016. С. 77–80.
6. Бутырин О.В., Бутырина Ю.О., Тирских В.В. Матема-

тическое моделирование процесса перевозок пригородного железнодорожного транспорта // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-5. С. 776–779.

7. Лапидус Б.М. Повышение производительности и эффективности железнодорожного транспорта на инновационной основе // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 5. С. 3–6

8. Захарова Е.М., Минашина И.К. Разработка и анализ алгоритмов оптимизации в задачах планирования на железнодорожном транспорте // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование : сборник материалов Третьей научно-технической конференции с международным участием (ИСУЖТ–2014). 2014. С. 24–30.

9. О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. : распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р. URL : <http://government.ru/docs/all/64817/> (дата обращения: 09.09.2024).

10. Сценарии развития Восточной Сибири и российского Дальнего Востока в контексте политической и экономической динамики Азиатско-Тихоокеанского региона до 2030 г. : аналитический доклад / научный руководитель А.А. Кокошин. URL : <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (дата обращения: 09.09.2024)

11. С учётом требований времени нам нужны максимально быстрые решения // Гудок. URL : <https://gudok.ru/newspaper/> (дата обращения: 19.04.2024).

12. Ответы на вызовы // Гудок. URL : <https://gudok.ru/zdr/177/?ID=1655578> (дата обращения: 19.04.2024).

13. Горшков В.В., Оленцевич В.А. Причины снижения маршрутизации порожних полувагонов на Восточном полигоне железных дорог и пути их устранения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2(82). С. 44–53.

14. Оленцевич В.А., Каимов Е.В. Необходимость усиления перевозочного потенциала железнодорожной станции Байкало-Амурской магистрали в целях готовности инфраструктурного комплекса к плановым грузопотокам // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4(92). С. 91–100.

15. Каимов Е.В., Оленцевич В.А., Власова Н.В. Путь развития горловин станций как фактор сокращения уровня пропускной способности участка // Транспорт и логистика: Развитие в условиях глобальных изменений потоков : сборник научных трудов VII международной научно-практи-

ческой конференции. Ростов-на-Дону, 2023. С. 112–115.

16. Буракова А.В., Иванкова Л.Н., Иванков А.Н. Оценка особенностей работы станций при проведении реконструктивных мероприятий // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт–2021) : труды международной научно-практической конференции. Воронеж, 2021. С. 26–28.

17. Порядок взаимодействия подразделений и филиалов ОАО «РЖД» при проведении капитального ремонта железнодорожного пути, предусмотренного инвестиционной программой ОАО «РЖД», выполняемого хозяйственным способом : [утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 9 марта 2022 г. № 564/р].

18. Инструкция о порядке предоставления и использования «окон» для ремонтных и строительно-монтажных работ на железных дорогах ОАО «РЖД» // СНИП RusCable.ru. URL : <https://snip.ruscable.ru/Data1/48/48628/index.htm/> (дата обращения: 26.09.2024).

19. Об утверждении методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования : приказ Министерства Транспорта Российской Федерации от 18.07.2018 г. № 266. 2018. 40 с.

20. Жданова С.М., Буровцев В.В., Насонова Н.А. К вопросу о прогнозировании ремонтных работ и реконструктивных мероприятий с учетом структурных изменений перевозочного процесса на Восточном полигоне // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2023. № 4 (37). С. 30–36.

21. Технология проектирования реконструкции железнодорожного пути Транссиба / В.А. Анисимов, В.В. Анисимов, А.И. Богданов [и др.] // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 4(33). С. 4–15.

22. Комплекс организационно-технических и реконструктивных мероприятий, направленных на улучшение показателей работы участка на основе исследования системных связей и закономерностей функционирования железнодорожной транспортной системы / В.А. Оленцевич, В.Е. Гозбенко, С.К. Каргапольцев, Г.Н. Крамынина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 3(63). С. 171–179.

23. К вопросу об актуальных задачах при решении проблем Восточного полигона ДВЖД / С.М. Жданова, О.А. Нератова, А.Р. Едигарян [и др.] // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 3(32). С. 10–18.

REFERENCES

1. Rossijskie zheleznye dorogi : ofitsial'ny sait [Russian Railways : official website]. URL: <http://www.rzd.ru> (data obrasheniya 01.09.2024).

2. Organizatsionno-ekonomicheskaya model' upravleniya innovatsionnym potentsialom Irkutskoj oblasti [Organizational and economic model of management of innovative potential of the Irkutsk region] : monografiya / V.N. Gordeev, V.Yu. Konyukhov, K.I. Novikova [et al.]. Irkutsk, 2014.

3. Dinets D.A., Merkulov A.S. Riski tranzita vostochnogo transportnogo koridora [Risks of transit of the Eastern transport corridor] // Ekonomika zheleznykh dorog. 2021. № 2. S. 66–77.

4. Ob utverzhdenii kompleksnogo plana modernizatsii i rashireniya magistral'noj infrastruktury na period do 2024 g. [On approval of the Comprehensive Plan for the Modernization and Expansion of the mainline Infrastructure for the period up to 2024] : rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 30.09.2018 № 2101-r (red. 24.06.2023). URL : <http://government.ru/docs/34297> (data obrasheniya: 09.09.2024).

5. Ivankova L.N., Ivanov A.N., Kunyagina L.V. Organizatsiya raboty reshayushikh stantsij poligona v period rekonstruktsii [Organization of the work of the decisive stations

of the landfill during the reconstruction period] // Sovremennye metody, printsipy i sistemy avtomatizatsii upravleniya na transporte : sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2016. S. 77–80.

6. Butyrin O.V., Butyrina Yu.O., Tirsikh V.V. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa perevozok prigorodnogo zheleznodorozhnogo transporta [Mathematical modeling of the suburban railway transportation process] // Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. 2015. № 12-5. S. 776–779.

7. Lapidus B.M. Povyshenie proizvoditel'nosti i effektivnosti zheleznodorozhnogo transporta na innovatsionnoy osnove [Improving the productivity and efficiency of railway transport on an innovative basis] // Vestnik VNIIZhT, 2012, № 5, S. 3–6.

8. Zakharova E.M., Minashina I.K. Razrabotka i analiz algoritmov optimizatsii v zadachakh planirovaniya na zheleznodorozhnom transporte [Development and analysis of optimization algorithms in planning tasks in railway transport] // Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoye modelirovaniye :

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СХЕМ МНОГОСУТОЧНЫХ ЗАКРЫТИЙ ПЕРЕГОНОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ

sbornik materialov Tret'ej nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (ISUZhT-2014). 2014. S. 24–30.

9. O strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federatsii do 2030 g. [On the strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030] : rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 17.06.2008 g. № 877-r. URL : <http://government.ru/docs/all/64817> (data obrasheniya: 09.09.2024).

10. Stsenarii razvitiya Vostochnoj Sibiri i rossijskogo Dal'nego Vostoka v kontekste politicheskoy i ekonomicheskoy dinamiki Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona do 2030 g. [Scenarios for the development of Eastern Siberia and the Russian Far East in the context of the political and economic dynamics of the Asia-Pacific region until 2030] : analiticheskij doklad / nauchny rukovoditel' A.A. Kokoshin. URL : <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (data obrasheniya: 19.04.2024).

11. S uchetom trebovanij vremeni nam nuzhny maksimal'no bystrye resheniya [Taking into account the requirements of the time, we need the fastest possible solutions] // Gudok. URL : <https://gudok.ru/newspaper/> (data obrasheniya: 19.04.2024).

12. Otveti na vyzovy [Responses to challenges] // Gudok. URL : <https://gudok.ru/zdr/177/?ID=1655578> (data obrasheniya: 19.04.2024).

13. Gorshkov V.V., Olentsevich V.A. Prichiny snizheniya marshrutizatsii porozhnikov poluvagonov na Vostochnom poligone zheleznnykh dorog i puti ikh ustraneniya [Reasons for reducing the routing of empty semi-wagons at the Eastern railway landfill and ways to eliminate them] // Sovremennye tekhnologii. Sistemny analiz. Modelirovaniye. 2024. № 2(82). S. 44–53.

14. Olentsevich V.A., Kaimov E.V. Neobkhodimost' usileniya perevoznogo potentsiala zheleznodorozhnoy stantsii Bajkalo-Amurskoj magistrali v tselyakh gotovnosti infrastruktornogo kompleksa k planovym gruzopotokam [The need to strengthen the transportation potential of the Baikal-Amur Mainline railway station in order to prepare the infrastructure complex for planned cargo flows] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya. 2023. № 4(92). S. 91–100.

15. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Putevoye razvitie gorlovin stantsij kak faktor sokrasheniya urovnya propusknoy sposobnosti uchastka [Track development of station necks as a factor in reducing the level of site capacity] // Transport i logistika: Razvitie v usloviyakh global'nykh izmenenij potokov. Sbornik nauchnykh trudov VII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Rostov-na-Donu, 2023. S. 112–115.

16. Burakova A.V., Ivankova L.N., Ivankov A.N. Otsenka osobennostej raboty stantsij pri provedenii rekonstruktivnykh meropriyatij [Evaluation of the features of the stations during reconstruction activities] // Transport: nauka, obrazovaniye, proizvodstvo (Transport–2021) : trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Voronezh, 2021. S. 26–28.

17. Poryadok vzaimodejstviya podrazdelenij i filialov OAO «RZhD» pri provedenii kapital'nogo remonta zheleznodorozhnogo puti, predusmotrennogo investitsionnoj programmoj OAO «RZhD», vypolnyaemogo khozyajstvennym sposobom [The procedure for interaction of divisions and branches of JSC «Russian Railways» during the overhaul of the railway track provided for by the investment program of JSC «Russian Railways», performed by an economic method] : [utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 9 marta 2022 g. № 564/r].

18. Instruksiya o poryadke predostavleniya i ispol'zovaniya «okon» dlya remontnykh i stroitel'no-montazhnykh rabot na zheleznnykh dorogakh OAO «RZhD» [Instructions on the procedure for the provision and use of «windows» for repair and construction and installation works on railways of JSC «Russian Railways»] // SNiP RusCable.ru. URL : <https://snip.ruscable.ru/Data1/48/48628/index.htm> / (data obrasheniya: 26.09.2024).

19. Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya propusknoj i provoznoj sposobnostej infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshego pol'zovaniya [On approval of the methodology for determining the capacity and carrying capacity of the public railway transport infrastructure] : prikaz Ministerstva Transporta Rossijskoj Federatsii ot 18.07.2018 g. № 266. 2018. 40 s.

20. Zhdanova S.M., Burovtsev V.V., Nasonova N.A. K voprosu o prognozirovanii remontnykh rabot i rekonstruktivnykh meropriyatij s uchetom strukturnykh izmenenij perevoznogo protsessa na Vostochnom poligone [On the issue of forecasting repair work and reconstructive measures taking into account structural changes in the transportation process at the Eastern landfill] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2023. № 4(37). S. 30–36.

21. Tekhnologiya proektirovaniya rekonstruktsii zheleznodorozhnogo puti Transsiba [Technology of designing reconstruction of the Transsib railway track] / V.A. Anisimov, V.V. Anisimov, A.I. Bogdanov [et al.] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2022. № 4(33). S. 4–15.

22. Kompleks organizatsionno-tehnicheskikh i rekonstruktivnykh meropriyatij, napravlenykh na uluchshenie pokazatelej raboty uchastka na osnove issledovaniya sistemnykh svyazey i zakonemnostej funktsionirovaniya zheleznodorozhnoj transportnoj sistemy [A set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improving the performance of the site based on the study of systemic relationships and patterns of functioning of the railway transport system] / V.A. Olentsevich, V.E. Gozbenko, S.K. Kargapoltsev, G.N. Kramynina // Sovremennye tekhnologii. Sistemny analiz. Modelirovaniye. 2019. № 3 (63). S. 171–179.

23. K voprosu ob aktual'nykh zadachakh pri reshenii problem Vostochnogo poligona DVZhD [On the issue of urgent tasks in solving the problems of the Eastern polygon of the Far Eastern Railway] / S.M. Zhdanova, O.A. Neratova, A.R. Edigaryan [et al.] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2022. № 3(32). Pp. 10–18.

Информация об авторах

В.В. Горшков – заместитель начальника Центра управления перевозками на Восточном полигоне – структурного подразделения Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД»;

В.А. Оленевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работы».

Information about the authors

V.V. Gorshkov – Deputy Head of the Transportation Management Center at the Eastern polygon – structural division of the Central Directorate of Traffic Management – a branch of JSC «Russian Railways»;

V.A. Olencevich – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Operation Management.

Статья поступила в редакцию 30.09.2024; одобрена после рецензирования 16.10.2024; принята к публикации 16.10.2024.

The article was submitted: 30.09.2024; approved after reviewing: 16.10.2024; accepted for publication: 16.10.2024.

Научная статья
УДК 372.881.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ БИБЛИОТЕК PYTHON ПО РАБОТЕ С ГЕОГРАФИЧЕСКИМИ КООРДИНАТАМИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Пугачев Игорь Николаевич¹, Шешера Николай Геннадьевич², Григоров Денис Евгеньевич³

¹ Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук;
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, pugachev64@mail.ru

^{2,3} Дальневосточный юридический институт МВД России им. И.Ф. Шиловой, Хабаровск
² kolyaka239@mail.ru

³ glowfisch8lan@gmail.com

Аннотация. Спутниковая система навигации (GNSS) обеспечивает надежное и точное определение местоположения объекта на поверхности Земли, что делает ее идеальным инструментом геопозиционирования. С учетом обновления больших информационных ресурсов под новые требования локационной привязки (уточнение географических координат) появились широкие возможности по консолидации данных с целью анализа, в том числе аварийности на автомобильном транспорте.

Каждое ДТП совершено в определенной координатной точке, имеет широту и долготу. Эти данные позволяют не только уточнить местоположение события, но и произвести расчеты по измерению расстояния до ближайшей кривой в плане, пешеходного перехода, парковочного кармана и других объектов улично-дорожной сети (УДС), оказывающих влияние на аварийность. Также возможно автоматизировать процесс соединения характеристик системы ВАДС с различных баз данных в одну для комплексного исследования аварийности.

К сожалению, при регистрации ДТП допускаются неточности записи географических координат. Для объективной оценки аварийности требуется уточнение данного параметра. Поэтому в статье приводятся исследования инструментов библиотек Python, ошибки репрезентативности и положительный опыт определения географических координат ДТП на дороге, опирающийся на адрес привязки (улица, дом). Также все вышеуказанное необходимо для соединения нового параметра – максимальной обеспечиваемой скорости с генеральной совокупностью по принципу сходимости места и времени суток.

Результаты исследований: обоснованные с научной точки зрения алгоритмы обработки данных, точность компиляции которых достигается современными инструментами библиотек Python по работе с географическими координатами. Разработана программа определения географических точек ДТП на дороге и максимальной обеспечиваемой скорости. Данная работа содержит экспериментальные исследования эффективности методов определения координат ДТП с теоретическим обоснованием на основе анализа отечественного и зарубежного опыта. Впоследствии разработанные программы вошли в большой проект по исследованию характеристик УДС для прогноза аварийности на автомобильном транспорте с использованием методов машинного обучения.

Ключевые слова: аварийность на автомобильном транспорте, географические координаты ДТП, спутниковая система навигации

Original article

USING TOOLS OF MODERN PYTHON LIBRARIES FOR WORKING WITH GEOGRAPHICAL COORDINATES TO SOLVE ROAD SAFETY PROBLEMS

Pugachev Igor N.¹, Sheshera Nikolay G.², Grigorov Denis E.³

¹ Khabarovsk Federal research center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences;
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, pugachev64@mail.ru

^{2,3} Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after I.V. Shilova, Khabarovsk
² kolyaka239@mail.ru

³ glowfisch8lan@gmail.com

Abstract. The satellite navigation system (GNSS) provides reliable and accurate determination of the location of an object on the Earth's surface, which makes it an ideal tool for geo-positioning. Taking into account the update of large information resources to meet new requirements for location referencing (clarification of geographic coordinates), broad opportunities for data consolidation for the purpose of analysis have appeared, including the data on accidents in road transport.

Each accident is exactly at a certain coordinate point, has the latitude and the longitude. These data allow users not only to clarify the location of the event, but also to make calculations to measure the distance to the nearest curve in the plan, a pedestrian crossing, a parking pocket and other road network objects that affect accidents. It is also possible to automate the process of combining the characteristics of the VADS system from various databases into a single one for a comprehensive study of accidents.

Unfortunately, when registering accidents, inaccuracies in recording geographic coordinates are possible. For an objective assessment of accidents, it is necessary to clarify this parameter. Therefore, the article provides studies of Python library tools, representativeness errors and positive experience in determining the geographic coordinates of accidents on the road, based on the binding address (a street, a house). Also, all of the above is necessary to connect a new parameter - the maximum provided speed with the general population based on the principle of convergence of place and time of day. The results of the research were scientifically sound data processing algorithms, the accuracy of compilation of which is achieved by modern Python library tools for working with geographic coordinates. A program for determining the geographic points of an accident on the road and the maximum provided speed was developed. This work contains experimental studies of the effectiveness of methods for determining the coordinates of an accident with a theoretical justification based on the analysis of domestic and foreign experience. Subsequently, the developed programs were included in a large project to study the characteristics of the road traffic system for predicting accidents in road transport using machine learning methods.

Keywords: accidents in motor transport, geographic coordinates of road accidents, satellite navigation system

Введение

Сложная система организации и безопасности дорожного движения ставит перед специалистами предметной области задачи по обеспечению гармоничного взаимодействия участников дорожного движения в безаварийном режиме. Для этого создаются различные информационные центры контроля безопасности дорожного движения. Формируются базы данных и механизмы управления центрами.

В идеальную систему распределения транспортных потоков, которая, учитывая пропускную способность смежных улиц, исключает заторы в любой период времени, может внести серьезные коррективы ДТП [1]. Происходит цепная реакция изменения режимов работы соседствующих транспортных узлов без учета возможностей других. Упорядоченная система взаимодействия участников дорожного движения становится хаотичной. Увеличивается количество конфликтов в потоке, появляются новые ДТП, которые рассматриваются учеными как следствие влияния большого количества факторов системы «Водитель–Автомобиль–Дорога–Среда» (ВАДС). Это доказал профессор В.Ф. Бабков [2], определивший характеристикам УДС коэффициенты влияния на аварийность. Данная работа стала следствием расширения этих характеристик, в результате чего понадобилась автоматизированная обработка данных с различных информационных ресурсов, таких как АИУС ГИБДД (обстоятельства ДТП, данные об автомобиле и водителе), OpenWeatherMap, Gismeteo, Хабаровский центр по гидрометеорологии (данные о погоде с 2016 по 2021 г.), Huawei Health (данные о местоположении объекта в момент времени для вычисления скорости) [3].

При объединении данных с различных информационных ресурсов важно учитывать время влияния фактора на ДТП и место. Для достижения первого условия параметры были распределены по часовым интервалам времени. Для второго решено использовать современные инструменты библиотек Python по работе с географическими координатами.

В результате выборочного исследования базы данных АИУС ГИБДД определены несоответствия координат привязки ДТП к дому, что осложняет задачу по анализу других информационных ресурсов в указанной локации.

Цель исследования – разработка научно-обоснованного программного подхода по использованию географических координат для соединения данных в соответствии с локационной привязкой в часовых интервалах времени. Для достижения поставленной цели необходимо решить одну из важнейших задач – определить координаты места совершения ДТП от дома, к которому осуществлялась привязка, благодаря чему появится возможность описать его с позиции погодных условий, максимальной обеспечиваемой скорости и других элементов системы ВАДС в конкретной локации. В большинстве своем точка контакта участников дорожного движения находится на проезжей части с некоторым удалением от строения. Систематизация знаний причин и условий возникновения ДТП, его регистрации сотрудниками ГИБДД и автоматизации вычислений расстояний по географическим координатам привела к решению рассчитать место ДТП с использованием программного подхода. Это позволит обработать большое количество информации с минимальным количеством ошибок и трудозатрат.

Каждое ДТП, как правило, имеет адрес, включающий название страны, населенный пункт, улицу, а также номер дома и т.д. Этих данных достаточно для определения координат центра сооружения в библиотеке Python – геору [4, 5].

Геору предоставляет удобные инструменты для работы с геокодированием, преобразованием адреса в координаты и наоборот. Поддерживает различные геоинформационные сервисы, такие как Google Maps, OpenStreetMap, Bing Maps, Nominatim и др. Использует различные методы расчета расстояний, включая формулы Винсента и Гаверсинуса.

С учётом синтаксиса записи адреса в базу данных АИУС ГИБДД разработан алгоритм получения координат дома, к которому имеет привязку ДТП:

```
from geopy.geocoders import Nominatim
geolocator = Nominatim(user_agent="my_app")
# Указываем адрес
street_name = "Карла Маркса"
city = "Хабаровск"
country = "Россия"
house = "66"
address = f'{street_name}, {house}, {city}, {country}'
```

```
location = geolocator.geocode(address)
house_coordinates = (location.latitude, location.longitude)
if location:
    print(house_coordinates)
else:
    print("Координаты не найдены")
```

Из модуля `geopy.geocoders` импортирован класс `Nominatim`, создан объект `geolocator` с обозначением пользовательского агента. Указывается название улицы, города, страны и номера дома. Метод `geocode` объекта `geolocator` используется для получения координат по заданному адресу. В результате алгоритм возвращает объект `location`, который содержит информацию о найденном местоположении, включая широту (`latitude`) и долготу (`longitude`). После этого добавлена логика по проверке отсутствия координат и сообщению результатов оператору.

