

Входит в перечень ведущих научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные
результаты диссертаций на соискание ученой степени
доктора и кандидата наук, утвержденный экспертными
советами Высшей аттестационной комиссии
Министерства науки и высшего образования РФ

Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • Irkutsk State Transport University



Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • Irkutsk State Transport University

Подписной индекс
в каталоге «Роспечать» – 64556

Зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Modern technologies.
System analysis. Modeling

2021 № 1 (69)
No. 1 (69)

Современные технологии.
Системный анализ. Моделирование

ISSN 1813-9108 (Print)

Современные технологии Системный анализ Моделирование

2021
№ 1 (69)

Иркутский государственный
университет путей сообщения

Машиностроение • Машиноведение • Энергетические системы • Транспорт



«Материаловедение.
Рельсовые стали.»

Д-Т.Н., профессор

ЧЕРНЯК САУЛ САМУИЛОВИЧ

Machine Building • Theoretical Engineering • Energy Systems • Transport

Modern technologies System analysis Modeling

2021
No. 1 (69)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 1 (69)
2 0 2 1

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **С.К. Каргапольцев**
Ответственный за выпуск **В.Е. Гозбенко**

Приоритетные цели журнала

- передача знаний и опыта, накопленного мировым сообществом и научными школами университета;
- выработка новых знаний в области механики, машиностроения, информатики и транспорта для решения актуальных проблем современной техники;
- ознакомление читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок по техническим наукам.

Стратегические задачи

- предоставлять ученым возможность публиковать результаты своих исследований;
- привлекать внимание к наиболее актуальным перспективным и интересным направлениям научных исследований по тематике журнала;
- обмен мнениями между исследователями из разных регионов и государств.

Учредитель и издатель

Иркутский государственный университет путей сообщения
(664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

Главный редактор

С.К. Каргапольцев, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

Заместители главного редактора

А.П. Хоменко, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

В.Е. Гозбенко, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

С.В. Елисеев, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

Редакционный совет

А.И. Артюнин, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

И.В. Бычков, академик РАН, Иркутский государственный университет (Иркутск, Российская Федерация)

И.И. Галиев, д.т.н., проф., Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Российская Федерация)

А.В. Данеев, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

А.В. Крюков, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

М.И. Кузьмин, академик, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск, Российская Федерация)

Н.А. Махутов, д.т.н., проф., член-корреспондент РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Российская Федерация)

В.В. Москвичев, д.т.н., проф., Институт вычислительных технологий СО РАН (Красноярск, Российская Федерация)

А.В. Мурыгин, д.т.н., проф., Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва (Красноярск, Российская Федерация)

С.И. Носков, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

С.М. Овчаренко, д.т.н., доц., Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Российская Федерация)

П.М. Огар, д.т.н., проф., Братский государственный университет (Братск, Российская Федерация)

Та Зуи Фьонг, к.ф.-м.н., доц., Ханойский институт математики (Вьетнам)

Р. Энхбат, д.ф.-м.н., проф., Монгольский национальный университет (Монголия)

Здислав Якиевич, д.т.н., проф., Университет штата Аризона (США)

А.С. Янюшкин, д.т.н., проф., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (Чебоксары, Российская Федерация)

Адрес редакции: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Телефон: +7(3952) 638-284; **Факс:** +7(3952) 38-76-72

Сайт: <http://stsam.irgups.ru>

e-mail: www.irgups-journal@yandex.ru

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 64556.

Включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ); Ulrich's Periodicals Directory; ВИНТИ РАН.

Входит в перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный экспертными советами Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования РФ по специальным направлениям: машиностроение и машиноведение; транспорт.

Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2021
No. 1 (69)
Published quarterly

Founded in 2004

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Aims and Scope

- transfer of knowledge and experience gained by the world community and schools of thought of the university;
- development of new knowledge in the field of mechanics; mechanical engineering; computer science; transport to solve topical problems of modern technology;

- acquaint the readers with the world's best practices in the implementation of scientific developments in technical sciences.
- provide scientists with an opportunity to publish the results of their researches;
- attract attention to the most relevant and promising areas of research on the subject of the journal;
- exchange of opinions between researchers from different regions and states.