ДТП происходит на проезжей части, соответственно, получив координаты дома необходимо найти ближайшую от них точку на дороге. Для этого использована библиотека Python – `OSMnx`, с целью извлечения, представления и анализа данных географических сетей, основанных на информации `OpenStreetMap` [6]. С её помощью пользователи могут создавать и визуализировать графы дорожных сетей, исследовать и проводить анализ сетевой структуры, извлекать маршруты и осуществлять множество других операций с географическими данными.

`OSMnx` содержит списки координат различных категорий транспортных объектов, в том числе дорог [7]. По названию улицы возможно извлечь список координатных точек, принадлежащих ей. Ниже приведен код, разработанный для реализации такого запроса с целью получения данных. Стоит отметить, что улица, дом и страна устанавливаются при определении координат дома, они же автоматически используются для выявления координат исследуемой улицы.

```
import osmnx as ox
place_name = "{city}, {country}".format(city=city,
country=country)
street_name = "улица
{street_name}".format(street_name=street_name)
G = ox.graph_from_place(place_name,
network_type='drive')
gdf_nodes, gdf_edges = ox.graph_to_gdfs(G)
street_edges = gdf_edges[gdf_edges['name'] =
= street_name]
street_coords = list(street_edges.geometry.apply
(lambda x: [(coord[1], coord[0]) for coord
in list(x.coords)]))
street_coords = [item for sublist in street_coords
for item in sublist]
print(street_coords)
```

После импорта библиотеки `OSMnx` формируются необходимые данные для запроса (название населенного пункта и улицы), для этого используются предварительно определенные переменные `city`, `country` и `street_name`.

С помощью функции `graph_from_place()` устанавливается граф дорожной сети `OpenStreetMap` для указанного места и типа сети (в данном случае `drive`). Он преобразуется в `GeoDataFrame` с помощью функции `graph_to_gdfs()`.

С использованием фильтрации по названию улицы найдены все ребра (дороги), соответствующие ей. Извлечены и объединены в один список `street_coords` координаты точек для каждого ребра.

С целью визуального контроля соответствия извлеченных географических координат исследуемой улице, полученные данные были представлены на интерактивной карте следующим алгоритмом:

```
import folium
m = folium.Map(location=[48.4803075,
135.08902902922785], zoom_start=12)
folium.Marker(location=house_coordinates,
popup='B', icon=folium.Icon(color='red')).add_to(m)
for point in street_coords:
    folium.Marker(location=point, popup='Road
Point',).add_to(m)
m.show_in_browser()
m.save('map.html')
```

Для создания интерактивной карты использована библиотека `Folium` [6], на которой отображаются координаты дома (красная точка) и дороги (синие точки) (рис. 1).

В строке `m = folium.Map(location=[48.4803075, 135.08902902922785], zoom_start=12)` создается карта с указанными координатами центра и уровнем масштабирования. Добавляется маркер для дома (`house_coordinates`), затем в цикле маркеры для каждой точки дороги из списка `street_coords`. Последние две строки кода отображают карту в браузере и сохраняют ее в файл с названием «map.html».

После получения всех координатных точек дороги (`street_coords`) необходимо найти ближайшую к дому (`house_coordinates`). Для этого был разработан приведенный ниже алгоритм:

```
points = street_coords
from scipy.spatial import distance
points = street_coords
def dist_func(p1, p2):
    return distance.euclidean(p1, p2)
closest_point = min(points, key=lambda p:
dist_func(p, house_coordinates))
print("Ближайшая координата к дому:")
print(closest_point)
```

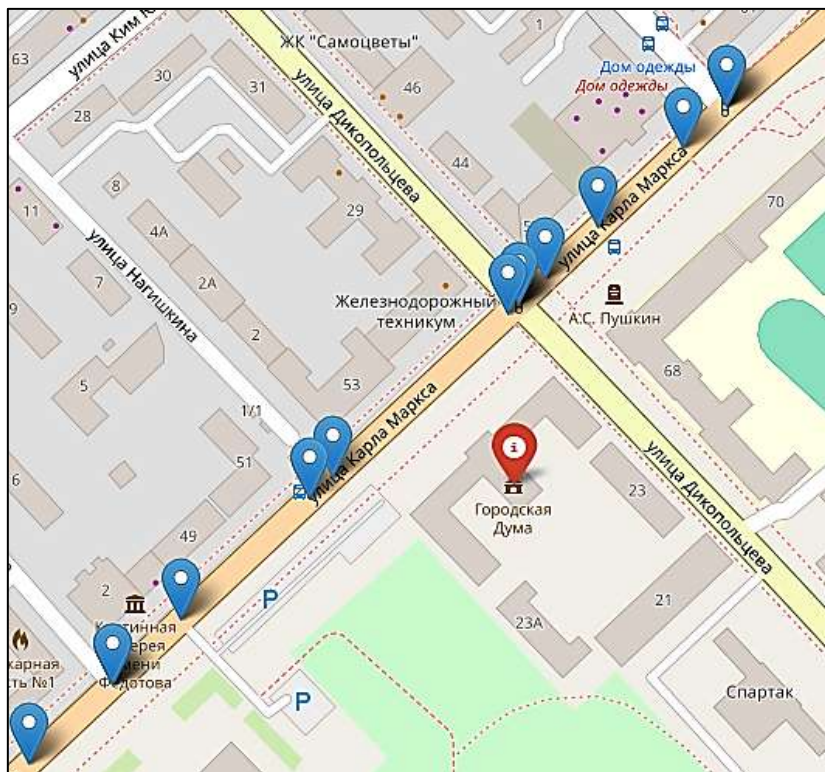


Рис. 1. Интерактивная карта с метками дороги и дома библиотеки Folium

Создается список точек `points` с координатами на дороге. Импортируется функция `distance` из библиотеки `scipy.spatial`, которая используется для расчета дистанции. Определяется функция `dist_func(p1, p2)`, возвращающая евклидово расстояние между двумя точками `p1` и `p2`, после чего находится ближайшая точка к `house_coordinates` с использованием функции `min()` и лямбда, сравнивающая расстояние между точками и выбирающая минимальное.

Стоит отметить, что в любой геоинформационной библиотеке Python координатные геоданные (маркеры) не хаотичны и не имеют строгую последовательность, выражающуюся в одинаковом интервале между ними. Их задача – отрисовать дорогу прямыми линиями. Также маркерами фиксируются пересечения проезжих частей (рис. 1). Из этого следует, что точка ДТП не всегда перпендикулярна точке дома, если брать за основание дорогу. Тем не менее были разработаны дополнительные подходы на основе алгоритмов Python, которые апробированы и проверены на точность определения места возникновения ДТП [1, 8].

Первый заключался в построении треугольника и нахождении его высоты по теореме Пифагора, с условием, что вершиной треугольника является маркер дома, из которой проводится перпендикуляр к противоположной стороне, образованной по двум ближайшим точкам к дому на дороге слева и справа. В месте пересечения перпендикуляром основания определяется координатная точка, которая принимается как место ДТП (рис. 2, а).

Во втором способе также определяются две ближайшие точки к дому на дороге слева и справа. Между ними с установленным шагом, например 5 м, находятся маркеры, после чего определяется ближайшая из них к центру дома.

В третьем используется «активный радиус». Находятся две ближайшие точки к дому слева и справа. Между ними чертится прямая. Вокруг маркера дома строится окружность с минимальным «активным радиусом», который увеличивается до тех пор, пока не коснется прямой, образованной точками дороги. В месте соприкосновения определяется маркер дороги, также принимаемый за место ДТП (рис. 2, б).

При сопоставлении данных, полученных программным способом, с реальной картиной ДТП выяснилось, ни один из трех описанных подходов не отражает реальную картину так, как приведенный выше код на языке программирования Python [2].

Каждый маркер дороги в библиотеке Folium находится в изломе между прямыми. Как правило, это кривые в плане, соответственно, на таких участках формируются очаги аварийности (рис. 3) [9]. Поэтому было решено не использовать приведенные три способа, а брать ближайшую точку излома дороги, как продемонстрировано в алгоритме, где приведен пример определения географических координат ДТП на дороге, которое произошло по адресу: г. Хабаровск, ул. Карла Маркса, д. 66. В результате получена точка (48.4862291, 135.0797103), она находится на пересечении проезжих частей ул. Карла Маркса и ул. Дикопольцева. В этом месте наблюдается из-

лом участка дороги, соединяющий две прямые линии. Изучение топографических карт дорожного надзора ГИБДД за два года показало, что в районе исследуемого дома именно в этом месте концентрируются очаги аварийности.

При регистрации ДТП сотрудники ГИБДД указывают адрес таким образом, чтобы улица соответствовала улице движения нарушителя [10]. В редких случаях допускаются неточности регистрации

или квалификации административного правонарушения, но при большой выборке и очистке от выбросов такие данные не будут влиять на дальнейшие исследования [1], поэтому координатная привязка к названию улицы обоснована.

Опыт использования рассматриваемых технологий работы с географическими координатами закрепляется определением нового параметра системы ВАДС – максимальной обеспечиваемой скорости.

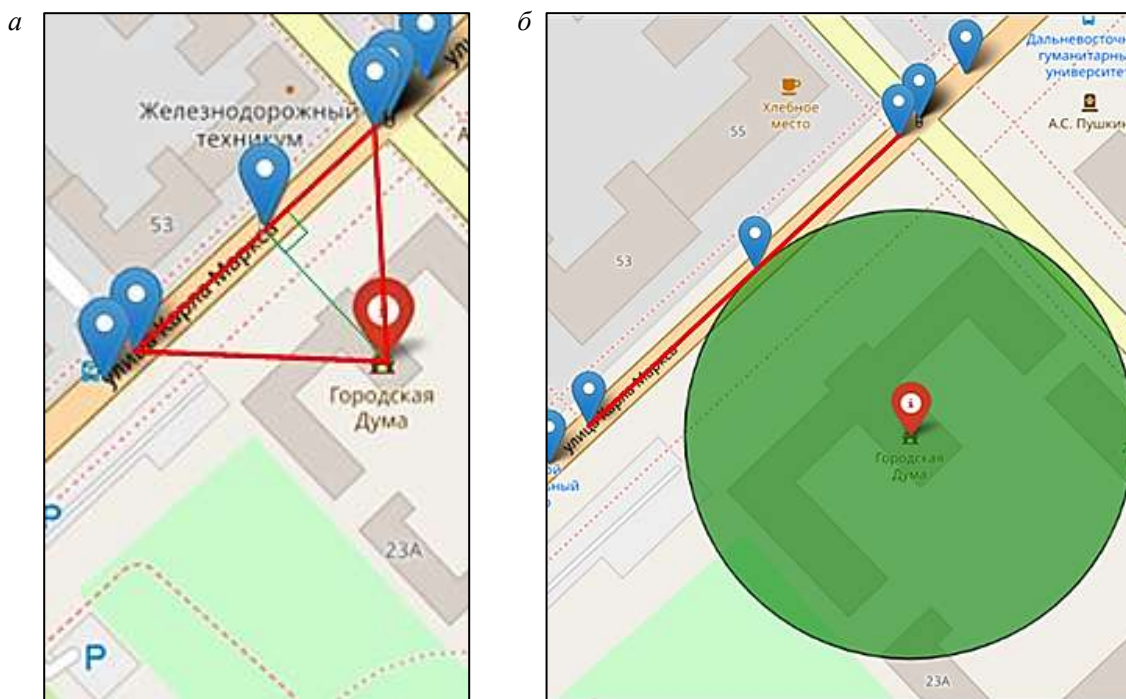


Рис. 2. Определение маркера ДТП относительно дома: *а* – из условия, что ДТП произошло перпендикулярно оси дороги относительно координатной точки дома; *б* – из условия, что ДТП – это ближайшая точка от дома на дороге

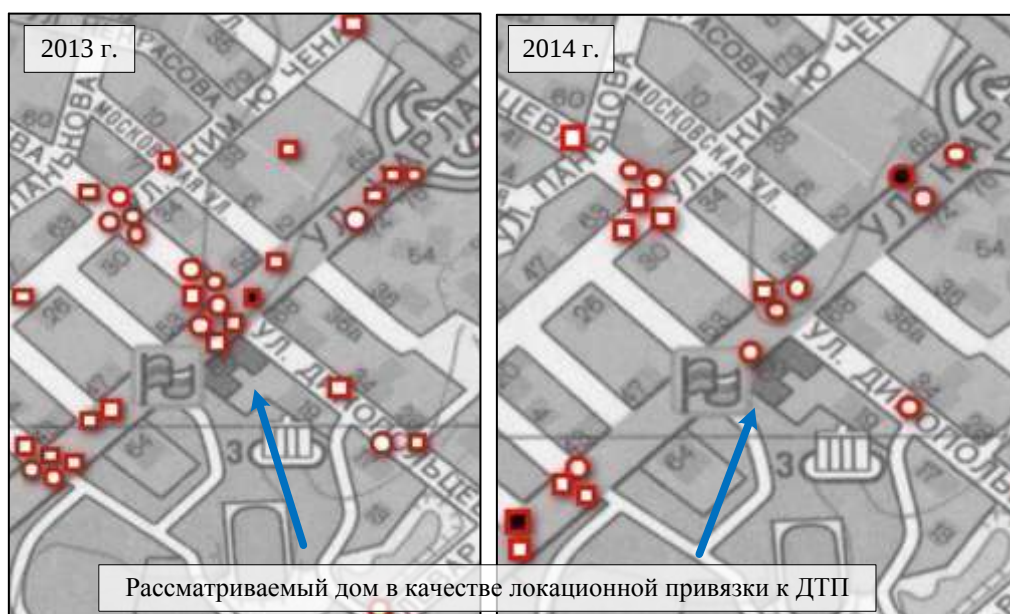


Рис. 3. Данные топографических карт ДТП дорожного надзора ГИБДД г. Хабаровска

Скорость движения транспортного потока в большинстве своем определяется не запрещающими знаками, а максимальной скоростью, с которой водитель останется безнаказанным [11]. Из этого следует, что максимальная обеспечиваемая скорость – это максимальная скорость на исследуемом участке проезжей части в момент времени, которую способен развить автомобиль без негативных для водителя юридических последствий. В России превышением скорости считается значение выше на 20 км/ч максимальной разрешенной [12]. В местах отсутствия средств фиксации административных правонарушений или малой интенсивности скорость потока может быть еще выше [13]. Соответственно, для оценки безопасности дорожного движения целесообразно использовать не максимальную скорость, а максимальную обеспечиваемую скорость. Для измерения данного показателя использовалось устройство, работающее с глобальной навигационной системой [14], которое перемещалось на автомобиле по исследуемым дорогам с максимальной скоростью в разное время суток два года.

В активном состоянии устройство с определенной периодичностью запрашивает данные о своем местоположении со спутников Земли. Координаты записываются в файл с привязкой к дате и времени суток [15].

Разработана программа расчета скорости. Логика основана на определении расстояния между смежными координатными точками, которое делится на разницу во времени получения этих данных. Применены формулы евклидова расстояния и полусинуса, учитывающие сферическую поверхность Земли. Программа модернизирована разработанными ранее алгоритмами консолидации данных максимальной обеспечиваемой скорости с другими характеристиками УДС для проверки их совокупного влияния на ДТП (впоследствии методами машинного обучения некоторые признаки будут исключены как неэффективные [1]). Полный код программы приведен на портале GitHub (https://github.com/glowfisch8lan/injury_forecast/blob/main).

Анализ максимальной обеспечиваемой скорости стал частью большой работы по оценке травматизма при ДТП, соответственно, влияние данной неза-

висимой переменной на зависимую исследовалось в структуре совокупного взаимодействия всех факторов, характеризующих аварийность [14].

Выводы

Статистика ДТП включает множество параметров системы ВАДС. С начала изучения проблем аварийности обобщали и интерпретировали лишь малую часть из них, объясняя тем самым анализируемое событие. Исследования в данной области расширили их перечень, в результате чего появилась необходимость высокоточного объединения данных из различных информационных ресурсов.

Развитие спутниковых систем навигации и инструментов по работе с ними потребовало обновить большую часть информационных ресурсов под новые условия. Это дало возможность не только уточнить существующие данные, но и консолидировать информацию с учетом локационной привязки, соответствия даты и времени суток. Таким образом были разработаны алгоритмы, которые вошли в состав одной программы по объединению и анализу данных с различных информационных ресурсов. Они являются результатом глубокого анализа динамики возникновения ДТП на основе исследований в области безопасности дорожного движения профессора В.Ф. Бабкова [2].

В работе использованы современные инструменты языка программирования Python, разработаны аналитические алгоритмы. С использованием библиотеки Folium из массива координат определяется одна, наиболее подходящая к ДТП конкретного адреса. Точность выбора точки места происшествия экспериментально обоснована.

Разработаны алгоритмические инструментари, базирующиеся на полученных теоретических результатах и программных прототипах их основных компонентов, методов и алгоритмов аналитики, для объединения массивов данных из разных информационных ресурсов.

Результаты работы послужили основой дальнейших исследований безопасности дорожного движения на основе методов машинного обучения, которые будут освещены в следующих трудах авторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Григоров Д.Е. Совершенствование системы безопасности дорожного движения, стремящейся к нулевой смертности на автомобильных дорогах : монография. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2024. 183 с.
2. Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения : учебник для вузов. Москва : Транспорт, 1993. 271 с.
3. Пугачев И.Н., Скрипко П.Б., Шешера Н.Г. Программный подход к комплексному сбору и подготовке данных об интенсивности движения транспортных средств, погодных условий и естественной освещенности в часовых интервалах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 10. С. 43–51.
4. Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Щеглов В.И. Анализ геометрических элементов дорог с помощью современных геоинформационных систем при оценке их аварийности // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3(86). С. 127–133.
5. Гордиенко Л.В. Геоинформационное картографирование дорожных условий с использованием пространственных данных OpenStreetMap // Инженерный вестник Дона. 2023. № 12(108). С. 695–705.
6. Zhou Qi., Wang Sh., Liu Ya. Exploring the accuracy and completeness patterns of global land-cover/land-use data in OpenStreetMap // Applied Geography. 2022. Vol. 145. С. 102742.
7. Factor Analysis of Traffic Organization and Safety Systems / I. Pugachev, Y. Kulikov, G. Markelov, N. Sheshera // Organization and Traffic Safety Management in large cities : 12th International Conference, SPbOTSIC-2016, 28–30 September 2016, St. Petersburg. St. Petersburg, 2017. P. 529–535.
8. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Разработка системы анализа качества улично-дорожных сетей на основе комбинированных признаков // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2021. № 8. С. 14–29.
9. Бакланова К.В., Воеводин Е.С., Воеводина Е.С. Влияние неучтенных факторов на безопасность дорожного движения // Прогрессивные технологии в транспортных систе-

мах : материалы XVII международной научно-практической конференции. Оренбург, 2022. С. 14–20.

10. Семенов Е.Ю. Особенности учета дорожно-транспортных происшествий // Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования. 2021. № 1(4). С. 399–403.

11. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях : от 30.12.2001 № 195-ФЗ (ред. от 08.08.2024) // Собрание законодательства РФ. 07.01.2002. № 1 (ч. 1). Ст. 12.9.

12. Комплексный подход к повышению безопасности дорожного движения на основе анализа транспортно-эксплуата-

ционного состояния автомобильной дороги / И.Н. Пугачёв, А.В. Каменчуков, В.А. Ярмолинский, Н.Г. Шешера // Дороги и мосты. 2018. № 1(39). С. 21.

13. Максимальная обеспечиваемая скорость как ключевой показатель травматизма при ДТП. Способы сбора, обработки и анализа / И.Н. Пугачев, С.С. Евтюков, Н.Г. Шешера, Д.Е. Григоров // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 6. С. 46–54.

14. Бильгаева Л.П., Суворов Г.Н. Система сбора и анализа данных с GPS-трекера // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2023. № 6–2. С. 31–38. (Естественные и технические науки).

REFERENCES

1. Pugachev I.N., Sheshera N.G., Grigorov D.E. Sovershenstvovaniye sistemy bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya, stremyashejsya k nulevoj smertnosti na avtomobil'nykh dorogakh [Improving the road safety system aimed at zero fatalities on roads] : monographiya. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2024. 183 s.

2. Babkov V.F. Dorozhnye usloviya i bezopasnost' dvizheniya [Road conditions and traffic safety] : uchebnik dlya vuzov. Moskva : Transport, 1993. 271 s.

3. Pugachev I.N., Skripko P.B., Sheshera N.G. Programmnyy podkhod k kompleksnomu sboru i podgotovke dannykh ob intensivnosti dvizheniya transportnykh sredstv, pogodnykh usloviy i estestvennoy osveshennosti v chasovykh intervalakh [Software approach to integrated collection and preparation of data on vehicle traffic intensity, weather conditions and natural light in hourly intervals] // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2023. Vol. 17, № 10. P. 43–51.

4. Pugachev I.N., Sheshera N.G., Shcheglov V.I. Analiz geometricheskikh elementov dorog s pomosh'yu sovremennykh geoinformatsionnykh sistem pri otsenke ikh avarijnosti [Analysis of geometric elements of roads using modern geographic information systems when assessing their accident rate] // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2021. № 3(86). S. 127–133.

5. Gordienko L.V. Geoinformatsionnoye kartografirovaniye dorozhnykh usloviy s ispol'zovaniem prostranstvennykh dannykh OpenStreetMap [Geoinformation mapping of road conditions using OpenStreetMap spatial data] // Inzhenernyy vestnik Dona. 2023. № 12(108). S. 695–705.

6. Zhou Qi., Wang Sh., Liu Ya. Exploring the accuracy and completeness patterns of global land-cover/land-use data in OpenStreetMap // Applied Geography. 2022. Vol. 145. P. 102–742.

7. Factor Analysis of Traffic Organization and Safety Systems / I. Pugachev, Y. Kulikov, G. Markelov, N. Sheshera // Organization and Traffic Safety Management in large cities : 12th International Conference, SPbOTSIC-2016, 28–30 September 2016, St. Petersburg. St. Petersburg, 2017. P. 529–535.

8. Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A. Razrabotka sistemy analiza kachestva ulichno-dorozhnykh setej na osnove

kombinirovannykh priznakov [Development of a system for analyzing the quality of street and road networks based on combined features] // Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. Nauchnyy informatsionnyy sbornik. 2021. № 8. S. 14–29.

9. Baklanova K.V., Voevodin E.S., Voevodina E.S. Vliyaniye neuchtennykh faktorov na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya [The impact of unaccounted factors on road traffic safety] // Progressivnyye tekhnologii v transportnykh sistemakh : materialy XVII mezhdunarodnoy nauchno-practicheskoy konferentsii. Orenburg, 2022. S. 14–20.

10. Semenov E.Yu. Osobennosti ucheta dorozhno-transportnykh proishestviy [Features of recording road accidents] // Upravleniye deyatel'nost'yu po obespecheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: sostoyaniye, problemy, puti sovershenstvovaniya. 2021. № 1(4). S. 399–403.

11. Kodeks Rossijskoj Federatsii ob administrativnykh pravonarusheniyyakh [Code of the Russian Federation on Administrative Offenses]: ot 30.12.2001 № 195-FZ (red ot 08.08.2024) // Sobraniye zakonodatel'stva RF. 07.01.2002. № 1 (ch.1). S. 12.9.

12. Kompleksnyy podkhod k povysheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na osnove analiza transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya avtomobil'noj dorogi [An integrated approach to improving road safety based on the analysis of the transport and operational condition of the road] / I.N. Pugachev, A.V. Kamenchukov, V.A. Yarmolinsky, N.G. Sheshera // Dorogi i mosty. 2018. № 1(39). S. 21.

13. Maksimal'naya obespechivayemaya skorost' kak klyuchevoy pokazatel' travmatizma pri DTP. Sposoby sbora, obrabotki i analiza [Maximum provided speed as a key indicator of injuries in road accidents. Methods of collection, processing and analysis] / I.N. Pugachev, S.S. Evtyukov, N.G. Sheshera, D.E. Grigorov // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2024. Vol. 18, № 6. S. 46–54.

14. Bilgaeva L. P., Suvorov G. N. Sistema sbora i analiza dannykh s GPS-trkera [System for collecting and analyzing data from a GPS tracker] // Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. 2023. № 6–2. S. 31–38. (Estestvennye i tekhnicheskiye nauki).

Информация об авторах

И.Н. Пугачев – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог»;

Н.Г. Шешера – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационного и технического обеспечения ОВД»;

Д.Е. Григоров – начальник кабинета специальных дисциплин кафедры «Информационного и технического обеспечения ОВД».

Information about the authors

I.N. Pugachev – Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department «Research and Design of Railways and Highways»;

N.G. Sheshera – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department «Information and Technical Support of Internal Affairs Bodies»;

D.E. Grigorov – Head of the Office of Special Disciplines of the Department «Information and Technical Support of Internal Affairs Bodies».

Статья поступила в редакцию 24.09.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.
The article was submitted: 24.09.2024; approved after reviewing: 17.10.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

Научная статья
УДК 625.173:656.261:519.8

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНА РЕМОНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОСТАВЩИКОВ КОМПЛЕКТУЮЩИХ И МОЩНОСТЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ БАЗ ПМС

Сазанова Екатерина Владимировна¹, Анисимов Владимир Викторович²

^{1,2} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

¹ anysia.khv@mail.ru

² avv@anis.khv.ru

Аннотация. Рассмотрена задача формирования оптимального плана капитальных ремонтов железнодорожного пути для наиболее распространенных случаев выполнения ремонтов на сети дорог ОАО «РЖД» – с использованием новых материалов для звеньев и бесстыкового путей. Представлены схемы цепочек производства и поставки продукции для выполнения ремонтов. Отмечены особенности задачи, которые не позволяют применить существующие методы оптимизации в графовых моделях (в частности, методы решения традиционной транспортной задачи).

Излагается применение математической постановки и методики решения обобщенной многостадийной транспортной (производственно-распределительной) задачи, ранее разработанных авторами для целей формирования плана, учитывающего разнотипные промежуточные пункты (узлы) в цепочке поставок и многокомпонентную структуру производства продукции на отдельных стадиях производства. Рассмотрен условный пример, максимально приближенный к реальности, с исходными данными и результатами расчетов. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенных математической постановки и методики решения поставленной задачи как с математической, так и с практической точек зрения. Реализация рекомендованной методики решения поставленной задачи и экономическая оценка получаемых решений позволяют эффективно формировать оптимальные планы производства и поставок продукции в кратко- и среднесрочной перспективе, что позволит сократить затраты и увеличить рентабельность всей цепочки производства и поставки продукции производственных баз ПМС.

Ключевые слова: транспортная задача, производственно-распределительная задача, симплекс-метод, цепочки поставок, последовательное производство продукции, оптимизация поставок, фиктивные поставки, производственные базы путевых машинных станций, звеносборочная линия, звеноразборочная линия, рельсосварочные предприятия, ареал потребления, ремонтно-путевые работы, рельсошпальная решетка

Original article

OPTIMIZATION OF THE PLAN FOR RAIROAD TRACK REPAIRS TAKING INTO ACCOUNT CAPABILITIES OF OUTFIT SUPPLIERS AND CAPACITIES OF TRACK MACHINE STATIONS' PRODUCTION BASES

Sazanova Ekaterina V.¹, Anisimov Vladimir V.²

^{1,2} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

¹ anysia.khv@mail.ru

² avv@anis.khv.ru

Abstract. The paper considers the problem of forming an optimal plan of major repairs of the railroad track for the most common cases of repairs on the rail network of JSC «Russian Railways» – with the use of new materials for link and jointless tracks. Schemes of chains of production and supply of products for repairs are provided. The peculiarities of the task, which do not allow to apply existing optimization methods in graphical models are noted (in particular, methods of solving the traditional transportation problem).

In the article the application of mathematical formulation and methods of generalized multistage transport (production-and-distribution) problem is described. This formulation was previously developed by the authors for the purposes of forming a plan, taking into account different types of intermediate points (nodes) in the supply chain and multicomponent structure of production at separate stages of production. A conditional example, as close as possible to reality, with initial data and results is considered. The results obtained testify to the effectiveness of the proposed mathematical formulation and methods of solving the problem, both from the mathematical and practical points of view. Realization of the proposed method of solving the set problem and economic evaluation of the obtained solutions will allow to effectively form the optimal plans of production and supply of products in the short- and medium-term perspective, which will allow to reduce costs and increase the profitability of the entire chain of production and supply of products of track machine stations' production bases.

Keywords: transportation problem, production-and-distribution problem, simplex method, supply chains, sequential production of products, supply optimization, fictitious supplies, track machine stations' production bases, link-assembly line, link-disassembly line, rail-welding enterprises, consumption area, repair and track works, rail and sleeper grating

Введение

Задача по разработке технико-экономического обоснования оптимальной транспортировки комплектов для загрузки звеносборочных линий (ЗСЛ) рельсошпальной решетки (РШР), расположенных на производственных базах путевых машинных станций (ПМС), а также производства и транспортировки готовой продукции на участки временного складирования или ремонта ежегодно ставится Центральной дирекцией по ремонту пути [1]. В работе [2] приведены четыре различные постановки этой задачи и предложены методики их решения, однако для некоторых из постановок предложенные в [2] методики решения не являются оптимальными.

Наиболее общая постановка, приведенная в [2], включает в себя учет всей цепочки поставок (рис. 1) от поставщиков комплектующих до ареалов потреб-

ления ($\approx$ участков ремонта). Под ареалом понимается любая часть железнодорожной сети, на которой планируется выполнение ремонтно-путевых работ, начиная от конкретного участка пути с указанием километража до полигона отдельной дороги.

Содержательная постановка обобщенной задачи поставок, приведенная в [2], звучит следующим образом: разработать оптимальный план поставки комплектов, а также сборки и поставки одного вида продукции с баз в ареалы потребления ($\approx$ участки ремонта) при неизменной мощности баз, заданных годовых объемах ремонта и горизонте планирования.

Задача может рассматриваться как транспортная, соответственно, с применением методов оптимизации на сетях, предложенных в работах [3–14], но этому препятствует ряд особенностей, которые необходимо учесть.

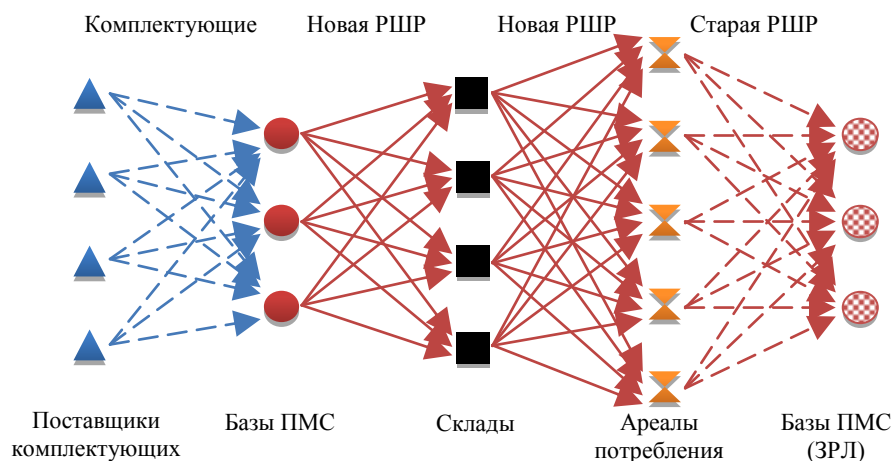


Рис. 1. Упрощенная схема цепочки производства и поставки продукции при выполнении ремонтов пути (звеньевой путь)

Особенности задачи

Во-первых, при перевозке РШР (с баз ПМС или складов до ареалов потребления) поставка осуществляется не «от точки до точки» с четко определенным расстоянием, а «от точки до ареала потребления» (рис. 2). Такой подход к рассмотрению участков ремонта необходим ввиду того, что план ремонта может меняться в течение года, и количество ремонтируемых участков в рамках одного ареала варьируется как в большую, так и в меньшую сторону. Решение проблемы предложено в [15] путем введения понятия «средневзвешенное расстояние» поставки продукции с базы (склада) до ареала и методических рекомендаций по его определению.

Во-вторых, данная транспортная задача является многостадийной (многоэтапной), так как в цепочке поставок имеются промежуточные пункты (рис. 3 и 4).

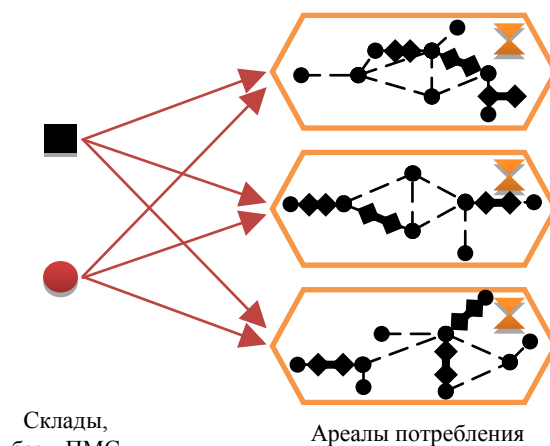


Рис. 2. Поставка продукции в ареалы потребления

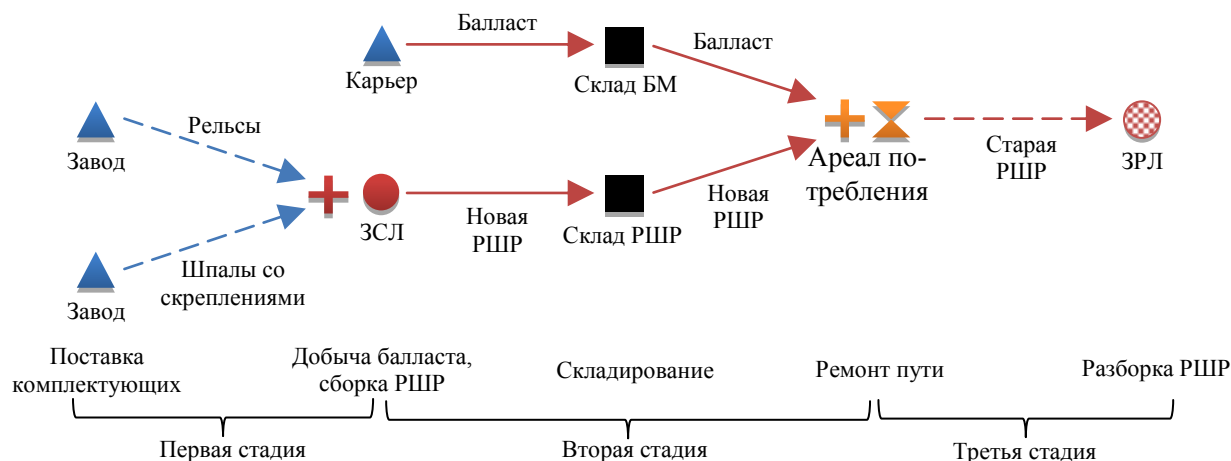


Рис. 3. Уточненная схема цепочки производства и поставки продукции при выполнении ремонтов пути (звеньевой путь)

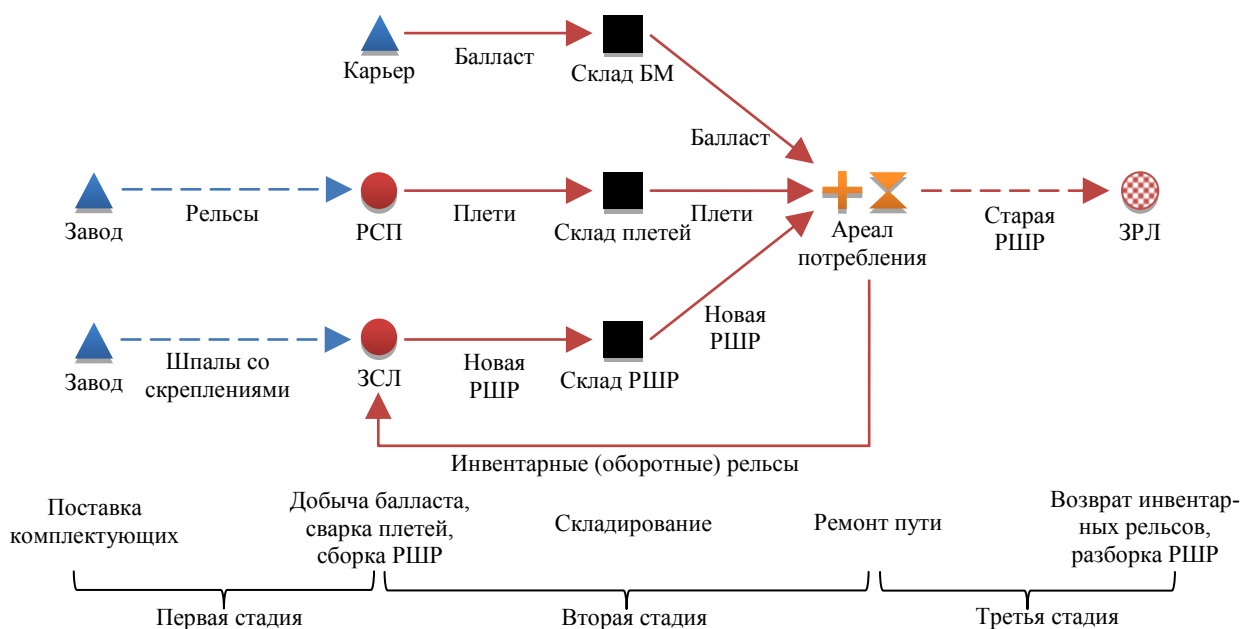


Рис. 4. Уточненная схема цепочки производства и поставки продукции для выполнения ремонтов пути (бесстыковой путь)

Уточненная схема производства и поставки разных видов продукции при выполнении капитального ремонта пути с использованием новых материалов для звеньевой пути выглядит следующим образом:

- 1-я стадия: с заводов-изготовителей на базы ПМС поступают рельсы и железобетонные шпалы в комплектации со скреплениями;
- 2-я стадия:
 - в карьерах добывают балласт и делают его запасы на складах балластных материалов (БМ);
 - на ЗСЛ баз ПМС с помощью поступивших рельсов и шпал собирают звенья новой РШР длиной по 25 м, после чего звенья также складировать;
 - элементы верхнего строения пути (балласт, звенья новой РШР) со складов доставляют на участки ремонта;

- 3-я стадия:
 - на участках ремонта снимают звенья старой РШР и укладывают новую;
 - выполняют балластировку пути с применением нового балласта;
 - выполняют другие работы на участке ремонта;
 - старую РШР перевозят на базы ПМС, где на звеноразборочных линиях (ЗРЛ) осуществляется ее разборка и сортировка элементов РШР по степени годности.

На рис. 4 отображена подобная схема для случая выполнения капитального ремонта пути для бесстыкового пути, который в настоящее время является наиболее распространенным.

Для этого случая цепочка производства и поставки продукции несколько усложняется:

- 1-я стадия:
 - с заводов на рельсосварочные предприятия (РСП) поступают рельсы длиной 25 или 100 м;
 - с заводов на базы ПМС поступают железобетонные шпалы в комплектации со скреплениями;
- 2-я стадия:
 - в карьерах добывают балласт и делают его запасы на складах балластных материалов;
 - на РСП из рельсов сваривают плети длиной по 800 м и направляют для хранения на склады плетей;
 - на ЗСЛ баз ПМС с помощью инвентарных рельсов и поступивших шпал собирают звенья новой РШР длиной по 25 м, после чего звенья также складывают;
 - элементы верхнего строения пути (балласт, плети, звенья РШР) со складов доставляют на участки ремонта;
- 3-я стадия:
 - на участках ремонта снимают звенья старой РШР и укладывают новую;
 - инвентарные рельсы меняют на плети и при необходимости делают дополнительную сварку плетей, вплоть до целого перегона, а также последующую их шлифовку;
 - выполняют балластировку пути с применением нового балласта;
 - выполняют другие работы на участке ремонта;
 - инвентарные рельсы возвращают на базы ПМС, где осуществлялась сборка РШР;
 - старую РШР перевозят на базы ПМС, где на звеноразборочных линиях (ЗРЛ) осуществляется ее разборка и сортировка элементов РШР по степени годности.

Наиболее эффективный подход к решению задачи с двумя и более этапами заключается в использовании метода фиктивной диагонали [14]. Однако данный метод не позволяет решить рассматриваемую задачу в силу нижеприведенной особенности.

В-третьих, на разных стадиях (этапах) цепочки поставок перемещаются разные виды продукции, и для производства одного вида продукции на определенной стадии может потребоваться несколько видов продукции с предыдущей стадии. В частности, для выполнения ремонтов требуются балласт, плети и звенья новой РШР (см. рис. 3 и 4, узел «Ареал потребления»). При этом поставка элементов верхнего строения пути (комплектующих) должна быть взаимоувязана между собой, а также с возможностями РСП, ЗСЛ и складов.

В силу указанных особенностей, применение традиционных методов решения транспортной задачи (метода потенциалов, венгерского метода, метода фиктивной диагонали и т.п.) возможно, но не гарантирует нахождения оптимального решения [16].

Более того, в рассматриваемой задаче планируется не только транспортировка, но и производство продукции. В современных трудах разных авторов такие задачи обычно называют производственно-распределительными, или задачами проектирования цепочек поставок продукции. В [17, 18] выполнен хороший обзор работ по данной тематике, в том числе затрагивающих вопросы, связанные со второй и третьей особенностями [19–25]. В работах [24, 25] третья (ключевая) особенность явно обозначена и введена в модель, но приводит к необходимости использования в методе (методике) решения задачи эвристических приемов, что также не гарантирует получения оптимального результата.