Founder and publisher

Irkutsk State Transport University
(Office G-302, 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russian Federation)

Editor-in-Chief

S.K. Kargapoltsev, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

Deputy Editor-in-Chief

A.P. Khomenko, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

V.E. Gozbenko, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

S.V. Eliseev, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

Editorial council

A.I. Artyunin, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

I.V. Bychkov, Member of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk State University (Irkutsk, Russian Federation)

I.I. Galiev, D.Sc. in Engineering, Prof., Omsk State Transport University (Omsk, Russian Federation)

A.V. Daneev, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

A.V. Kryukov, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

M.I. Kuzmin, Academician, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russian Federation)

N.A. Makhutov, D.Sc. in Engineering, Prof., Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

V.V. Moskvichyov, D.Sc. in Engineering, Prof., Institute of Computational Technologies, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russian Federation)

A.V. Murygin, D.Sc. in Engineering, Prof., Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

S.I. Noskov, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

S.M. Ovcharenko, D.Sc. in Engineering, Assoc. Prof., Omsk State Transport University (Omsk, Russian Federation)

P.M. Ogar, D.Sc. in Engineering, Prof., Bratsk State University (Bratsk, Russian Federation)

Ta Zui Fuong, Ph.D. in Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Hanoi Institute of Mathematics (Vietnam)

R. Enkhbat, D.Sc. in Physics and Mathematics, Prof., Mathematics of National University of Mongolia (Mongolia)

Zdislav Yakievich, D.Sc. in Engineering, Prof., Arizona State University (USA)

A.S. Yanyushkin, D.Sc. in Engineering, Prof., Ulyanov Chuvash State University (Cheboksary, Russian Federation)

Адрес редакции: 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russia

Tel.: +7(3952) 638-284; **Fax:** +7(3952) 38-76-72

Web-Site: <http://stsam.irgups.ru>

e-mail: www.irgups-journal@yandex.ru

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications. Registration Certificate ПИИ № ФС77-66109 от June 20, 2016

The subscription index in the Russian catalogue «Rospechat» is 64556.

Has been included in the Russian Science Citation Index (RSCI); Ulrich's Periodicals Directory.

The journal is included in the list of leading scholarly journals and editions in which the main results of dissertations for the scientific degree of a doctor and candidate of sciences, approved by the expert councils of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, should be published:

- Mechanical engineering and mechanical science;
- Transport.

СОДЕРЖАНИЕ**Машиностроение, машиноведение и энергетические системы**

Ильиных В. А. Влияние конструктивно-технологических факторов на параметры контактного взаимодействия конических профильных соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ	10
Карлина Ю. И. Интеграция этапов подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей на станках с числовым программным управлением	17
Реутов А. А. Компьютерное моделирование раскачивания груза при телескопировании	24
Нозирзода Ш. С. Разработка и исследование математической модели установки гидроабразивной резки	32
Лустенкова Е. С. Экспериментальная оценка тепловых и шумовых характеристик редуктора со сферической роликовой передачей	43
Сидоров О. А., Незевак В. Л., Филиппов В. М. Определение технического состояния Трансформаторов собственных нужд при построении системы мониторинга цифровой тяговой подстанции	50
Черепанов А. П., Ляпустин П. К. Силовые характеристики потока при подаче его в радиально–щелевой зазор в поперечном направлении	58
Бальчугов А. В., Гозбенко В. Е. Оптимизация инфраструктуры промышленного предприятия с учетом статистического веса объектов	67