В связи с этим авторами в [16] предложены новые математическая постановка и методика решения многостадийной производственно-распределительной задачи, базирующиеся на симплекс-методе и позволяющие ее решить за одну оптимизационную процедуру. В разработанных постановке и методике применяются ранее предложенные другими авторами подходы: традиционный набор ограничений на поставляемые объемы продукции; понятия «фиктивный поставщик» и «фиктивный потребитель» для уравнивания этих объемов; применение симплекс-метода [5, 26]. Для учета взаимосогласованности (взаимоувязанности) объемов поставок в узлы со сборкой (производством) многокомпонентной продукции авторами в [16] введены понятия «фиктивная часть» и «реальная часть» поставок продукции отдельного поставщика (потребителя), а также расширен набор ограничений.

На рис. 5 показана укрупненная блок-схема методики определения оптимального плана производства и поставок продукции.

Ниже излагается практическое применение данной методики для решения задачи оперативного (в пределах года) планирования ремонтов пути с видами продукции, показанными на рис. 4.

Пример применения методики

М1. Определяются коэффициенты приведения $k_{pp}+$ продукции с видом p к продукции с видом p^+ .

В табл. 1 представлены коэффициенты приведения видов продукции для условного примера. Следует отметить продукцию «1 км ремонта», для которой вначале требуется композиция (объединение) разных видов элементов верхнего строения пути, а после выполнения ремонтов – их декомпозиция.

М2. Для реальных поставщиков и потребителей определяются суммарные максимально возможные объемы производства (закупки, переработки, сборки, хранения, потребления) всех видов продукции V^p . В случае необходимости (для уравнивания объемов) вводятся фиктивные поставщики и/или потребители, пункты делятся на две части, и определяются суммарные объемы $V^{rr,p}$, $V^{rf,p}$ и $V^{ff,p}$.

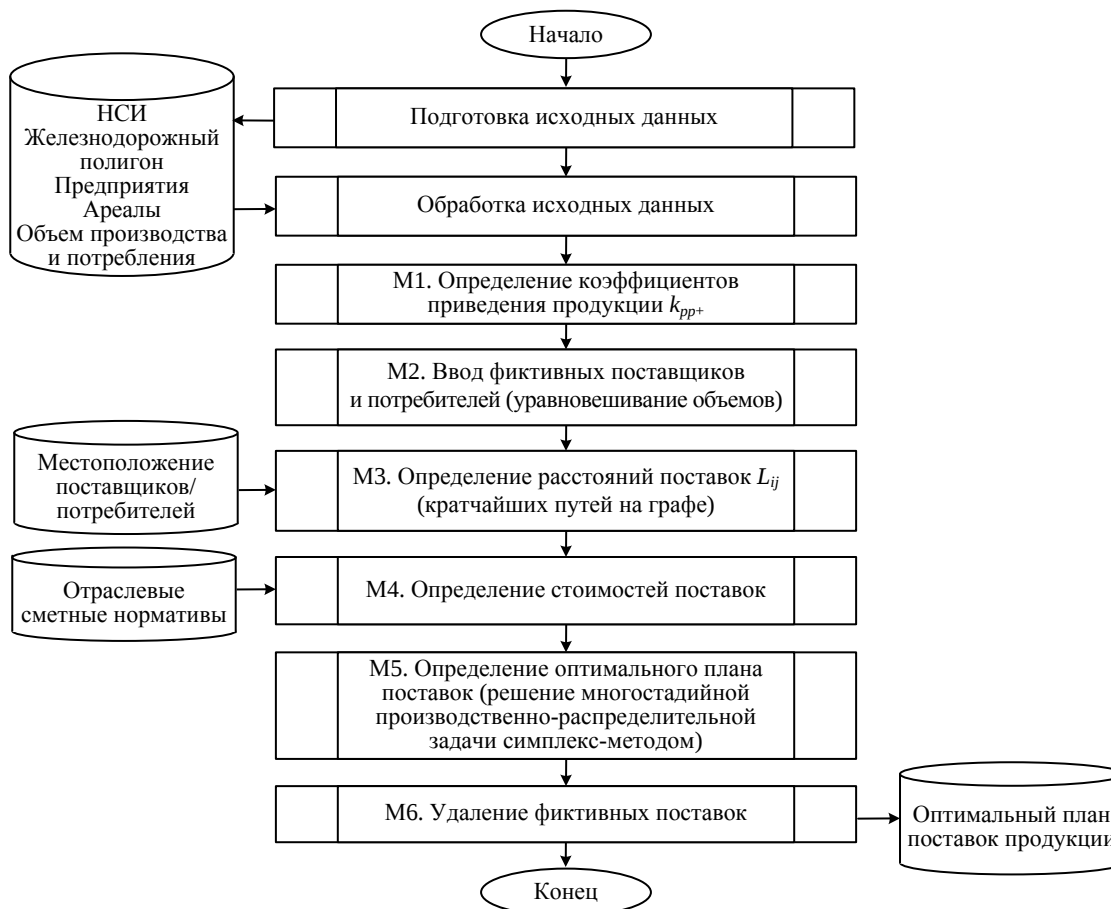


Рис. 5. Укрупненная блок-схема методики

Таблица 1

Коэффициенты приведения k_{pp^+}

Вид продукции p	Вид продукции p^+	Значение k_{pp^+}	Примечания
Рельс	Плеть	32	Рельс 25 м – плеть 800 м
Шпала	Звено	46	Шпалы эпюра 1840 шт./км – звено 25 м
Балласт	1 км ремонта	2680	Капитальный ремонт с заменой балласта для 1–2-го класса пути, м ³
Плеть	1 км ремонта	2,5	Плеть 800 м
Звено	1 км ремонта	40	Звено 25 м
1 км ремонта	Рельс	0,0125	Рельс 25 м
1 км ремонта	Звено	0,025	Звено 25 м

Возможные объемы поставки, производства и хранения элементов верхнего строения, а также требуемые объемы ремонтов пути и разборки РШР приведены в табл. 2, из которой следует, что на каждый вид исходных комплектующих имеется по 2 завода-поставщика, сборка РШР осуществляется на 3 базах ПМС (ЗСЛ), балласт добывается в 2 карьерах, для хранения различных видов элементов верхнего строения предназначено по 4 склада, ремонт требуется в 5 ареалах потребления ($\approx$ участках ремонта), разборка звеньев старой РШР выполняется на 3 базах ПМС (ЗРЛ). По данным таблицы потребности в ремонте превышают возможности поставщиков и других звеньев производственной це-

почки, в связи с чем для уравновешивания объемов в соответствующих строках указаны фиктивные поставщики и недостающие объемы производства.

М3. Определяются расстояния L_{ij} от поставщика i до потребителя j (как правило, методом определения кратчайших путей на графе). Если продукция поставщика i потребителю j не требуется, тогда $L_{ij} = 0$.

М4. Для каждого вида продукции p определяется стоимость поставки $c_{ij}^{rr,p}$ единицы продукции от поставщика i до потребителя j . Стоимости фиктивных поставок $c_{ij}^{rf,p}$, $c_{ij}^{fr,p}$ и $c_{ij}^{ff,p}$ единицы продукции p задаются большим числом BN .

Таблица 2

Возможные объемы производства и потребления продукции

Поставка комплектующих				Производство (добыча) элементов верхнего строения пути				Хранение				Ремонт пути		Возврат инвентарных рельсов и разборка РШР							
Рельсы, шт.		Шпалы, шт.		Плети, шт.		Новые звенья РШР, шт.		Балласт, м³		Плети, шт.		Новые звенья РШР, шт.		1 км ремонта		Инвентарные рельсы, шт.		Старые звенья РШР, шт.			
Завод Р1	35000	Завод Ш1	800000	РСП 1	500	ЗСЛ 1	9000	Карьер 1	1200000	Склад БМ1	500000	Склад П1	400	Склад РШР1	8000	Ареал 1	200	ЗСЛ 1	18000	ЗРЛ 1	10000
Завод Р2	40000	Завод Ш2	900000	РСП 2	600	ЗСЛ 2	10000	Карьер 2	1400000	Склад БМ2	600000	Склад П2	450	Склад РШР2	9000	Ареал 2	100	ЗСЛ 2	20000	ЗРЛ 2	11000
										Склад БМ3	700000	Склад П3	500	Склад РШР3	10000	Ареал 3	150	ЗСЛ 3	22000	ЗРЛ 3	12000
										Склад БМ4	800000	Склад П4	550	Склад РШР4	11000	Ареал 4	250				
														Ареал 5	300						
Итого V ^Р																					
	75000		1700000		1800		30000		2600000		2600000		1900		38000		1000		60000		33000
Итого в пересчете на 1 км ремонта (с учетом коэффициентов приведения) V ^Р																					
	937,50		923,91		720		750		970,15		970,15		760		950		1000		750		825
Недостаточные объемы производства/хранения/потребления в пересчете на 1 км ремонта (дефицит) V ^{ТТ}																					
	62,50		76,09		240		250		29,85		29,85		240		50		0		250		175
Фиктивные поставщики/потребители и требуемые объемы производства/хранения/потребления в исходных единицах измерения (дефицит) V ^{ТТ}																					
Завод РФ	5000	Завод ШФ	140000	РСП Ф	700	ЗСЛ Ф	10000		80000	Склад БМФ	80000	Склад ПФ	600	Склад РШРФ	2000		0	ЗСЛ Ф	20000	ЗРЛ Ф	7000
Избыточные объемы производства/хранения/потребления в пересчете на 1 км ремонта (избыток) V ^{ТТ}																					
	217,50		203,91		0		30		250,15		250,15		40		230		280		60		105
Избыточные объемы производства/хранения/потребления в исходных единицах измерения (избыток) V ^{ТТ}																					
	17400		375200		0		1200		670400		670400		100		9200		280		2400		4200

При определении стоимости c_{ij}^p некоторые ее составляющие, не зависящие от конкретного поставщика (потребителя), могут не учитываться. В частности, при сметном расчете в соответствии с единичными расценками и сметными нормами, приведенными в [27–29], стоимость выполнения сборки конкретного вида РШР не зависит от особенностей базы или звеносборочной линии на ней, т.е. она одинакова для всех. Аналогичная ситуация имеет место при хранении элементов верхнего строения пути, разборке старой РШР и т.п.

В табл. 3 и 4 представлены фрагменты матрицы стоимостей поставки единиц разных видов продукции за исключением одинаковых составляющих, но с учетом стоимости их закупки и перевозки по пунктам М.3 и М.4 методики.

В табл. 3 представлен фрагмент матрицы для двух типов предприятий, одно из которых является поставщиком (заводы, выпускающие рельсы), второе – потребителем (рельсосварочные предприятия). В таблице « r » означает реальную часть реального предприятий, « f » – фиктивную часть реального или фиктивного предприятий.

В табл. 4 представлен фрагмент матрицы для всех типов предприятий с указанием стоимости поставки только между реальными частями « r » предприятий, так как поставки с участием фиктивных частей « f » равны BN. Нумерация предприятий приведена с учетом наличия для каждого типа предприятий одного фиктивного.

М.5. Оптимизационная задача решается в постановке (1)–(10) симплекс-методом.

Таблица 3

Фрагмент матрицы стоимостей поставки единицы продукции c_{ij}^p для двух типов предприятий, руб.

Потребитель j		Поставщик i		1		2		3		4	
				РСП 1		РСП 2		РСП 3		РСП Ф	
				r	f	r	f	r	f	r	f
1	Завод Р1	r	85186	BN	BN	84693	BN	84355	BN	BN	BN
		f	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN
2	Завод Р2	r	86417	BN	BN	85926	BN	85581	BN	BN	BN
		f	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN
3	Завод РФ	f	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN

Критерий оптимизации (целевая функция) в соответствии с [16] – минимизировать суммарные затраты F на закупку, производство, хранение и перевозку всех видов продукции P на всех стадиях S от первичных поставщиков до конечных потребителей:

$$F = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t \in \{r, f\}} c_{ij}^{t_{ij}p} x_{ij}^{t_{ij}p} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Система ограничений 0.1–0.9 из [16] приведена с отдельной интерпретацией каждого ограничения применительно к поставкам, где одним из узлов цепочки поставок (поставщиком или потребителем) является ареал (совокупность участков ремонта). Подобная интерпретация должна быть применена ко всем звеньям производственной цепочки (заводы, РСП, ЗСЛ, склады, ареалы и ЗРЛ).

0.1. Для реальных поставщиков i суммарный поставленный объем продукции p с реальной и фиктивной частей одного реального поставщика должен равняться его максимально возможному объему производства.

Таблица 4

Фрагмент матрицы стоимостей поставки единицы продукции $c_{ij}^{т.р.}$
между реальными частями предприятий, руб.

Потребители j		1	2	3	5	6	7	9	10	11	12	14	15	16	17	19
Поставщики i		РСП 1	РСП 2	РСП 3	ЗСЛ 1	ЗСЛ 2	ЗСЛ 3	Склад БМ1	Склад БМ2	Склад БМ3	Склад БМ4	Склад П1	Склад П2	Склад П3	Склад П4	Склад РШР1
1	Завод Р1	85185	84693	84355												
2	Завод Р2	86417	85926	85581												
4	Завод Ш1				6710	6712	6716									
5	Завод Ш2				6830	6838	6842									
7	Карьер 1							3906	3942	3957	3921					
8	Карьер 2							4242	4206	4221	4257					
10	РСП 1											19351	24015	28679	33343	
11	РСП 2											138283	161603	166267	170931	
12	РСП 3											224567	247887	252551	257215	
14	ЗСЛ 1															96
15	ЗСЛ 2															830
16	ЗСЛ 3															1160
18	Склад БМ1															
19	Склад БМ2															
20	Склад БМ3															
21	Склад БМ4															
23	Склад П1															
24	Склад П2															
25	Склад П3															
26	Склад П4															
28	Склад РШР1															
29	Склад РШР2															
30	Склад РШР3															
31	Склад РШР4															
33	Ареал 1															
34	Ареал 2															
35	Ареал 3															
36	Ареал 4															
37	Ареал 5															

Продолжение табл. 4

Потребители j		20	21	22	24	25	26	27	28	30	31	32	34	35	36
Поставщики i		Склад РШР2	Склад РШР3	Склад РШР4	Ареал 1	Ареал 2	Ареал 3	Ареал 4	Ареал 5	ЗСЛ 1	ЗСЛ 2	ЗСЛ 3	ЗРЛ 1	ЗРЛ 2	ЗРЛ 3
1	Завод Р1														
2	Завод Р2														
4	Завод Ш1														
5	Завод Ш2														
7	Карьер 1														
8	Карьер 2														
10	РСП 1														
11	РСП 2														
12	РСП 3														
14	ЗСЛ 1	830	1160	482											
15	ЗСЛ 2	96	1527	757											
16	ЗСЛ 3	1527	96	1234											
18	Склад БМ1				24	28	31	35	39						
19	Склад БМ2				39	24	28	31	35						
20	Склад БМ3				35	39	24	28	31						
21	Склад БМ4				31	35	39	24	28						
23	Склад П1				17019	19351	21683	24015	26347						
24	Склад П2				26347	17019	19351	21683	24015						
25	Склад П3				24015	26347	17019	19351	21683						
26	Склад П4				21683	24015	26347	17019	19351						
28	Склад РШР1				665	757	849	940	1032						
29	Склад РШР2				1032	665	757	849	940						
30	Склад РШР3				940	1032	665	757	849						
31	Склад РШР4				849	940	1032	665	757						
33	Ареал 1									81	98	140	757	940	1307
34	Ареал 2									98	122	150	940	1124	1491
35	Ареал 3									122	140	175	1124	1307	1674
36	Ареал 4									175	150	122	1674	1491	1124
37	Ареал 5									140	81	98	1307	757	940

Для реальных складов – суммарный поставленный объем отдельного вида элементов верхнего строения пути p с реальной и фиктивной частей одного реального склада i во все ареалы j должен равняться его максимально возможному объему хранения:

$$\forall p \in P, \forall i \in I^r : \sum_{j=1}^J \sum_{t \in \{r,f\}} x_{ij}^{tj,p} = V_i^p. \quad (2)$$

О.2. Для реальных поставщиков i суммарный поставленный объем продукции p с фиктивной части всех реальных поставщиков должен равняться избыточному объему (избытку) этой продукции в сети.

Для реальных складов суммарный поставленный объем отдельного вида элементов верхнего строения пути p с фиктивной части всех реальных складов i во все ареалы j должен равняться избыточному объему (избытку) этого вида элементов в сети:

$$\forall p \in P : \sum_{i=1}^{I^r} \sum_{j=1}^J \sum_{t \in \{r,f\}} x_{ij}^{tj,p} = V^{rf,p}. \quad (3)$$

О.3. Для фиктивных поставщиков i суммарный поставленный объем продукции p фиктивного по-

ставщика должен равняться недостающему объему (дефициту) этой продукции в сети.

Для фиктивных складов суммарный поставленный объем отдельного вида элементов верхнего строения пути p с фиктивного склада i во все ареалы j должен равняться недостающему объему (дефициту) этого вида элементов в сети:

$$\forall p \in P, \forall i \in I^f : \sum_{j=1}^J \sum_{t \in \{r,f\}} x_{ij}^{tj,p} = V_i^{ff,p}. \quad (4)$$

О.4. Для реальных потребителей j суммарный потребляемый объем продукции $p \in M^{p+}$, поступающий на реальную и фиктивную части одного реального потребителя, должен равняться его максимально возможному объему производства (закупка, переработка, сборка, хранение, потребление) продукции p^+ с учетом коэффициента k_{pp^+} .

Для реальных ареалов суммарный объем отдельного вида элементов верхнего строения пути p , поступающий со всех складов i на реальную и фиктивную части одного реального ареала j , должен равняться его потребному объему ремонтов с учетом коэффициента k_{pp^+} :

$$\forall p^+ \in P^+, \forall p \in P \wedge p \in M^{p+}, \forall j \in J^r : \sum_{i=1}^I \sum_{t \in \{r,f\}} x_{ij}^{tj,p} = k_{pp^+} V_j^{p+}. \quad (5)$$

О.5. Для реальных потребителей j суммарный потребляемый объем продукции $p \in M^{p+}$, поступающий на фиктивную часть всех реальных потребителей, должен равняться избыточному объему (избытку) продукции p^+ в сети с учетом коэффициента k_{pp^+} .

Для реальных ареалов суммарный объем отдельного вида элементов верхнего строения пути p , поступающий со всех складов i на фиктивную часть всех реальных ареалов j , должен равняться «избыточному» объему (избытку) ремонтов в сети с учетом коэффициента k_{pp^+} :

$$\forall p^+ \in P^+, \forall p \in P \wedge p \in M^{p+} : \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J^r} \sum_{t \in \{r,f\}} x_{ij}^{tj,p} = k_{pp^+} V^{rf,p+}. \quad (6)$$

О.6. Для фиктивных потребителей j суммарный потребляемый объем продукции $p \in M^{p+}$ фиктивного потребителя должен равняться недостающему объему (дефициту) продукции p^+ в сети с учетом коэффициента k_{pp^+} .

Для фиктивного ареала суммарный объем отдельного вида элементов верхнего строения пути p , поступающий со всех складов i в фиктивный ареал j , должен равняться необеспеченному объему (дефициту) ремонтов в сети с учетом коэффициента k_{pp^+} :

$$\forall p^+ \in P^+, \forall p \in P \wedge p \in M^{p+}, \forall j \in J^f : \sum_{i=1}^I \sum_{t \in \{r,f\}} x_{ij}^{tj,p} = k_{pp^+} V_j^{ff,p+}. \quad (7)$$

О.7. Для реальных потребителей j , производящих многокомпонентную продукцию p^+ , суммарные потребляемые объемы разных видов продукции $p_v \in M^{p+}$ и $p_w \in M^{p+}$, поступающие с реальной

части реальных поставщиков на реальную часть реального потребителя, должны быть взаимосогласованы (равными) с учетом коэффициентов k_{pvp^+} и k_{pwp^+} .

Для реальных ареалов суммарные объемы разных видов элементов верхнего строения пути $p \in M^{p+}$ (балласт p_6 , плети p_n и звенья РШР p_3), поступающие с реальной части всех реальных

складов i на реальную часть реального ареала j , должны быть взаимосогласованы (равными) с учетом коэффициентов k_{pp+} :

$$\forall p^+ \in P^+, (\forall p_v \in P \wedge p_v \in M^{p+}) \wedge (\forall p_w \in P \wedge p_w \in M^{p+}) \wedge p_v \neq p_w, \forall j \in J^r : \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{I^r} \frac{x_{ij}^{rr.p_v}}{k_{p_v p^+}} = \sum_{i=1}^{I^r} \frac{x_{ij}^{rr.p_w}}{k_{p_w p^+}}.$$

О.8. Для реального промежуточного узла (потребителя или поставщика) j суммарный потребляемый объем продукции $p \in M^{p+}$, поступающий с реальной части реальных поставщиков предыдущего этапа (стадии) на реальную часть реального промежуточного узла, должен быть взаимосогласован (равным) с поставляемым ($\approx$ производимым) им объемом продукции p^+ , поступающим на реальные части реальных потребителей следующего этапа (стадии), с учетом коэффициента k_{pp+} .