Транспорт

Бурков А. Т., Мухамеджанов М. Ф. Логическое управление содержанием контактной подвески в системе токосъема при интенсивном движении поездов	78
Дмитренко А. В., Карасёв С. В., Королёв К. В., Калидова А. Д. Северомуйский тоннель: развитие с учетом пропускной способности	88
Мартыненко Л. В., Кушков М. Г. Оценка состояния буксовых узлов колесных пар грузовых вагонов с использованием вибродиагностического стенда ОМСД-03	97
Громаков М. С., Тармаев А. А., Беспалько С. В. Энергетический критерий для оценки запаса устойчивости колеса от вкатывания гребня на головку рельса при движении колесной пары по прямому участку пути	104
Рябченко Н. Л., Алексеева Т. Л., Астраханцев Л. А., Тихомиров В. А., Мартусов А. Л. Эффективность системы электрической тяги поездов на постоянном токе высокого напряжения	111
Иванкова Л. Н., Иванков А. Н., Кузнецова А. Н. Проектирование сортировочных устройств в современных условиях	121
Романенко В. В. Анализ переустройства криволинейных участков пути при замене криволинейных стрелочных переводов производства «VAE» (Рига)	127
Лебедева О. А. Оптимизация работы грузового железнодорожного транспорта с использованием смешанно-целочисленной нелинейной модели	135

Асалханова Т. Н., Осколков А. А. Анализ планирования технологических процессов производства путевых работ железнодорожного транспорта в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой	141
Мыльникова М. А. Влияние микро- и макрогеометрии пути на поперечную устойчивость железнодорожного пути	148
Мыльников М. М. Влияние параметров плана на устойчивость балластной призмы железнодорожного пути	156
Еременко М. Н., Доможирова А. Д., Упырь Р. Ю. Организация планирования диспетчерской работы на участках с подталкивающим движением	164
Давыдов Ю. А., Мухин О. О., Заболотный В. В. Исследование механических воздействий на силовые шины выпрямительно-инверторного преобразователя-4000-2М электровозов 2 (3, 4)ЭС5К	170
Михайлов Э. Л. Модель генератора эквивалентных вертикальных неровностей железнодорожного пути	177
Закарюкин В. П., Крюков А. В. Определение собственных и взаимных сопротивлений в многопроводных системах, содержащих подземные провода	184
Адауров А. С., Нерезков А. В., Федорова В. И., Суслов О. А., Лесников А. В. Достигнутый результат внедрения поста акселерометрического универсального контроля и дальнейшие перспективы при определении дефектов на поверхности катания колес вагонов	192
Перельгина А. А., Подвербный В. А. Принятие решений при проектировании железных дорог в нечеткой среде с использованием лингвистических критериев	200
Смердин А. Н., Бутенко Е. А., Тарасенко А. В. Экспериментальная проверка качества адаптации математической модели контактной сети для расчета частоты колебаний	208
Яговкин Д. А., Мельниченко О. В., Линьков А. О., Шрамко С. Г. Система непрерывного контроля уровня смазки в запасной камере буксы моторно-осевого подшипника электровоза	215
Пузина Е. Ю., Худогов И. А. Анализ ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Тайшет – Тулун Восточно-Сибирской железной дороги	223
Асташков Н. П., Оленцевич В. А., Белоголов Ю. И. Процедура эффективной организации работы автоматизированной системы прогрева тягового электрооборудования электровоза	234
Железняк В. Н., Мартыненко Л. В. Оценка качественных и количественных характеристик системы «локомотив – вагон – путь» с использованием математической модели для определения вероятности схода вагонов	241
Персоналии	
д. т. н., профессор Черняк С. С.	248

CONTENTS

Machine Building, Theoretical Engineering and Energy Systems

Il'inykh V. A. Influence of structural and technological factors on parameters of contact interaction of conical profile connections of spindle units of multi-purpose CNC machines	10
Karlina Yu. I. Integration of stages of preparation of production of high-precision small parts on CNC machines	17
Reutov A. A. Computer simulation of load swaying while telescoping	24
Nozirzoda Sh. S. Development and research of a mathematical model of a waterjet cutting plant	32
Lustenkova E. S. Experimental estimation of thermal and noise characteristics of a speed reducer with a spherical roller transmission	43
Sidorov O. A., Nezevak V. L., Filippov V. M. Determination of the technical condition of auxiliary transformers when building a monitoring system for a digital traction substation	50
Cherepanov A. P., Lyapustin P. K. Force characteristics of the flow when it is fed into a radial-slotted gap in the transverse direction	58
Bal'chugov A. V., Gozbenko V. E. Optimization of the industrial enterprise infrastructure taking into account the statistical weight of objects	67

Transport

Burkov A. T., Mukhamedzhanov M. F. Logical control of the catenary maintenance in the current collection system at intensive train traffic	78
Dmitrenko A. V., Karasev S. V., Korolev K. V., Kalidova A. D. The Severomuisk tunnel: capacity-based development	88
Martynenko L. V., Kushkov M. G. Assessment of the condition of axle box units of wheelsets of freight railcars using the vibration diagnostic stand OMSD-03	97
Gromakov M. S., Tarmaev A. A., Bepal'ko S. V. An energy criterion for estimating the wheel stability reserve from the rolling of the flange onto the railhead during the motion of a wheel set along a straight section	104
Ryabchyonok N. L., Alekseeva T. L., Astrakhantsev L. A., Tikhomirov V. A., Martusov A. L. The effectiveness of the high-voltage direct current system of electric traction of trains	111
Ivankova L. N., Ivankov A. N., Kuznetsova A. N. Design of sorting devices in modern conditions	121
Romanenko V. V. Analysis of the reconstruction of curved sections of the track when replacing curved track switches produced by "VAE" (Riga)	127
Lebedeva O. A. Optimization of the operation of freight rail transport using a mixed-integer nonlinear model	135

Asalkhanova T. N., Oskolkov A. A. Analysis of the planning of technological processes for the production of railway track works in a single corporate automated infrastructure management system	141
Myl'nikova M. A. The influence of railway track micro- and macro-geometry on the railway track transverse stability	148
Mylnikov M. M. The influence of parameters of the plan on the railways ballast section stability	156
Eremenko M. N., Domozhirova A. D., Upyr' R. Yu. Organization of dispatching planning on sections with pusher engine traffic	164
Davydov Yu. A., Mukhin O. O., Zabolotnyi V. V. Research of mechanical effects on power buses of a reversible converter-4000-2M OF electric locomotives 2 (3, 4) ES5K	170
Mikhailov E. L. The model of a generator of equivalent vertical irregularities of the railway track	177
Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. The model of a generator of equivalent vertical irregularities of the railway track	184
Adadurov A. S., Nerezkov A. V., Fedorova V. I., Suslov O. A., Lesnikov A. V. The achieved result of the introduction of the universal accelerometric control station and further prospects for determining railcar wheel thread defects	192
Perelygina A. A., Podverbnyi V. A. Decision-making in designing railways in a fuzzy environment using linguistic criteria	200
Smerdin A. N., Butenko E. A., Tarasenko A. V. Experimental verification of the quality adaptation mathematical model of the contact network for calculation the vibration frequency	208
Yagovkin D. A., Melnichenko O. V., Linkov A. O., Shramko S. G. The continuous grease level control system in the backup chamber of the motor-axle bearing box of electric locomotives	215
Puzina E. Yu., Khudonogov I. A. Analysis of power supply system repair modes of the Tayshet – Tulun section of the East Siberian railway	223
Astashkov N. P., Olentsevich V. A., Belogolov Yu. I. The procedure of effective organization of the work of the automated warm-up system of the electric locomotive traction equipment	234
Zheleznyak V. N., Martynenko L. V. Evaluation of qualitative and quantitative characteristics of the “locomotive – railcar – track” system using a mathematical model to determine the derailment probability	241

Personalities

Professor S. S. Chernyak	248
--------------------------------	-----

Требования к статьям, принимаемым к публикации

Рукописи статей представляются в электронном и распечатанном виде.

Рекомендуемый объем статей 9-12 стр.

1. К статье прилагается:

- акт экспертизы;
- заявка на опубликование (от каждого автора).

2. Статья включает в себя:

- индекс УДК;
- сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, полное название учреждения (кафедры), контактный телефон и E-mail;
- аннотация (реферат) к статье должна быть (на русском и английском языках): информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 180 до 250 слов).
- ключевые слова (5-10 ключевых слов на русском и английском языках);
- библиографический список (необходимо упоминание не менее 18 источников, в том числе 25% на зарубежные источники). Библиографический список к статье оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Текст статьи предоставляется в виде файла с расширением *.doc – документа, построенного средствами Microsoft Word, и распечаткой на стандартных листах формата А4 (210x297 мм) в две колонки, заверенной подписью авторов.