Для реальных ареалов суммарный объем отдельного вида элементов верхнего строения пути p , поступающий с реальной части всех реальных складов i на реальную часть реального ареала j , должен быть взаимосогласован (равным) с объемом возвращаемых инвентарных рельсов p^+ на реальные части всех реальных звеносборочных линий (объемом старых звеньев РШР p^+ , поставляемых на реальные части всех реальных звеноразборочных линий) с учетом коэффициента k_{pp+} :

$$\forall p^+ \in P^+, \forall p \in P \wedge p \in M^{p+}, \forall j \in J^r : \sum_{i=1}^{I^r} \frac{x_{ij}^{rr.p}}{k_{pp^+}} = \sum_{l=1}^{L^r} x_{jl}^{rr.p^+}. \quad (9)$$

О.9. Объемы поставок любой продукции не должны быть отрицательными:

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall l \in L : x_{ij}^{rr.p} \geq 0, x_{ij}^{rf.p} \geq 0, x_{ij}^{fr.p} \geq 0, x_{ij}^{ff.p} \geq 0, x_{jl}^{rr.p^+} \geq 0. \quad (10)$$

Результат выполнения оптимизационной процедуры представлен в табл. 5.

По данным этой таблицы видно соблюдение всех ограничений (требований) к разрабатываемому плану:

- объемы поставки, производства (добыча, сборка, ремонт, разборка) и хранения продукции для каждого предприятия не превышают максимально возможные V^p ;

- объемы продукции на реальных частях реальных предприятий (т.е. те, которые возможно произвести и использовать) соответствуют лимитирующему звену в цепочке производства и поставки продукции. Таким лимитирующим звеном (по данным табл. 2) являются рельсосварочные предприятия, обеспечивающие плетями только 720 км ремонтов пути;

- остальные объемы продукции, соответствующие избыткам или дефицитам мощностей предприятий, распределены по фиктивным частям реальных предприятий или фиктивным предприятиям;

- объемы разных видов продукции, поступающие от поставщиков на реальную или фиктивную часть потребителя, производящего многокомпонентную (сложную) продукцию, взаимосогласованы. В частности, в ареал 1 с потребностью в ремонте в 200 км, на реальную часть поступает: 536 000 м³ балласта (53 6000/2680 = 200 км), 500 плетей (500/2,5 = 200 км) и 8000 звеньев РШР (8000/40 = 200 км);

- объемы продукции на реальных и фиктивных частях отдельного предприятия, поступающие на переработку (хранение) с предыдущего этапа (стадии) и далее поставляемые по цепочке на следующий этап (стадию), взаимосогласованы. В частности, в ареал 1 поступило элементов верхнего строения пути для выполнения 200 км ремонтов, и на такой же объем было отправлено из ареала инвентарных рельсов обратно на звеносборочные линии и звеньев старой РШР на звеноразборочные линии баз ПМС.

М.6. После выполнения оптимизационной процедуры из плана удаляются все фиктивные поставки $x_{ij}^{rf.p}$, $x_{ij}^{fr.p}$ и $x_{ij}^{ff.p}$, тем самым определяются окончательные реальные объемы производства и поставки всех видов продукции для конкретных реальных поставщиков и потребителей.

Так как поставки, связанные с фиктивными предприятиями или их фиктивными частями, в реальности не будут иметь места (востребованы), то при формировании окончательного плана они из него должны быть исключены (см. табл. 6). Соответственно, при определении окончательных суммарных расходов по плану [формула (1)] следует учесть только реально возможные поставки ($F = 22\,016\,338\,848$ руб.), с учетом ранее сделанной оговорки, что в стоимости поставок $c_{ij}^{rr.p}$ не была включена часть одинаковых расходов.

Таблица 5

План производства и поставок продукции
с учетом фиктивных поставщиков (потребителей) и фиктивных поставок $x_{ij}^{t_i t_j p}$

Потребитель / Поставщик (i)		Потребности j																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
		РСН 1	РСН 2	РСН 3	РСН Ф	ЗСЛ 1	ЗСЛ 2	ЗСЛ 3	ЗСЛ Ф	Склад БМ1	Склад БМ2	Склад БМ3	Склад БМ4	Склад БМФ	Склад П1	Склад П2	Склад П3	Склад П4	Склад ПФ	Склад РДП1	Склад РДП2	Склад РДП3	Склад РДП4	Склад РДПФ	
1	Завод Р1	15000	19200																						
2	Завод Р2	200		2400																					
3	Завод РФ				3000																				
4	Завод П1					410000		149200																	
5	Завод П2					410000		118000																	
6	Завод П3Ф						9200	46000	120000																
7	Карьер 1									100000					700000										
8	Карьер 2										600000	127000													
9	Карьер Ф											570400	110000												
10	РСН 1																	50	450						
11	РСН 2																	150	470						
12	РСН 3																	400	300						
13	РСН Ф																			100	600				
14	ЗСЛ 1																				8000			1000	
15	ЗСЛ 2																					9000		800	200
16	ЗСЛ 3																						110000		
17	ЗСЛ Ф																							9000	1000

Продолжение табл. 5

Потребитель / Поставщик	Потребности	Потребности j															
		Ареал 1	Ареал 2	Ареал 3	Ареал 4	Ареал 5	Ареал Ф	ЗСЛ 1	ЗСЛ 2	ЗСЛ 3	ЗСЛ Ф	ЗРЛ 1	ЗРЛ 2	ЗРЛ 3	ЗРЛ Ф		
		1	2	3	4	5	Ф	1	2	3	Ф	1	2	3	Ф		
18	Склад БМ1	500000															
19	Склад БМ2		260000	372400	4000	53000											
20	Склад БМ3			129600													
21	Склад БМ4	36000			664000	379400											
22	Склад БМФ					100000	80000										
23	Склад П1	400															
24	Склад П2	100	250	50		50											
25	Склад П3			325	175												
26	Склад П4				450												
27	Склад ПФ					180	600										
28	Склад РДП1	9000															
29	Склад РДП2		4000	5000													
30	Склад РДП3			1000	8000												
31	Склад РДП4				1000	800											
32	Склад РДПФ					9200	21000										
33	Ареал 1									200					200		
34	Ареал 2							100						100			
35	Ареал 3							125	25					150			
36	Ареал 4									250					250		
37	Ареал 5								5		25	250			55	50	175
38	Ареал Ф																

Таблица 6

Окончательный план реального (востребованного) производства и поставок продукции $x_{ij}^{rr,p}$

[illegible]

Заключение

Рассмотрено решение задачи производства, сборки и поставки элементов верхнего строения пути в ареалы потребления ($\approx$ участки ремонта) с учетом ее постановки, приведенной в [2], и методики решения, приведенной в [16]. Для нее изложены особенности применения многостадийной транспортной (производственно-распределительной) задачи с последовательным производством продукции. В представленном примере особо следует отметить соблюдение ключевых требований О.7 и О.8 о взаимосогласованности производства и поставок продукции, которое говорит об эффективности предложенных математической постановки и методики

решения поставленной задачи, а также отличает их от работ других авторов по данной тематике.

Рекомендованное в статье решение позволяет существенно сократить процесс вычисления, а также найти оптимальное решение с учётом поставленных ограничений за одну оптимизационную процедуру. Реализация предложенной методики решения поставленной задачи и экономическая оценка получаемых решений позволят эффективно формировать оптимальные планы производства и поставок продукции в кратко- и среднесрочной перспективе, что даст возможность снизить затраты и увеличить рентабельность всей цепочки производства и поставки продукции производственных баз ПМС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Экономико-логистическая концепция формирования долгосрочного плана работы и развития объединения путевых машинных станций / А.И. Бунин, В.А. Анисимов, В.В. Анисимов, И.Ф. Скрипачев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2013. №1 (1). С. 11–16.
2. Анисимов В.В., Сазанова Е.В. Постановка задачи оптимизации поставок продукции звенооборотных баз на участки выполнения ремонтно-путевых работ // Вестник РГУПС. 2022. № 2. С.55–65.
3. Канторович Л.В., Гавурин М.К. Применение математических методов в вопросах анализа грузопотоков // Проблемы повышения эффективности работы транспорта. Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1949. С. 110–138.
4. Frank L. Hitchcock. The distribution of a product from several sources to numerous localities // MIT Journal of Mathematics and Physics. 1941. № 20. Pp. 224–230.
5. Триус Е.Б. Задачи математического программирования транспортного типа. Москва : Советское радио, 1967. 208 с.
6. Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б. Задачи линейного программирования транспортного типа. Москва : Наука, 1969. 384 с.
7. Harold W. Kuhn. The Hungarian Method for the assignment problem // Naval Research Logistics Quarterly. 1955. № 2. Pp. 83–97.
8. Ford L.R., Fulkerson D.R. A simple algorithm for finding maximal network flows and an application to the Hitchcock problem // RAND Corporation. Santa Monica. 1955. Sept. 26. P. 743.
9. Munkres J. Algorithms for the Assignment and Transportation Problems // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1957. № 5(1). Pp. 32–38.

10. Dantzig G.B. Application of the Simplex Method to a Transportation Problem, Activity Analysis of Production and Allocation // Koopmans T.C. Ed., John Wiley and Sons. New York, 1951. Pp. 359–373.
11. Александров А.П., Лурье А.Л., Олейник Ю.А. Применение электроники вычислительных машин в оперативном планировании // Автомобильный транспорт. 1959. № 6. С. 31–35.
12. Лурье А.Л. Алгоритм решения транспортной задачи путем приближения условно оптимальными планами. Москва : Производ.-изд. комбинат ВИНТИ, 1959. 8 с.
13. Брудно А.Л. Метод дифференциальных рент Лурье для определения плана оптимальных перевозок : доклад АН СССР, 1960. Т. 131, № 6. С. 1238–1241.
14. Orden A. Transshipment problem // Management Science. 1956. № 3. С. 276–285.
15. Анисимов В.В., Сазанова Е.В. Определение средневзвешенного расстояния доставки продукции от базы до ареала // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 2(31). С. 3–7.
16. Анисимов В.В., Сазанова Е.В. Многостадийная производственно-распределительная задача // Математические заметки СВФУ. 2024. № 2. С. 99–115.
17. Meixell M.J. Gargeya, V.B. Global supply chain design: A literature review and critique. Transportation Research Part E // Logistics and Transportation Review. 2005. № 41(6). Pp. 531–550. doi:10.1016/j.tre.2005.06.003
18. Mathematical programming models for supply chain production and transport planning / J. Mula, D. Peidro, M. Diaz-Madroneo, E. Vicens // European Journal of Operational Research. 2010. Vol. 204. Pp. 377–390. doi:10.1016/j.ejor.2009.09.008
19. Cohen M.A., Lee H.L. Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks // Journal of Manufacturing and Operations Management. 1989. № 2. Pp. 81–104.
20. Global supply chain management at digital equipment corporation / B.C. Amtzen, G.G. Brown, T.P. Harison, L.L. Trafton // Interfaces. 1995. № 25. Pp. 69–93.
21. Munson C.L., Rosenblatt M.J. The impact of local content rules on global sourcing decisions // Production and Operations Management. 1997. № 6. Pp. 277–289.
22. Vidal C.J., Goetschalckx M. A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation // European Journal of Operational Research. 2001. № 129. Pp. 134–158.
23. Jozefczyk J., Filcek G. Integrated production and transportation in a class of supply networks – Deterministic and uncertain cases // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2011. № 20. Pp. 197–206.
24. Global supply chain management at digital equipment corporation / B.C. Amtzen, G.G. Brown, T.P. Harison, L.L. Trafton // Interfaces. 1995. № 25. Pp. 69–93.
25. Martel, A. The Design of Production-distribution Networks // A Mathematical Programming Approach / Geunes J., Pardalos P.M. Supply chain optimization. Springer, 2005. Pp. 265–305.
26. Таха Х.А. Введение в исследование операций. Москва : Вильямс, 2006. 912 с.
27. Федеральные единичные расценки на строительные и специальные строительные работы. Ч. 28. Железные дороги : ФЕР 81-02-28-2001 : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26 декабря 2019 г. № 876/пр. Москва : [б.и.], 2020.
28. Государственные элементные сметные нормы на ремонтно-строительные работы. Ч. 28. Железные дороги : ГЭСН 81-02-28-2022 : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26 декабря 2019 г. № 871/пр. Москва : [б.и.], 2020.
29. Отраслевые единичные расценки на строительные и специальные строительные работы Ч. 28. Железные дороги : ОЕРЖ 81-02-28-2001 : утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 14 мая 2015 г. № 1220р].
1. Ekonomiko-logisticheskaya kontseptsiya formirovaniya dolgosrochnogo plana raboty i razvitiya obyedineniya putevykh mashinnykh stantii [Economics-and-logistics strategy of creating a long-term working plan and development of integration of railway machine stations] / A.I. Bunin, V.A. Anisimov, V.V. Anisimov, I.F. Skripachev // Transport Aziatsko-Tikho-okeanskogo regiona. 2013. № 1(1). S. 11–16.
2. Anisimov V.V., Sazanova E.V. Postanovka zadachi optimizatsii postavok produktov zvenosborochnykh baz na uchastki vypolneniya remontno-putevykh rabot [An objective of the supply optimization problem of the assembly bases' products link at railway repair sites] // Vestnik RGUPS. 2022. № 2. S.55–65.
3. Kantorovich L.V., Gavurin M.K. Primeneniye matematicheskikh metodov v voprosakh analiza gruzopotokov [Application of mathematical methods in the issues of freight flow analysis] // Problemy povysheniya effektivnosti raboty transporta. Moskva ; Leningrad : Izd-vo AN SSSR, 1949. S. 110–138.
4. Frank L. Hitchcock. The distribution of a product from several sources to numerous localities, MIT Journal of Mathematics and Physics. 1941. № 20. Pp. 224–230.
5. Trius E.B. Zadachi matematicheskogo programirovaniya transportnogo tipa [Transportation-type mathematical programming problems]. Moskva : Sovetskoye radio, 1967. 208 s.
6. Golshtein E.G., Yudin D.B. Zadachi linejnogo programirovaniya transportnogo tipa [Problems of linear programming of transport type]. Moskva : Nauka, 1969. 384 s.
7. Harold W. Kuhn. The Hungarian Method for the assignment problem // Naval Research Logistics Quarterly. 1955. № 2. Pp. 83–97.
8. Ford L.R., Fulkerson D.R. A simple algorithm for finding maximal network flows and an application to the Hitchcock problem // RAND Corporation. Santa Monica. 1955. Sept. 26. P. 743.
9. Munkres J. Algorithms for the Assignment and Transportation Problems // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1957. № 5(1). Pp. 32–38.
10. Dantzig G.B. Application of the Simplex Method to a Transportation Problem, Activity Analysis of Production and Allocation // Koopmans T.C., Ed., John Wiley and Sons, New York, 1951. Pp. 359–373.
11. Aleksandrov A.P., Lurie A.L., Oleinik Yu.A. Primeneniye elektroniki vychislitel'nykh mashin v operativnom planirovanii [Application of electronics of computing machines in operational planning] // Automobil'ny transport. 1959. № 6. S. 31–35.
12. Lurie A.L. Algoritm resheniya transportnoj zadachi putem priblizheniya uslovno optimal'nyimi planami [Algorithm of the transportation problem solution by approximation by conditionally optimal plans]. Moskva : Proizvod.-izd. kombinat VINITI, 1959. 8 s.
13. Brudno A.L. Metod differentsial'nykh rent Lutie dlya

REFERENCES

- opredeleniya plana optimal'nykh perevozok [Lurie's method of differential rents for determining the optimal transportation plan] // Doklady AN SSSR, 1960. Vol. 131, № 6. S. 1238–1241.
14. Orden A. Transshipment problem // Management Science. 1956. № 3. S. 276–285.
15. Anisimov V.V., Sazanova E.V. Opredelenie srednevzveshennogo rasstoyaniya dostavki produktsii ot bazy do areala [Determining weighted average distance of products delivery from base to the range] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2022. № 2(31). S. 3–7.
16. Anisimov V.V., Sazanova E.V. Mnogostadiynaya proizvodstvenno-raspredelitel'naya zadacha [Multistage production-distribution problem] // Matematicheskie zametki SVFU. 2024. № 2. S. 99–115.
17. Meixell M.J., Gargeya, V.B.. Global supply chain design: A literature review and critique. Transportation Research Part E // Logistics and Transportation Review. 2005. № 41(6). Pp. 531–550. doi:10.1016/j.tre.2005.06.003
18. Mathematical programming models for supply chain production and transportation planning / J. Mula, D. Peidro, M. Diaz-Madronero, E. Vicens // European Journal of Operational Research. 2010. Vol. 204. Pp. 377–390. doi: 10.1016/j.ejor.2009.09.008
19. Cohen M.A., Lee H.L. Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks // Journal of Manufacturing and Operations Management. 1989. № 2. Pp. 81–104.
20. Global supply chain management at digital equipment corporation / B.C. Arntzen, G.G. Brown, T.P. Harrison, L.L. Trafton // Interfaces. 1995. № 25. Pp. 69–93.
21. Munson C.L., Rosenblatt M.J. The impact of local content rules on global sourcing decisions // Production and Operations Management. 1997. № 6. Pp. 277–289.
22. Vidal C.J., Goetschalckx M. A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation // European Journal of Operational Research. 2001. № 129. Pp. 134–158.
23. Jozefczyk J., Filcek G. Integrated production and transportation in a class of supply networks - Deterministic and uncertain cases // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2011. № 20. Pp.197–206.
24. Global supply chain management at digital equipment corporation / B.C. Arntzen, G.G. Brown, T.P. Harrison, L.L. Trafton // Interfaces. 1995. № 25. Pp. 69–93.
25. Martel A. The Design of Production-distribution Networks // A Mathematical Programming Approach / Geunes J., Pardalos P.M. Supply chain optimization. Springer. 2005. Pp. 265–305.
26. Taha H.A. Vvedeniye v issledovanie operatsiy [Introduction to Operations Research]. Moskva : Vil'yams, 2006. 912 s.
27. Federal'nye yednichnye rastsenki na stroitel'nye i spetsial'nye stroitel'nye raboty [Federal unit rates for construction and special construction works]. Ch. 28. Zheleznye dorogi : FER 81-02-28-2001 : utverzhdeny prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishno-kommunal'nogo khozyajstva Rossijskoj Federatsii ot 26 dekabrya 2019 g. № 876/pr. Moskva : [b.i.], 2020.
28. Gosudarstvennye elementnye smetnye normy na remontno-stroitel'nye raboty [State elementary estimated norms for repair and construction works]. Ch.28. Zheleznye dorogi : GESN 81-02-28-2002 : utverzhdeny prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishno-kommunal'nogo khozyajstva Rossijskoj Federatsii ot 26 dekabrya 2019 g. № 871/pr. Moskva : [b.i.], 2020.
29. Otrastlevye yednichnye rastsenki na stroitel'nye i spetsial'nye stroitel'nye raboty [Industry unit rates for construction and special construction works Ch.28. Zheleznye dorogi : OERZh 81-02-28-2001 : utverzhdeny Rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 14 maya 2015 g. № 1220 r.

Информация об авторах

В.В. Анисимов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии и системы»;
Е.В. Сазанова – старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и системы».

Information about the authors

V.V. Anisimov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Information Technologies and Systems;
E.V. Sazanova – Senior Lecturer, Department of Information Technologies and Systems;

Статья поступила в редакцию 21.06.2024; одобрена после рецензирования 14.10.2024; принята к публикации 14.10.2024.
The article was submitted: 21.06.2024; approved after reviewing: 14.10.2024; accepted for publication: 14.10.2024.

Научная статья
УДК 621.391.823

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯМ

Сидорович Максим Анатольевич¹, Пономарчук Юлия Викторовна²

^{1, 2} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

¹ msidorovich60@gmail.com

² uat@festu.khv.ru

Аннотация. Представлен метод диагностики поверхностных частичных разрядов (ПЧР) на изоляторах контактной сети с использованием радиоволнового метода. Проведен анализ отказов элементов контактной сети, который показал, что 35 % всех отказов в системах электроснабжения железных дорог связано с изоляторами. В 2023 г. они привели к задержке движения 1092 поездов и суммарной потере времени в размере 960,3 ч, что указывает на отрицательную динамику.

Разработан и экспериментально верифицирован метод локализации источников радиоволнового излучения, вызванного ПЧР в изоляторах. Эксперименты продемонстрировали, что метод позволяет точно локализовать источники с погрешностью до 8 м и не зависит от подвижного состава, соответствующего стандартам электромагнитной совместимости. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенного метода для использования в системах диагностики, что способствует повышению надежности контактной сети, а также росту пропускной способности.

Ключевые слова: частичные разряды, изоляторы контактной сети, локализация источника излучения, гектометровый диапазон (ГМБ), беспилотные летательные аппараты (БПЛА), диагностика контактной сети, локализация по уровню сигнала (RSSI)

Original article

CONTACT NETWORK DIAGNOSTICS IMPROVEMENT BY DETECTING RADIO WAVE EMISSIONS

Sidorovich Maksim A.¹, Ponomarchuk Yulia V.²

^{1, 2} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

¹ msidorovich60@gmail.com

² uat@festu.khv.ru

Abstract. The paper presents an evaluation of a method for detection of surface partial discharges (PD) on contact network insulators using a radio wave-based approach. The analysis of failures in contact network elements showed that 35 % of all failures in railway electrification systems are related to insulators. These failures in 2023 led to delays of 1,092 trains and a total downtime of 960,3 hours, indicating the negative trend.

Method for localization of sources of radio wave emissions caused by PD on insulators was developed and experimentally tested. The experiments demonstrated that the method allows for precise localization of sources with an accuracy of up to 8 meters and is not affected by rolling stock that complies with electromagnetic compatibility standards. The results confirm the potential of the proposed method for use in diagnostic systems, contributing to higher reliability of the contact network and increased throughput capacity.

Keywords: partial discharges, contact network insulators, emission source localization, hectometric band (HMB), unmanned aerial vehicles (UAV), contact network diagnostics, RSSI-based localization

Повышение интенсивности движения на Восточном полигоне российских железных дорог требует высокой надежности инфраструктуры, обеспечивающей бесперебойное движение поездов. Наличие контактной сети способствует высокой энергетической эффективности перевозочного процесса и снижению уровня загрязнения окружающей среды. Однако отсутствие резервирования делает диагностику её элементов критически важной для обеспечения надежной эксплуатации системы движения поездов. Любые сбои в работе системы электрификации могут привести к серьезным задержкам поездов и нарушению графика движения.

Правительство Российской Федерации и руководство ОАО «РЖД» осознают важность этих факторов и ставят задачи по увеличению пропускной и провозной способности Восточного полигона при поддержании высокой готовности систем контактной сети [1, 2]. Внедрение системы Комплексной автоматизированной системы учета, контроля устранения отказов технических средств и анализа их надежности (КАСАНТ) позволяет провести оценку влияния различных элементов контактной сети на отказы, приведшие к нарушению графика движения поездов (рис. 1).



Рис. 1. Причины задержек движения поездов за 2023 г.

Изоляторы контактной сети подвергаются большому количеству повреждений по сравнению с изоляторами воздушных линий из-за меньших пролетов и более сложных условий эксплуатации, включая дополнительные вибрации и загрязнения. Доля отказов, связанных со сбоями изоляторов, уже достигла 35 % в 2023 г. и продолжает увеличиваться. Всего за 2023 г. по вине изоляторов контактной сети задержано 1092 поездов на 960,26 ч. При этом по данным КАСАНТ восстановление после отказов в среднем составляет 55 мин.

На графике (рис. 2) представлена статистика количества отказов изоляторов контактной сети в разрезе места отказа: на железнодорожных станциях или перегонах за 2023 г. Выявление распределения неисправностей по железнодорожному пути является критическим для оптимизации стратегий технического обслуживания и ремонта.



Рис. 2. Количество отказов изоляторов на перегоне и станции

Таким образом, анализ данных системы учета отказов технических средств КАСАНТ показывает, что отказы изоляторов составляют значительную

часть отказов технических средств хозяйства электроснабжения как на станциях, так и на перегонах, и являются одним из факторов снижения пропускной и провозной способности Дальневосточной железной дороги.

Представленные данные позволяют сделать вывод о существенно большем количестве отказов на перегонах. Исследования методов диагностики показывают широкую номенклатуру существующих для изоляторов контактной сети [3, 4].

Методы диагностики изоляторов контактной сети и нарушений условий токосяема [4]: электрический; вихретоковый; радиоволновой; тепловой; оптический; акустический.

На железной дороге ключевым является оптический способ, который в различных реализациях применяется как в составе диагностических обходов, так и в составе вагона-измерителя контактной сети (ВИКС) при проезде для получения комплексной картины поверхностных частотных разрядов (ПЧР) на изоляторах контактной сети. Известны исследования, в которых рассмотрены подходы к диагностике ПЧР на контактной сети радиоволновым способом [5, 6]. Для диагностики неисправных изоляторов на базе вагона-измерителя предложена гибридная методика дистанционного контроля напряжения, которая позволяет определить условия для проведения диагностики изоляции; установить зависимость частоты следования акустических и электромагнитных импульсов от количества неисправных изоляторов в гирлянде, что служит диагностическим признаком [7, 8]. В исследовании [9] предложен усовершенствованный метод диагностики высоковольтной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта с использованием метода разнесенных антенн, который даёт возможность записывать радиосигналы от излучения с использованием нескольких антенн и направлен на улучшение точности локализации дефектной строки изоляторов. В работе [13] определено, что состояние изоляторов на контактных сетях железных дорог может служить причиной до 25 % всех отказов. Для диагностики состояния изоляторов предложен метод тепло-ультразвукового контроля, который позволяет обеспечить высокую точность и эффективность, снижая риски и последствия потенциальных отказов [10].

Результаты исследования подчёркивают важность развития и внедрения новых технологий для мониторинга и диагностики ключевых элементов инфраструктуры электроснабжения железнодорожного транспорта, поскольку они позволяют повысить безопасность и надёжность транспортных систем. Анализ актуальности темы, её проработки и потребностей производственного сектора позволил выдвинуть гипотезу о том, что сбор и последующая

обработка данных о радиопомехах поможет выявлять и локализовывать неисправности контактной сети. После проверки гипотезы разработана расширенная методика для применения комплекса по локализации источников радиоволнового излучения на перегоне, что обеспечивает локализацию неисправностей контактной сети с использованием БПЛА, локомотива или ВИКС на перегонах.

Применение различных платформ носителей требует одновременной унификации с целью удовлетворения различных требований к весу, габаритам и функциональным возможностям. Например, основной БПЛА, применяемый на полигоне железных дорог, – DJI MAVIC 2. Работники предприятий имеют квалификацию для выполнения полётов в соответствии с законодательством РФ. Одним из ограничений БПЛА является небольшой вес груза [11].

Для одиночной измерительной базы, которой является приемник на БПЛА, автомобиле или ВИКС, локализация проводится по методике индикации уровня принятого сигнала (RSSI) [12, 13]. Данная методика широко применяется в системах локализации внутри помещений и в тандеме с глобальной навигационной спутниковой системой (ГЛОНАСС) может быть использована для локализации источника радиоизлучения от ПЧР изоляторов в полосе отвода электрифицированных железных дорог.

Ниже представлен план эксперимента для подтверждения гипотезы о возможности локализации изолятора с ПЧР по росту уровня помех, вызванных частичным разрядом. Эксперимент также позволит собрать данные для дальнейших исследований по классификации помех. План состоит из пяти ключевых этапов.

I. Подготовка оборудования и согласование эксперимента. Этот этап включает выбор местоположения рядом с неисправными опорами контактной сети, согласование измерений с представителями ОАО «РЖД», подготовку оборудования, осмотр местности и инструктаж по технике безопасности вблизи железнодорожных путей.

II. Размещение и настройка оборудования. Включает выбор местоположения у выбранных опор контактной сети, оценку корректности настройки позиционирующего оборудования и радиоприемников.

III. Проведение эксперимента. Оценивается чувствительность системы локализации по уровню сигнала. Запускается запись уровня и спектра сигнала на частоте 2,13 МГц. Проводится наблюдение за поездами и другими потенциальными источниками радиопомех в зоне эксперимента.

IV. Анализ данных. Выполняется за пределами железнодорожного полотна. Включает просмотр записанных данных на наличие аномалий или помех. Применяются преобразование Фурье (FFT) и другие методы спектрального анализа для определения характеристик и источников помех. Сравниваются уровни помех в статичном состоянии и во время активности локомотивов и частичных разрядов.

V. Выводы о возможности и точности локализации.

Работниками ОАО «РЖД» для исследования были предоставлены номера и координаты опор контактной сети. В ходе обследования ультразвуковой аппаратурой УД-8М гирлянды изоляторов на них определены как подверженные поверхностному частичному разряду. Из перечня опор определены находящиеся в пределах доступности автомобильным транспортом. Для эксперимента был выбран участок с опорой № 348 (рис. 3).

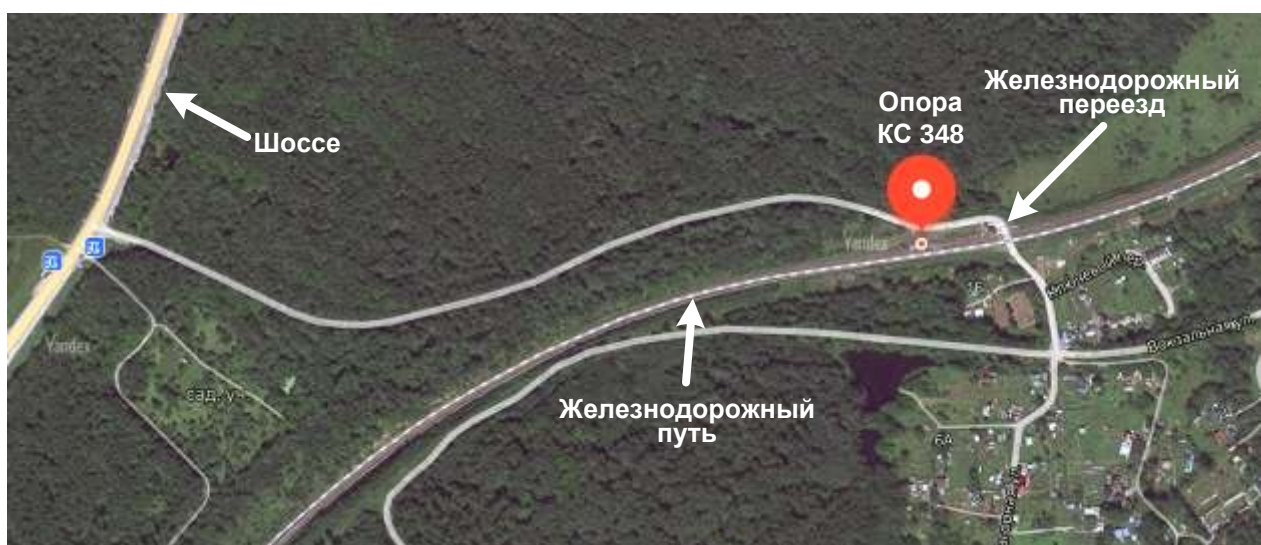


Рис. 3. Участок для проведения эксперимента

Для проведения эксперимента был использован автомобиль класса В, доукомплектованный тремя комплектами оборудования RTL-SDR, подключенными к двум ноутбукам ASUS и одному микрокомпьютеру Raspberry Pi 2B. Схема подключения оборудования представлена на рис. 4.

Опора контактной сети 348 представляет собой железобетонную опору из центрифугированного бетона для системы электрификации переменного тока 25 кВ. Она также обеспечивает переход на системы автоблокировки (рис. 5).

В ходе эксперимента учитывалась особенность оборудования с полосой пропускания в 2 МГц. Хотя

RTL-SDR не является профессиональным диагностическим или измерительным устройством, его рассматривают как основу для системы диагностики контактной сети. Поэтому важно учитывать специфику его работы. За время наблюдений прошло шесть поездов различного назначения, но они не повлияли на радиоспектр в гектометровом диапазоне (ГМВ).

Следует отметить, что выполнялись измерения показателя dBFS, который зависит от характеристик приемного устройства, поэтому для RTL-SDR формула перевода в дБм будет иметь следующий вид:

$$dBm = dBFS - 10. \quad (1)$$

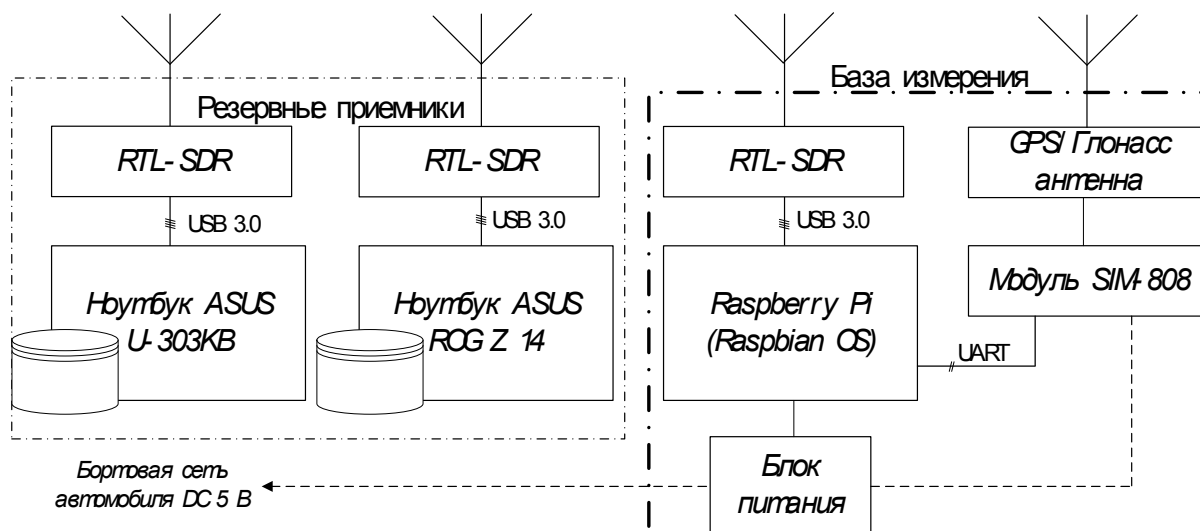


Рис. 4. Структурная схема оборудования для эксперимента



Рис. 5. Опора контактной сети 348

Анализ прохождения диагностического комплекса по подъездным путям позволяет оценить дальность и точность локализации изоляторов с частичными разрядами. В ходе анализа выявлена точка максимального уровня радиоизлучения, вызванного этими разрядами. Спектр сигнала, полученный от изолятора при ПЧР, показан на рис. 6.

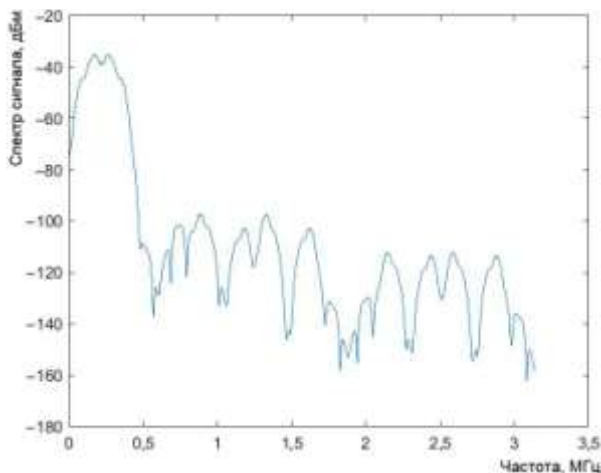


Рис. 6. Спектр сигнала от изолятора при ПЧР

Иллюстрация уровня сигнала и точек измерения, выбранных с частотой 10 м, представлена на рис. 7. Интервал в 10 м обусловлен уровнем чувствительности регистрации сигнала приемником

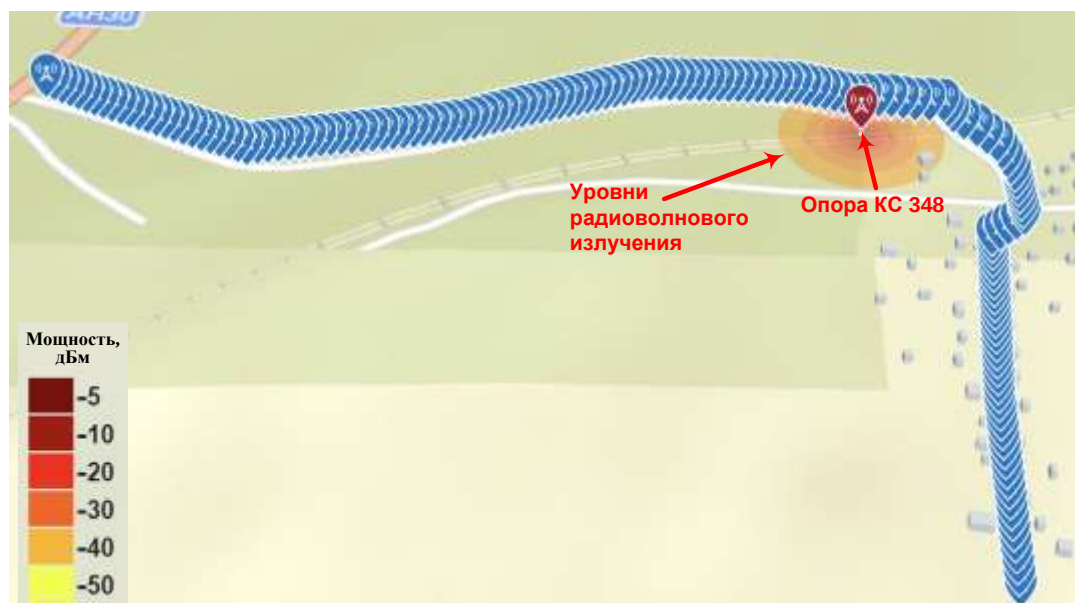


Рис. 7. Уровень радиоизлучения от изолятора контактной сети на центральной частоте 2,15 МГц

RTL-SDR. Выявлено, что минимальным расстоянием, на котором регистрируется изменение показателя уровня сигнала, составляет 8 м.

Уровень радиоволнового излучения по точкам измерения представлен на рис. 8. Таким образом, эксперимент позволяет дать оценку возможности диагностирования ПЧР на изоляторах контактной сети радиоволновым способом.

Выявлено, что поезд, в случае его соответствия стандартам по электромагнитной совместимости, не оказывает существенного влияния на уровень радиоволнового излучения от изоляторов контактной сети. Предложенный метод позволяет локализовать источник радиоволнового излучения по уровню его мощности с точностью до 8 м. Полученные результаты демонстрируют перспективность метода для дальнейшей работы с системами классификации и локализации источников радиоволнового излучения от ПЧР изоляторов и нарушений условий токосъема контактной сети. В ходе развития технологий интеллектуальных транспортных систем внедрение решений для диагностики элементов контактной сети на основе радиоволнового метода диагностики позволяет решить задачи отрасли, направленные на повышение пропускной способности железных дорог, обеспечение высокого коэффициента готовности устройств контактной сети.

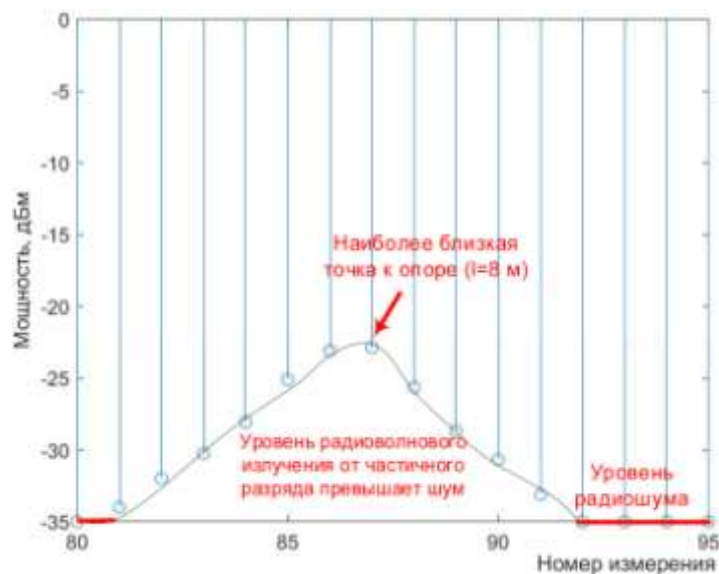


Рис. 8. Уровень сигнала радиоизлучения от изолятора контактной сети в полосе частот ГМВ ПРС

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. (Белая книга ОАО «РЖД»). URL : <http://lawru.info/dok/2010/10/26/n211197/index.htm> (дата обращения: 26.09.2024).
2. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 г. (основные положения). URL : <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104> (дата обращения: 12.01.2024).
3. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций : учебное пособие / А.И. Хальясмаа [и др.]. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 64 с.
4. ГОСТ Р 56542–2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200169346> (дата обращения: 28.09.2024).
5. Семенов Ю.Г. Структура и оптимизация параметров автоматизированной системы радиомониторинга для обнаружения режимов дугового токосъема на контактной сети // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3. С. 125–133.
6. Принципы работы автоматизированной системы диагностики токосъема для электрифицированных железных дорог / Ю.И. Жарков [и др.] // 16-я Международная научная конференция по электротехническому инженерному делу (EPE). 2015. IEEE. С. 760–763.
7. Куценко, С. М. Разработка дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта : специальность 05.14.12 «Техника высоких напряжений» : диссертация на соискание ученой степени кан-

дидата технических наук / Куценко Сергей Михайлович. Томск, 2006. 143 с. EDN NOCVOZ.