Статья должна быть **структурирована** (введение, 2 и более пункта разделов, заключение).

3. При наборе статьи в Microsoft Word с учетом формата издания рекомендуются следующие установки:

- параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2,5 см; слева и справа – 1,75 см; табуляция – 1 см; ориентация – книжная;
- шрифт – Times New Roman, размер – 11, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- текст статьи разбивается в две колонки с помощью команды "Форматирование -> Колонки" со следующими параметрами: ширина колонки: 8,5 см, промежуток: 0,5 см.

При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3 с параметрами:

- элементы формулы для греческих букв и символов шрифт Symbol, для остальных элементов – шрифт Times New Roman (использование букв русского алфавита в формуле нежелательно);
- размер символов: обычный – 10 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 11 пт. Все экспликации элементов формул в тексте также необходимо выполнять в виде формул.

Рисунки, вставленные в текст статьи, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм, представлены в виде файла с расширением *.jpg, *.tif и распечаткой на стандартных листах формата А4, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров.

В журнал **не принимаются** статьи с таблицами, развернутыми по вертикали (альбомная ориентация), а также имеющими аббревиатуры в названии и аннотации. Если по тексту статьи не делаются ссылки на номера формул, то формулы не нумеруются.

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

Пример оформления статьи представлен на сайте журнала: www.stsam.irgups.ru

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Редакция оставляет за собой право отклонить статью, не отвечающую указанным требованиям или не прошедшую обязательное рецензирование.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения. Аудитория Г-302. Гозбенко Валерий Ерофеевич.

Телефон: 8(3952) 638-284. Факс: 8(3952) 38-76-72. E-mail: irgups-journal@yandex.ru

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МАШИНОВЕДЕНИЕ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

**MACHINE BUILDING, THEORETICAL ENGINEERING
AND ENERGY SYSTEMS**

Влияние конструктивно-технологических факторов на параметры контактного взаимодействия конических профильных соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ

В. А. Ильных✉

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

✉ ilinykh.viktor5@mail.ru

Резюме

Одним из наиболее ответственных соединений металлорежущих станков с ЧПУ является шпиндельный узел. Необходимо отметить, что в настоящее время получают широкое применение станки с высокоскоростной обработкой изделий (high speed cutting (HSC)), для которых характерны: высокая частота вращения главного привода, повышение скорости резания, применение новых инструментальных материалов, а также ужесточение требований к качеству производимых изделий. В связи с этим, решение задач, связанных с повышением эффективности металлорежущих станков, в частности многоцелевых станков с ЧПУ (МС), за счет совершенствования конструкций шпиндельных узлов путем внедрения инновационных решений, повышающих их надежность, приобретает весомую значимость. В статье приведен анализ контактного взаимодействия профильных соединений с равноосным контуром с числом граней равным трем применительно к соединению шпиндель-оправка многоцелевого станка. Решение пространственной контактной задачи сведено к решению плоской контактной задачи теории упругости с использованием метода поверхности отклика, который основан на методе планирования экспериментов и наименьших квадратов. Определен характер распределения контактных давлений по зонам сопряжения при передаче внешней нагрузки, установлены зависимости величин контактных давлений и углов от внешней нагрузки в зависимости от конструктивных параметров (зазоров) соединения. Установлено, что при изменении зазора посадки в профильном соединении от 18 до 228 мкм величина предельных контактных давлений возрастает до 41 %, в то время как величина контактной жесткости профильного соединения уменьшается до 22 %.