8. Метод обнаружения источника радиопомех, влияющих на поездную радиосвязь, в диапазоне 2,13 и 2,15 МГц / С.М. Куценко [и др.] // Транспорт БРИКС. 2023. № 2. С. 1–8.
9. Куценко С.М., Климов Н.Н. Диагностика высоковольтной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта методом разнесенных антенн // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Т. 760, № 1.

10. Зарипов Д.К. Методы дистанционного контроля состояния многоэлементных изолирующих конструкций электрифицированных железных дорог : дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2006. 172 с. EDN NOGVJL.
11. Чемберлин К., Любберс Р. Оценка моделей распространения Лонгли-Райса и GTD // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1982. URL : <https://dx.doi.org/10.1109/TAP.1982.1142958> (дата обращения: 28.09.2024).
12. Управляемая RSSI дальняя связь в защищенных беспилотных летательных аппаратах с поддержкой IoT / Хан Инам Уллах, Альтурки Райан, Алямани Хасан Дж. [и др.] // Mobile Information Systems. 2021. № 11.
13. Внутреннее позиционирование беспилотных летательных аппаратов на основе RSSI / Б.Р. Стоцкоска, Й. Паликрушев, К. Триводалиев, С. Калайджиски // IEEE EUROCON 2017 : 17-я Международная конференция по интеллектуальным технологиям. 2017. С. 120–125.

REFERENCES

1. Strategiya innovatsionnogo razvitiya OAO «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2015 g. (Belaya kniga OAO «RZhD») [Strategy for Innovative Development of JSC «Russian Railways» for the Period until 2015 (White Paper of JSC «RZD»)]. URL : <http://lawru.info/dok/2010/10/26/n211197/index.htm> (data obrasheeniya: 26.09.2024).
2. Strategiya razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2030 g. (osnovnye polozheniya) [Development Strategy of the Russian Railways Holding for the Period until 2030 (Main provi-

sions). URL : <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104> (data obrasheeniya: 12.01.2024).

3. Diagnostika elektrooborudovaniya elektricheskikh stantsij i podstatsij [Diagnostics of electrical equipment of power plants and substations] : uchebnoye posobiye / A.I. Khalbasmaa [et al.]. Yekaterinburg : Izd-vo Ural. Un-ta, 2015. 64 s.

4. GOST R 56542-2019. Kontrol' nerazrushayushij. Klassifikatsiya vidov i metodov [GOST R 56542-2019. Non-destructive Testing. Classification of Types and Methods]. URL :

<https://docs.cntd.ru/document/1200169346> (data obrasheniya 28.09.2024).

5. Semenov Y.G. Struktura i optimizatsiya parametrov avtomatizirovannoy sistemy radiomonitoringa dlya obnaruzheniya rezhimov dugovogo tokosyema na kontaktnoy seti [Structure and Optimization of Parameters of an Automated Radio Monitoring System for Detecting Arc Current Collection Modes on the Contact Network] // Vetrnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya. 2017. № 3. S. 125–133.

6. Printsipy raboty avtomatizirovannoy sistemy diagnostiki tokosyema dlya elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [The modes of operation of the automated current collection diagnostic system for electrified railways] / Yu.I. Zharkov [et al.] // 16-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya po elektricheskemu i enzhinernomu delu (EPE). 2015. IEEE. Pp. 760–763.

7. Kutsenko S.M. Razrabotka distantsionnoy diagnostiki lineynoy izolyatsii kontaktnoy seti zheleznodorozhnogo transporta [Development of remote diagnostics of linear insulation of the contact network of railway transport] : dis. kand. tekhn. nauk. Tomsk, 2006. 143 p. EDN NOCVOZ.

8. Metod obnaruzheniya istochnika radiopomekh, vliyayushikh na poyezdnuyu radiosvyaz' v diapzone 2,13 i 2,15 MHz [Method for detecting the source of radio interference affecting train radio communication in the band of 2,13 and 2,15 MHz] / S.M. Kutsenko [et al.] // BRICS transport. 2023. № 2. P. 1–8.

9. Kutsenko S.M., Klimov N.N. Diagnostika vysokovol'noy izolyatsii kontaktnoy seti zheleznodorozhnogo transporta

metodom raznesennykh antenn [Diagnostics of high-voltage insulation of the railway transport overhead system by the method of spaced antennas] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 760, № 1.

10. Zaripov D.K. Metody distantsionnogo kontrolya sostoyaniya mnogoelementnykh izoliruyushikh konstruktсий elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [Methods for remote control of the condition of multi-element insulating structures of electrified railways] : dis. kand. tekhn. nauk. Kazan, 2006. 172 s. EDN NOGVJL.

11. Chamberlin K., Luebbers R. Otsenka modelej pasprostraneniya [An Evaluation of Longley-Rice and GTD Propagation Models [Electronic resource] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1982. URL : <https://dx.doi.org/10.1109/TAP.1982.1142958> (data obrasheniya 28.09.2024).

12. Upravlyayemaya RSSI dal'nyaya svyaz' v zashishennykh bezpilotnykh letatel'nykh apparatakh s podderzhkoj IoT [RSSI-controlled long-range communication in secured IoT-enabled unmanned aerial vehicles] / Khan Inam Ullah, Alturki Ryan, Alyamani Hasan J. [et al.] // Mobile Information Systems. 2021. № 11.

13. Vnutrennee pozitsionirovaniye bezpilotnykh letatel'nykh apparatov na osnove RSSI [Indoor localization of unmanned aerial vehicles based on RSSI] / B.R. Stojkoska, Yi. Palikrushev, K. Trivodaliev, S. Kalajdziski // IEEE EUROCON 2017 : 17-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya po intellektual'nym tekhnologiyam. 2017. S. 120–125.

Информация об авторах

М.А. Сидорович – преподавателем кафедры «Автоматика, телемеханика и связь»;

Ю.В. Пономарчук – кандидат физико-математических наук, доцент «Информационные технологии и системы».

Information about the authors

M.A. Sidorovich – Lecturer at the Department of Automation, Telemechanics and Communications;

Y.V. Ponomarchuk – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Information Technologies and Systems.

Статья поступила в редакцию 30.09.2024; одобрена после рецензирования 02.10.2024; принята к публикации 14.10.2024.

The article was submitted: 30.09.2024; approved after reviewing: 02.10.2024; accepted for publication: 14.10.2024.

Научная статья
УДК 624.131

ПРИРОДНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ В ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

Федоренко Евгений Владимирович

НИИП-Информатика, Санкт-Петербург, eugeniy.Fedorenko@nipifor.ru

Аннотация. Показана необходимость учета природного напряженного состояния (ПНС) при выполнении расчетов осадки, консолидации и устойчивости дорожных насыпей. Используемые на практике методы, внедренные в нормативные документы, предназначены в первую очередь для выполнения расчетов вручную, что предопределяет необходимость упрощения и принятия допущений. На примере деформационного поведения грунта показано влияние природного напряженного состояния на расчетную осадку. В общем виде приведен принцип выполнения геотехнических расчетов, заключающийся в учете влияния природного напряженного состояния через распределение напряжений и построение траекторий нагружения на основные результаты геотехнической оценки. Такой подход обеспечивает экономическую целесообразность проектных решений и легко встраивается в концепцию информационного моделирования.

Ключевые слова: геотехнические расчеты; МКЭ; численное моделирование; геотехника; напряженное состояние; модели грунтов

Original article

INITIAL STRESS STATE IN GEOTECHNICAL ANALYSES

Fedorenko Evgeniy V.

NIP-Informatika, St-Petersburg, eugeniy.Fedorenko@nipifor.ru

Abstract. The article shows the need to consider the initial stress state when calculating contraction, consolidation and stability of road embankments. The methods used in practice, implemented in standards, are intended primarily for performing hand-calculations, which predetermines the need for simplification and acceptance of assumptions. The influence of the initial stress state on the calculated contraction is shown by the example of the deformation behavior of the soil. In general, the principle of geotechnical calculations is given, which consists in considering the influence of the initial stress state through the distribution of stresses and the construction of stress path on the results of geotechnical analyses. This approach ensures the economic feasibility of design solutions and is easily integrated into the concept of numerical modeling.

Keywords: geotechnical analysis; FEM; numerical modeling; geotechnics; stress state; soil models

Введение

В инженерной практике принято вести расчет осадки сооружения, рассматривая фрагмент нелинейной зависимости между напряжениями и деформацией путем замены криволинейного очертания прямолинейным для небольшого диапазона изменения напряжений. Уравнение спрямленного участка (касательная) нелинейной зависимости, например компрессионной кривой имеет вид [1]:

$$e = m_0 \sigma + b, \quad (1)$$

где e – коэффициент пористости; m_0 – коэффициент сжимаемости, определяемый для диапазона действующих напряжений по компрессионной кривой; σ – опорное напряжение, общее для касательной и нелинейной зависимости; b – отрезок, отсекаемый касательной на оси ординат.

Уравнение (1) справедливо для одномерной задачи. Переходя к плоской постановке, можно записать:

$$e = m_0 \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{1 + 2K_0} + b, \quad (2)$$

где $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ – главные напряжения; K_0 – коэффициент бокового давления в состоянии покоя.

Как отмечает П.Л. Иванов [1], зависимость (2) справедлива для условий невозможности бокового расширения, и ее распространение на любое другое напряженное состояние связано с введением серьезного допущения, названного Н.М. Герсевановым принципом гидроемкости.

Это допущение состоит в том, что изменение пористости грунта зависит только от суммы напряжений в скелете, но не зависит от их соотношения. Соотношение напряжений в грунтовой массе в зависимости от начальной плотности может оказывать существенное влияние на изменение коэффициента пористости, следовательно, и на расчет осадки. Принятое допущение значительно облегчает решение многих практических задач, в том числе расчетов сооружений на слабых основаниях.

Преимущество такого подхода заключается в его

простоте для использования в ручном счете, но оно же является и недостатком. С одной стороны, нет необходимости производить оценку природного напряженного состояния и учитывать его в расчетах, а с другой – это требует специального анализа результатов испытаний и выбора механических характеристик грунтов таким образом, чтобы они косвенно учитывали сложившееся состояние массива. Как подчеркивает П.Л. Иванов, это означает, что принятие такой гипотезы требует в каждом конкретном случае обоснования экспериментами и оценку возможной погрешности ее использования [1]. Выражается это в необходимости: во-первых, определять напряженное состояние под сооружением еще на стадии изысканий для того, чтобы правильно сформировать нагрузки в приборах грунтовой лаборатории, а, во-вторых, в зависимости от расчетного диапазона напряжений, выбирать соответствующую линейную зависимость, более близко описывающую фрагмент нелинейной общей зависимости. Последнее часто приводит к необходимости дополнительного деления слоев для возможности применения к ним линейного закона сжимаемости. Однако на практике [2] ситуация сложилась таким образом, что это выполняется редко, в нормативных документах данный подход не отражен, а грунтовые лаборатории выдают модули деформации, как правило, в диапазоне 100–300 кПа, без привязки к расчетным напряжениям. При этом источники теоретических предпосылок расчетов дорожных насыпей [3, 4] предписывают выполнять расчеты осадки на основании коэффициента пористости (как принято в железнодорожной отрасли) или на основании модуля осадки (как принято в автодорожной отрасли), однако, подход, основанный на использовании для расчетов модуля деформации, получил очень широкое распространение, по-видимому, благодаря развитию специализированных программ, оперирующих модулем деформации. Недостатком подхода к определению деформационных параметров грунтов без учета влияния природного напряженного состояния на основании допущения Н.М. Герсевича является, прежде всего, трудоемкость и сложность полной автоматизации процесса получения и передачи исходных данных для геотехнического расчета. Это существенный недостаток для формирования информационных моделей и систем автоматизированного проектирования.

Следует отметить, что предлагаемый в нормативных документах по автодорожному проектированию [5] принцип расчета осадки в большей степени пригоден для торфяных оснований, для которых изначально и разрабатывалась методика расчета [3]. Здесь наиболее явно прослеживается пренебрежение природным напряженным состоянием, выраженное в том, что осадка от собственного веса грунта природного сложения (до отсыпки насыпи) учитывается в общей осадке сооружения, что в какой-то степени может быть оправдано только для торфяных грунтов. Для минеральных грунтов разной степени литификации этот подход приводит

к существенным завышениям осадки и избыточному объему привозного грунта.

1. Природное напряженное состояние грунтового массива

Для решения геотехнических задач наиболее подходящим является метод конечных элементов, который благодаря возможностям современных программ обеспечивает учет большого количества различных факторов и снижает влияние допущений и упрощений, присущих расчетам вручную [6]. Одной из важных особенностей МКЭ является возможность использования сложных комплексных геомеханических моделей грунтов, разделяющих упругие и упругопластические деформации через параметры напряженного состояния. Однако существует практическая проблема – отсутствие методов учета этих параметров в моделях и геотехнических расчетах.

Природное напряженное состояние (ПНС) определяется действующим σ'_v и историческим (давление предварительного уплотнения σ_p по [7]) вертикальными эффективными напряжениями и коэффициентом бокового давления в состоянии покоя K_0 . Если бытовое (от собственного веса) напряжение σ'_v менее исторического σ_p , то грунт переуплотнен, т.е. он испытывал в прошлом давление, превышающее действующее в настоящее время. Показатель степени переуплотнения – коэффициент OCR [8, 9], определяется отношением σ_p/σ'_v .

Ранее действующее напряжение, которое могло быть создано внешним воздействием, например, ледником, размывтой эрозией возвышенностью и т.п., называется историческим. Вес, ранее действовавший на грунт, в численном моделировании принято определять параметром моделей грунтов POP (давление вышерасположенной толщи). Коэффициент переуплотнения OCR и параметр POP связаны между собой зависимостью [10]

$$OCR = \frac{POP}{\sigma'_v} + 1,$$

где OCR – коэффициент переуплотнения; POP – историческое давление на грунтовую толщу; σ'_v – эффективные бытовые напряжения.

Для геотехнического анализа важно распределение параметров напряженного состояния по глубине. Использование при численном моделировании в моделях грунта двух схожих параметров переуплотненного состояния OCR и POP оправдано существенной разницей их влияния на начальное напряженное состояние в расчетной схеме. На рис. 1 показаны варианты распределения степени переуплотнения по глубине массива. Вариант распределения коэффициента переуплотнения по глубине 5 (рис. 1, б) чаще встречается в грунтовых массивах и связан с большей степенью переуплотнения в верхней части геологического разреза (зона аэрации, колебаний грунтовых вод, большего влияния эрозионных и денудационных процессов).

а

б

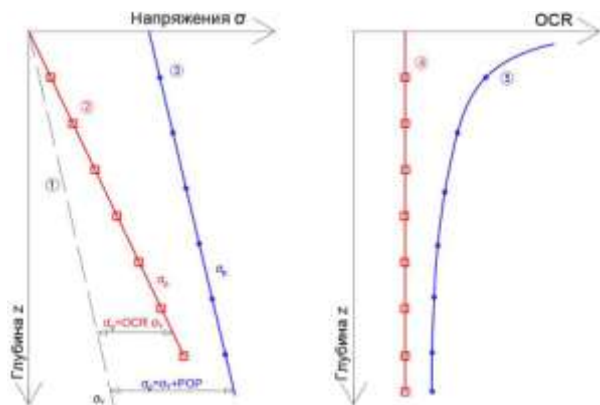


Рис. 1. Параметры природного напряженного состояния в виде эпюр по глубине: a – бытового 1 и двух вариантов исторических напряжений 2, 3; b – коэффициента переуплотнения OCR: 4 – для варианта напряжений 2; 5 – для варианта напряжений 3

Кроме указанных причин возникновения переуплотненного состояния, выделяют деформационное упрочнение, связанное с процессами ползучести в слабых водонасыщенных глинистых грунтах, на которые не действовали факторы, приведенные выше. В этом случае наведенное переуплотнение может определяться с помощью эквивалентного параметра POP . Это означает, что проявляемую грунтом степень переуплотнения в численном моделировании можно искусственно создавать, используя эквивалентный параметр POP или OCR для достижения сходимости результата моделирования природного сложения с профилем измерения переуплотнения по глубине в грунтовом массиве.

В случае наличия переуплотнения природное напряженное состояние определяется эпюрой давления предуплотнения σ_p , которая заменяет эпюру бытовых напряжений. Поскольку $\sigma_p > \sigma'_v$, то это приводит к изменению величины сжимаемой толщи, а следовательно, осадки и времени консолидации. Кроме того, переуплотнение состояние повышает сопротивление грунтов сдвигу и устойчивость сооружения.

2. Методология учета природного напряжен-

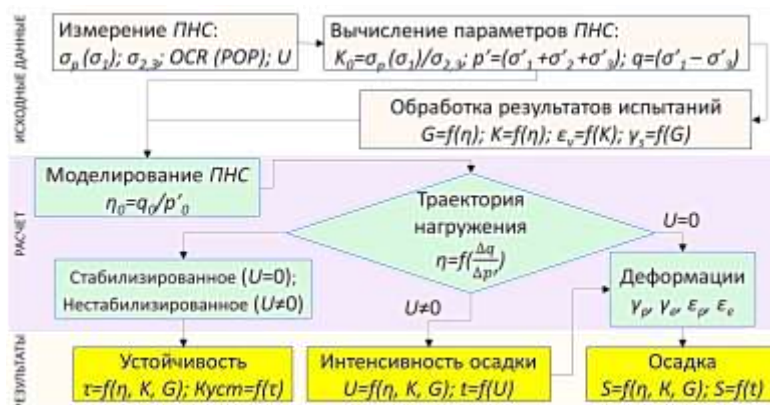


Рис. 2. Последовательность выполнения основных геотехнических расчетов с учетом ПНС

ного состояния в расчетах

Основная суть учета влияния ПНС на результаты расчетов в общем виде показана на рис. 2. В дальнейших рассуждениях вместо вертикальных σ'_v и горизонтальных σ'_h напряжений рассматриваются главные напряжения σ'_1 и $\sigma'_2 = \sigma'_3$ для условий трехосного сжатия.

Получение исходных данных заключается в следующей последовательности.

1. Определение полевыми и лабораторными методами природного напряженного состояния в виде коэффициента бокового давления K_0 , коэффициента переуплотнения OCR ; давления вышерасположенной толщи или ее эквивалента в виде параметра POP ; давления предварительного уплотнения (историческое) σ_p . При этом если грунт нормально уплотненный, то принимается $\sigma_p = \sigma_1$ и $OCR = 1$, а если переуплотненный, то $\sigma_p > \sigma_1$ и $OCR = \sigma_p/\sigma_1$.

2. На основании принятых величин вертикальных напряжений (σ_p и σ_1) и коэффициента бокового давления в состоянии покоя K_0 определяются меньшие главные напряжения σ_3 . Далее вычисляются среднее напряжение p , девиаторное напряжение q и их соотношение $\eta = q/p$.

3. Кроме параметров напряженного состояния, необходимо получить отклик грунта на механические воздействие в виде паспорта грунта (по Зарецкому) [11, 12]. В общем виде он должен содержать зависимость модуля сдвига G от напряженного состояния, полученную на основании зависимостей сдвиговых деформаций γ_s от касательных напряжений, и зависимость модуля объемной деформации K от напряженного состояния, полученную на основании зависимостей объемных деформаций ϵ_v от нормальных напряжений. Эти зависимости могут быть в виде компрессионных кривых, кривых трехосных испытаний при различных уровнях напряжений и других испытаниях. Испытания выполняются по нормативным документам (серия ГОСТ 12248.X-2020), но требуют специальную обработку и интерпретацию для получения параметров принятых моделей грунта.

После анализа и подготовки исходных данных производится расчет. Численное моделирование всегда начинается с фазы расчета, определяющей отправную точку: начальное состояние расчетной схемы или природное напряженное состояние грунтового массива. Все модели грунтов можно разделить на две группы: те, которые имеют параметры для задания природного напряженного состояния и могут его учесть; и те, которые не имеют и не учитывают.

Пользующаяся популярностью упругопластическая модель Мора–Кулона не позволяет задавать параметры природного напряженного состояния, для ее использования необходимо косвенно учесть ПНС в параметрах жесткости и прочности. Однако отсутствие зависимости жесткости от уровня напряжений делает применение этой модели нецелесообразным и требует оценки результатов на предмет их надежности.

Широкий класс моделей основан на созданной в середине прошлого века модели CamClay, обладающей изменяемой поверхностью нагружения, что позволяет учесть природное напряженное состояние. Для удобства обычно используются инвариантные параметры

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)}{3};$$

$$q = (\sigma'_1 - \sigma'_3),$$

где p' – среднее напряжение; q – девиатор напряжений.

Инварианты являются мерой напряжений, не зависящих от ориентации системы координат. Согласно схеме, приведенной на рис. 3, для природного напряженного состояния отношение $\eta_0 = q_0/p_0$ определяет исходную точку А начала траектории напряжений. На основании выбранного для расчета определяющего уравнения математической модели грунта устанавливаются параметры расчета: поверхность нагружения (текучести), разделяющая области упругого и деформационного (упругопластического) поведения [13–16].

Согласно теории критического состояния [13, 14] приняты следующие параметры напряженного состояния для условий трехосного сжатия.