Ключевые слова

конические профильные соединения, вспомогательный режущий инструмент, шпиндельные узлы, контактные напряжения, имитационные модели контактного взаимодействия, многоцелевые станки с ЧПУ

Для цитирования

Ильных В.А. Влияние конструктивно-технологических факторов на параметры контактного взаимодействия конических профильных соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ / В. А. Ильных // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 10–17. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).10-17

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.01.2021, поступила после рецензирования: 10.02.2021, принята к публикации: 19.02.2021

Influence of structural and technological factors on parameters of contact interaction of conical profile connections of spindle units of multi-purpose CNC machines

V. A. Il'nykh✉

The Zabaikal'sk Institute of Rail Transport, Chita, the Russian Federation

✉ ilinykh.viktor5@mail.ru

Abstract

One of the most critical connections of CNC machine tools is the spindle unit. It should be noted that machines with high-speed processing of products (high-speed cutting (HSC)) are widely used at present. These machines are characterized by: high speed of rotation of the main drive, increased cutting speed, the use of new tool materials, as well as stricter requirements for the quality of manufactured products. In this regard, the solution of problems related to improving the efficiency of metal-cutting machines, in particular multi-purpose CNC machines (MS), by improving the design of spindle units through the introduction of innovative solutions that increase their reliability, becomes significant. The article analyzes the contact interaction of profile connections with an equiaxed contour with a number of edges equal to three in relation to the "spindle-mandrel" connection of a multi-purpose machine. The solution of the spatial contact problem is reduced to the solution of the plane contact problem of elasticity theory using the response surface method, which is based on the method of planning experiments and least squares. The nature of the distribution of contact pressures over the interface zones during external load transmission is determined, and the dependences of contact pressures and angles on the external load are determined depending on the design parameters (gaps) of the connec-

tion. It was found that when the fit gap in the profile connection changes from 18 to 228 microns, the maximum contact pressure increases to 41%, while the contact stiffness of the profile connection decreases to 22%.

Keywords

conical profile connections, auxiliary cutting tools, spindle units, contact stresses, contact interaction simulation models, multi-purpose CNC machines

For citation

Il'inykh V. A. Vliyanie konstruktivno-tekhnologicheskikh faktorov na parametry kontaktного vzaimodeistviya konicheskikh profil'nykh soedinenii shpindel'nykh uzlov mnogotselevykh stankov s ChPU [Influence of structural and technological factors on parameters of contact interaction of conical profile connections of spindle units of multi-purpose CNC machines]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 10–17. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).10-17

Article Info

Received: 16.01.2021, Revised: 10.02.2021, Accepted: 19.02.2021

Введение

В настоящее время в шпиндельных узлах многоцелевых станков с ЧПУ (МС) используются различные моментопередающие соединения типа: SK, BT (DBT), HSK, PSK KM-конус (Kennametal), а также P-3. Большинство из перечисленных соединений достаточно хорошо изучены, однако ряд новых конических профильных неподвижных разъемных соединений типа P-3, которые находятся в стадии разработки и внедрения в производство определили ряд важных нерешенных научно-практических задач. Некоторые производители металлорежущих станков, проверив на практике преимущество конических профильных соединений типа PSK (Capto), стали интегрировать их в базовый шпиндель станка, например, WFL и Mazak [1, 2, 3, 4, 5]. Однако, проблема обеспечения технологической и эксплуатационной надежности моментопередающих соединений МС на основе конических профильных соединений разных типов, в частности PSK и P-3, определили решение таких задач как: разработка имитационных моделей деталей соединения, разработка имитационных моделей сопряжения деталей соединения, разработка имитационных моделей контактного взаимодействия [6, 7, 8, 9, 10, 11].

Общие положения. Особенности постановки контактной задачи

Разработка имитационной модели контактного взаимодействия деталей конического профильного соединения типа, P-3 в пространственной постановке с учетом погрешности геометрической формы деталей соединения в общем виде представляет определенные математически трудности, поэтому для различных схем пространственного контактного взаимодействия разрабатываются приближенные методы их расчетов. Одним из путей приближенного решения трехмерных контактных задач является сведение их к рассмотрению плоских задач. Это достигается сечением исходной схемы рядом поверхностей и последующим решением задач для тел, форма которых получена в результате таких сече-

ний. Связь между решениями устанавливается из условия равенства перемещений для отдельных областей контакта. Зависимости между перемещениями и нагрузками в каждой плоской задаче находятся при использовании метода поверхности отклика [12]. При этом снижение класса расчетной модели эквивалентно «смягчению» граничных условий, т. е. упрощению условий взаимодействия тел [13].