1. Наклон линии критического состояния (ЛКС)

$$M = \frac{6 \sin \varphi_{cv}}{3 - \sin \varphi_{cv}},$$

где φ_{cv} – угол трения при критической пористости.

2. Начальная точка на плоскости инвариант напряжений p – q определяется координатами:

$$p_0 = \frac{1 + 2K_0^{hy}}{3} \sigma_p;$$

$$q_0 = (1 - K_0^{hy}) \sigma_p,$$

где p_0 – среднее напряжение, определяющее природное напряженное состояние отрезком на оси абсцисс; K_0^{hy} – коэффициент бокового давления в состоянии покоя; σ_p – давление предварительного уплотнения; q_0 – девиаторное напряжение, определяющее природное напряженное состояние отрезком на оси ординат.

Изотропное давление предварительного уплотнения p'_p может быть выражено через бытовые эффективные напряжения как

$$p'_p = (\sigma'_{v0} + POP) \left[\frac{1 + 2 K_0^{hy}}{3} \right].$$

На рис. 3 в точке А показано природное напряженное состояние для нормально уплотненного состояния.

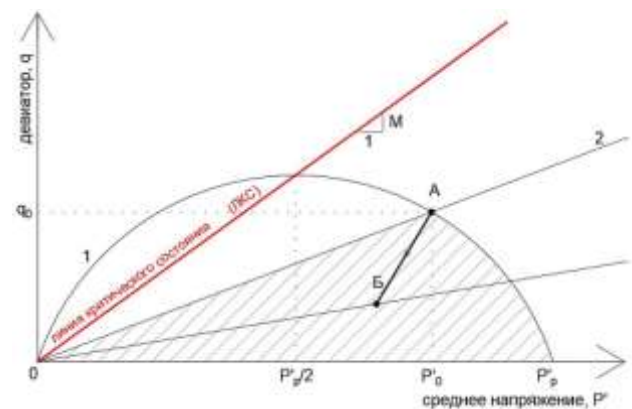


Рис. 3. Пространство инвариант напряжений p – q :
1 – шатровая поверхность нагружения (текучести);
2 – поверхность текучести – равные сдвиговые деформации

Эллипс шатровой поверхности 1 (рис. 3) определяет равные деформации объема при всех сочетаниях p и q , лежащих на линии, и является поверхностью нагружения, разделяющей упругие и упругопластические деформации объема. Максимальное значение девиатора q на линии 1 определяется наклоном M линии критического состояния (ЛКС) и абсциссой $p'_p/2$. Линия 2 определяет равные сдвиговые деформации и является поверхностью нагружения, разделяющей упругие и упругопластические деформации сдвига.

Точка Б (рис. 3) соответствует переуплотненному состоянию. Для примера рассмотрен случай разгрузки, и траектория напряжений показана линией АБ. В таком случае вертикальные бытовые напряжения соответствуют весу рассматриваемой толщи грунта, исторические напряжения в виде давления предварительного уплотнения определяют действовавшие ранее от внешнего воздействия, информация о котором «сохраняется» в горизонтальных напряжениях [17]. Главные напряжения σ'_3 могут быть выражены через параметры ПНС:

$$\sigma'_3 = K_0^{\text{ну}} \sigma_p - \frac{v_{ur}}{1 - v_{ur}} POP,$$

где v_{ur} – коэффициент поперечной упругой деформации.

Точка Б находится внутри шатровой поверхности нагружения (текучести), в пределах которой деформации считаются квазиупругими. Последующее увеличение нагрузки более предела текучести, выраженное в виде пересечения траекторией нагружения линии 1 (см. рис. 3), приводит к задействию в расчете не упругих характеристик жесткости (модуль упругости), а деформационных (модуль деформации).

В зависимости от заданного режима нагружения в ходе расчета производится построение траектории напряжений, которая может иметь различную форму и является функцией параметра напряженного состояния η от действующих эффективных напряжений. Траектория напряжений позволяет на основании введенной информации об отклике грунта на механическое воздействие (в общем виде: $G = f(\eta)$; $K = f(\eta)$) получить деформации изменения объема ϵ_v и изменения формы γ . В зависимости от положения точки напряженного состояния относительно поверхности нагружения деформации получаются упругими или упругопластическими (остаточными).

Таким образом, основные результаты расчетов по двум предельным состояниям оказываются зависимыми от природного напряженного состояния грунтового массива – прежде всего через действующие напряжения, выраженные функциями от параметра текущего напряженного состояния η .

Для оценки устойчивости конечным результатом является коэффициент устойчивости $K_{\text{уст}}$, который зависит от эффективных напряжений. Для численной модели – это плоское или пространственное напряженное состояние в каждой точке каждого конечного элемента, выраженное в общем виде через функции

$$\tau = f(\eta); K_{\text{уст}} = f(\tau),$$

где τ – касательные напряжения.

Следует отметить, что и параметры прочности существенно зависят от природного напряженного состояния и требуют учета ПНС не только в расче-

тах, но и при проведении испытаний и интерпретации результатов [18].

Расчеты осадки S и времени ее реализации также связаны с напряженным состоянием и определяются функциями вида

$$U = f(\eta); t = f(U); S = f(\eta),$$

где U – избыточное поровое давление; t – время консолидации.

Выводы

Сложное напряженное состояние под подошвой насыпи определяется не только условиями компрессионного сжатия (как это принято в нормативных документах), но и областями, в которых преобладают сдвиговые деформации, а модуль деформации с ростом напряжений снижается. Это обстоятельство приводит к необходимости учитывать в расчетах и модуль объемного сжатия K , и модуль сдвига G , причем не как константы, а как функции от действующих напряжений.

Природное напряженное состояние, сложившееся за исторический период накопления осадка, часто имеет неоднородность, выражающуюся в уплотнении приповерхностной части грунтового разреза и приводящую к отклонению от гидростатического закона распределения напряжений. Таким образом, напряженное состояние грунтового массива определяет его последующую реакцию на нагружение в виде насыпи.

Традиционный подход к расчетам, внедренный в нормативные документы, пренебрегает учетом природного напряженного состояния и, как правило, приводит к завышению осадки и времени консолидации. Это, в свою очередь, требует расходов на сокращение сроков консолидации и лишних привозных грунтов для компенсации завышенной осадки насыпи.

Предлагаемый способ учета природного напряженного состояния заключается в определении компонент напряжений (σ_p и K_0) и параметров переуплотнения (OCR , POP), которые учитываются при определении исходного напряженного состояния и его изменения (приращения напряжений), а также в отклике грунта на механическое воздействие, представленном, например, в виде паспорта грунта.

Такой подход обеспечивает повышение эффективности и экономической целесообразности проектных решений без снижения надежности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений : учебник для гидротехнических специальностей вузов. Москва : Высшая школа, 1985. 352 с.
2. Вавринюк Т.С., Федоренко Е.В. Результаты инженерных изысканий, как основа для расчетов транспортных сооружений // Инженерные изыскания. 2014. № 3. С. 46–49.
3. Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. Москва : Транспорт, 1976. 271 с.
4. Шахунянц Г.М. Земляное полотно железных дорог. Москва : Трансжелдориздат, 1953. 828 с.
5. Пособие по проектированию автомобильных дорог на слабых грунтах. Москва : Стройиздат, 2004. 191 с.
6. Кудрявцев С.А., Склярова К.М. Натурные наблюдения и численное моделирование строительства высотного здания на плитном фундаменте в г. Хабаровске // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2(38).
7. ГОСТ Р 58326-2018 Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения. Москва : СтандартИнформ, 2009. 17 с.

8. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* // Минстрой России. 2016. 228 с.

9. СП 23.13330.2018 Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 // Минстрой России. 2018. 102 с.

10. ОДМ 218.3.120-2020 Методические рекомендации по расчету насыпей автомобильных дорог на слабых грунтах основания с применением геосинтетических материалов. ФДА (Росавтодор), 90 с.

11. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. Ростов-на-Дону : Изд-во Ростовского университета, 1989. 608 с.

12. ГОСТ 12248-96 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. Москва : СтандартИнформ, 1997. 61 с.

13. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. Москва : Недра, 1987. 221 с.

нике. Москва : Недра, 1987. 221 с.

14. Федоровский В.Г. Современные методы описания механических свойств грунтов : обзор. Москва : ВНИИИС, 1985. 73 с.

15. Строкова Л.А. Определение параметров численного моделирования поведения грунтов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313, № 1. С. 69–74.

16. Пеньков Д.В., Федоренко Е.В. К вопросу получения исходных данных для модели грунта Hardening Soil // Грунтоведение. 2020. № 2(15). С. 19–29.

17. Васенин В.А. Метод определения давления переуплотнения на основе статистических зависимостей распределения индекса компрессии. Ч. 1. Обоснование метода // Инженерная геология. 2019. Т. 14, № 3.

18. Федоренко Е.В. Интерпретация результатов испытаний прочностных характеристик грунтов // Грунтоведение. 2023. № 1(20). С. 34–47.

REFERENCES

1. Ivanov P.L. Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [Soils and bases of hydrotechnical structures] : uchebnik dlya gidrotekhnicheskikh spetsial'nostej vuzov. Moskva : Vysshaya shkola, 1985. 352 s.

2. Vavrinyuk T.S., Fedorenko E.V. Rezul'taty inzhenernykh izyskanij, kak osnova dlya raschetov transportnykh sooruzhenij [Results of engineering surveys as the basis for calculation of transport structures] // Inzhenernye izyskaniya. 2014. № 3. S. 46–49

3. Evgenyev I.E., Kazarnovsky V.D. Zemlyanoe polотно avtomobil'nykh dorog na slabyyh gruntah [Road bed of motor roads on weak soils]. Moskva : Transport, 1976. 271 s.

4. Shahunyanc G. M. Zemlyanoe polотно zheleznykh dorog [Railroads bed] Moskva : Transzheldorizdat, 1953. 828 s.

5. Posobie po proektirovaniyu avtomobil'nykh dorog na slabyyh gruntakh. Moskva : Strojizdat, 2004. 191 s.

6. Kudryavtsev S.A., Sklyarova K.M. Naturnye nablyudeniya i chislennoe modelirovanie stroitel'stva vysotnogo zdaniya na plitnom fundamente v g. Khabarovske [Full-scale observations and numerical modeling of construction of a many storeyed building on slab foundation in Khabarovsk] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. 2013. № 2(38).

7. ГОСТ R 58326-2018 Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения [ГОСТ R 58326-2018. Soils. Method of laboratory determination of over-condensation parameters]. Moskva : StandartInform, 2009. 17 s.

8. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* [SP 22.13330.2016 Bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83*] // Минстрой России 2016. 228 с.

9. СП 23.13330.2018 Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 [SP 23.13330.2018 Bases of hydrotechnical structures. Updated version of SNiP 2.02.02-85] // Минстрой России 2018. 102 с.

10. ОДМ 218.3.120-2020 «Методические рекомендации по расчету насыпей автомобильных дорог на слабых грунтах

osnovaniya s primeneniem geosinteticheskikh materialov [ODM 218.3.120-2020 Methodological recommendations on calculation of motor roads embankments on weak base soils with application of geosynthetic materials]. FDA (Rosavtodor), 90 s.

11. Zarecky Yu.K. Lektsii po sovremennoj mekhanike gruntov [Lectures on modern mechanics of soils]. Rostov-na-Donu. Izd-vo Rostovskogo universiteta, 1989. 608 s.

12. ГОСТ 12248-96 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости [ГОСТ 12248-96 Soils. Methods of laboratory determination of strength and deformability]. Moskva : StandartInform, 1997. 61 s.

13. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Finite element method in geomechanics]. Moskva : Nedra, 1987. 221 s.

14. Fedorovsky V.G. Sovremennye metody opisaniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. [Modern methods of description of mechanic characteristics of soils] : obzor. Moskva : VNIIS, 1985. 73 s.

15. Strokov L.A. Opredelenie parametrov chislenno modelirovaniya povedeniya gruntov [Determining of parameters of numerical modeling of soils' behaviour] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2008. Vol. 313, № 1. S. 69–74.

16. Pen'kov D.V., Fedorenko E.V. K voprosu polucheniya iskhodnykh dannykh dlya modeli grunta Hardening Soil [To the issue of obtaining initial data for soil model Hardening Soil] // Gruntovedenie. 2020. № 2(15). S. 19–29

17. Vasenin V.A. Metod opredeleniya davleniya pereuplotneniya na osnove statisticheskikh zavisimostey raspredeleniya indeksa kompressii. Ch. 1. Obosnovanie metoda [Method of determining over-condensation pressure on the basis of statistical dependences of distribution of compression index] // Inzhenernaya geologiya. 2019. Vol. 14, № 3.

18. Fedorenko E.V. Interpretatsiya rezul'tatov ispytaniy prochnostnykh kharakteristik gruntov [Interpretation of results of testing strength characteristics of soils] // Gruntovedenie. 2023. № 1(20). S. 34–47.

Информация об авторе

Е.В. Федоренко – кандидат геолого-минералогических наук, научный консультант.

Information about the author

E.V. Fedorenko – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Scientific Adviser.

Статья поступила в редакцию 11.09.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.
The article was submitted: 11.09.2024; approved after reviewing: 17.10.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

ПОРЯДОК ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ТРАНСПОРТ АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА»

1. Рассмотрение работ аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук, магистрантов, студентов осуществляется только при **наличии рекомендации научного руководителя**.

2. Статья представляется в редакцию на русском языке в электронном виде как файл «Microsoft Word» (по эл. почте: arg-journal-ed@list.ru). **Статья оформляется согласно ГОСТу Р 7.07–2021.**

3. Обязательная структура статьи:

- код УДК;
- фамилия, имя, отчество автора (ов);
- название статьи на **русском и английском** языках;
- аннотация об актуальности и новизне темы статьи, главных содержательных аспектах (120–150 слов) на **русском и английском** языках;

• ключевые слова по содержанию статьи (8–10 слов или словосочетаний) на **русском и английском** языках. Каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой;

- текст статьи;
- список источников.

4. К рукописи статьи прилагаются сведения об авторе (ах) на русском и английском языках, включающие:

- фамилию, имя, отчество полностью;
- полное название организации в именительном падеже, город;
- адрес организации с указанием почтового индекса;
- ученую степень и ученое звание (если имеются);
- адрес электронной почты;
- телефоны для контактов;
- корреспондентский почтовый адрес.

Сведения об авторе (ах) представляются в редакцию в электронном виде как отдельный файл «Microsoft Word» (по электронной почте).

5. Поля страницы: верхнее – 2 см; нижнее – 2 см; левое – 3 см; правое – 1 см; размер бумаги – А4 (210×297 мм); шрифт – «Times New Roman» № 14; подрисовочная надпись – 12 кегль; межстрочный интервал – 1,5.

6. Обязательным является наличие **экспертного заключения** о возможности опубликования.

7. Название статьи должно четко отражать ее содержание, быть информативным, не должно включать непереводимый сленг, известный только русскоговорящим специалистам.

В переводе названия статьи на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводимых названий собственных имен и других объектов.

8. Авторская аннотация призвана выполнять функцию независимого от статьи источника информации.

Аннотация является точным изложением содержания статьи, включающим основные фактические сведения и выводы, без дополнительной интерпретации или критических замечаний автора статьи. Аннотация не должна содержать информацию, которой нет в статье. Включение в аннотацию схем, таблиц, графиков и рисунков не допускается.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. В тексте аннотации следует применять стандартизованную терминологию. Сокращения и аббревиатуры в тексте аннотации не допускаются.

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов), оригинальной и содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований).

Желательно, чтобы аннотация включала в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, тему, цель работы; метод или методологию проведения работы; основные результаты работы; область применения результатов; выводы.

9. Ключевые слова или словосочетания – это текстовые метки, представляющие содержание статьи, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста. Поэтому при подборе ключевых слов или словосочетаний следует перечислить основные термины, используемые в статье.

10. Поступившие рукописи в обязательном порядке проходят **слепое рецензирование**. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала на основании следующего: положительной рецензии; соответствия представленных материалов тематической направленности журнала; научной значимости, актуальности.

Рукопись, получившая отрицательные отзывы, отклоняется и не возвращается.

Нуждающаяся в доработке статья направляется автору вместе с замечаниями рецензента. Автор должен учесть все замечания и внести изменения, указав место, в электронный вариант текста, после чего статья возвращается в редакцию, где **повторно рецензируется**. В случае несогласия с рецензентом автор должен кратко и четко обосновать свою позицию.

Редакция оставляет за собой право отклонять без рассмотрения по существу статьи, не соответствующие профилю журнала или оформленные с нарушением требований.

11. Редакция информирует авторов о причинах, которые не позволили принять решение о публикации представленных рукописей.

12. Авторы опубликованных статей несут ответственность за точность приведенных фактов, статистических данных, собственных имен и прочих сведений, а также за содержание материалов, не подлежащих открытой публикации.

13. Представляя в редакцию рукопись своей статьи, автор (ы) берет на себя обязательство не публиковать ее ни полностью, ни частично в ином издании без согласия редакции.

14. Опубликованные статьи, а также информация об авторах на русском и английском языках размещается в свободном доступе в Интернете на платформе Научной Электронной Библиотеки – eLIBRARY.RU.

15. Все статьи проходят проверку в системе «Антиплагиат» на предмет некорректных заимствований.

Материалы следует направлять по юридическому адресу журнала: 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47, Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), ауд.359. Редакция журнала «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона». Электронная почта: arg-journal-ed@list.ru

AUTHORS GUIDELINES

GUIDELINES FOR SUBMITTING YOUR MANUSCRIPT TO «PACIFIC RIM COUNTRIES TRANSPORTATION SYSTEM» JOURNAL

1. Research papers from postgraduate and Ph.D. students as well as undergraduates are considered only if they have a reference letter from their research advisor.

2. Articles should be submitted to the editors in Russian or English as «MS Word» file (by e-mail: apr-journal-ed@list.ru).

The article is formatted according to GOST (Russian National Standard) 7.07-2021.

3. The paper should meet the following requirements and include:

- surname, first name, patronymic name of the author(s);
- title of the article both in **Russian** and **English**;
- abstract including 120–150 words both in Russian and English;
- key words (8–10 words or word combinations) both in **Russian** and **English**. Each key word or phrase is separated from the other by a comma;
- text of the article;
- list of references.

4. A manuscript should be accompanied by the information about the author(s) both in Russian and English, including:

- surname, first name, patronymic name;
- full name of the organization, city;
- address of the organization, indicating the postal code;
- author(s)' academic degree and academic rank (if any);
- e-mail address;
- contact telephone number;
- postal address.

Information about the author(s) should be submitted to the editorial board as «MS Word» file (by e-mail).

5. Margins of the page: top – 2 cm; bottom – 2 cm; left – 3 cm; right – 1 cm; font – «Times New Roman» 14; picture caption – 12 size; line spacing – 1,5.

6. It is obligatory to have an **expert opinion** on the possibility of publication.

7. The title of the article should clearly reflect its content, be informative and should not include unintelligible slang known only to Russian-speaking experts. While translating the article into English, please avoid any transliterations from Russian, except for proper names and other objects.

8. The author's abstract is intended to serve as a source of information independent of the article. The abstract is a precise statement of the content of the article, including the main factual information and conclusions, without additional interpretation or critical remarks of the author. The abstract should not contain information that is not included in the article. Schemes, tables, graphs and figures are not allowed in the abstract. The information contained in the title of the article should not be repeated in the text of the abstract. Standardized terminology should be used; abbreviations are not allowed. The abstract should be informative and reflect the main content of the article and research results. It is advisable to include the following aspects in the abstract:

- subject and purpose of the work;
- method or methodology of the work;
- main results of the work;
- field of application of the results;
- conclusion.

9. Keywords or phrases are text labels that represent the content of an article and can be used to find the article in a database. Therefore, when selecting keywords or phrases, you should list the main terms used in the article.

The manuscripts received are peer reviewed. The decision to publish is made by the editorial board of the journal on the basis of positive review; relevance of the topic.

10. A manuscript with a negative review is rejected and not returned. The article that needs improvement is sent to the author together with the reviewer's comments. The author should take into account all the remarks and make changes, after which the article is returned to the editorial board, where it is repeatedly reviewed. In case of disagreement with the reviewer the author should briefly and clearly justify his position. The editorial board reserves the right to reject articles that do not correspond to the journal's profile.

11. The Editorial Board informs the authors about the reasons that did not allow making a decision on the publication of the submitted manuscripts.

12. The authors of the articles are responsible for the accuracy of the facts, statistics, names and other information.

13. By submitting a manuscript to the editorial board, the author(s) undertakes not to publish it, either in whole or in part, in any other media without the consent of the editorial board.

14. Published articles and information about the authors in Russian and English are placed in free access on the Internet on eLIBRARY.RU platform.

15. All articles are checked by the Anti-Plagiarism system for incorrect borrowings.

Materials should be sent to: 680021, Khabarovsk, Seryshev st., 47, Far Eastern State Transport University (FESTU), Editorial Board of «Pacific Rim countries transportation system» journal. E-mail: apr-journal-ed@list.ru