Рассмотрим случай несимметричного контакта деталей профильного соединения, когда они первоначально соприкасаются в точке при общепринятых допущениях (рисунок 1). Контактные давления, можно определить, если составить систему уравнений, в которую входит уравнение совместности перемещений, уравнение равновесия тел и граничные условия. Воспользуемся известным интегральным уравнением совместности перемещений, которое Коваленко Г.Д. определил при решении контактной задачи для соединения типа вал-втулка цилиндрической формы в условиях действия нормальных и тангенциальных нагрузок в плоской постановке. С этой целью определим функцию сближения взаимодействующих «поверхностей» деталей профильного соединения, а также законы распределения зазоров в стыках трехгранного профильного соединения, передающего крутящий момент для разных условий сопряжения согласно [14].

Для одной реализации кривой с равноосным контуром представим закон распределения зазоров в стыке для рассматриваемой грани соединения системой уравнений вида:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = (r_{21} - r_{11}) \cdot (1 - \cos \varphi); \quad -\varphi_1 \leq \varphi \leq 0, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_2 = (r_{22} - r_{21}) \cdot (1 - \cos \varphi); \quad 0 \leq \varphi \leq \varphi_2. \quad (2)$$

Тогда с учетом выражений (1) и (2) представим интегральное уравнение совместности перемещений деталей профильного соединения (3) в виде:

$$-(v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \left[\int_{-\varphi_1}^0 P(\varphi') \cdot \cos(\varphi - \varphi') \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \right]$$

$$\begin{aligned} & \cdot d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \cos(\varphi - \varphi') \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \cdot d\varphi' \Big] + (\chi_1 \cdot \\ & \cdot r_1 - \chi_2 \cdot r_2) \cdot \left[\int_{-\varphi_1}^0 P(\varphi') \cdot \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \right. \\ & \cdot \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi' \Big] - 2 \cdot v_1 \cdot r_1 \cdot \left[P(\varphi') \cdot d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \right. \\ & \cdot d\varphi' \Big] - 2 \cdot r_1 \cdot f_{np} \left[\frac{1}{G_1} \cdot \left(\int_{-\varphi_1}^0 \sin \varphi' \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} \sin \varphi' \cdot \right. \right. \\ & \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' \Big] - \frac{1}{G_2} \cdot \left(\int_{-\varphi_1}^0 \cos \varphi' \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} \cos \varphi' \cdot \right. \\ & \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' \Big] = f_i - (r_{2j} - r_{1j}) \cdot (1 - \cos \varphi), \end{aligned}$$

где $v_{1,2}$; $\chi_{1,2}$ – параметры упругости внутренней и наружной поверхности сопрягаемых тел; $r_{1,2}$ – радиусы наружной и внутренней поверхности; $P(\varphi)$ – нормальное давление, действующее на площадке контакта; φ' – угловая координата точки, в которой действует давление; φ – координата точки, в которой определяется перемещение; f_{np} – коэффициент пропорциональности; $G_{1,2}$ – модуль сдвига контактирующих тел; φ_1 и φ_2 – границы угла контакта; f_i – функция сближения взаимодействующих поверхностей тел; $E_{1,2}$; $\mu_{1,2}$ – модули упругости наружной и внутренней поверхностей тел.

При этом известно, что:

$$v_{1,2} = \frac{1 - \mu_{1,2}^2}{\pi \cdot E_{1,2}}; \quad \chi_{1,2} = \frac{(1 - \mu_{1,2}) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_{1,2})}{2 \cdot E_{1,2}};$$

$$G_{1,2} = \frac{E_{1,2}}{2 \cdot (1 + \mu_{1,2})}.$$

При взаимодействии некруглых (профильных) поверхностей тел типа вал-втулка при решении задачи при несимметричном контакте может иметь место два случая, а именно: $-\varphi_1 \leq \varphi \leq 0$ и $0 \leq \varphi \leq \varphi_2$.

В силу того, что кривая с равноосным контуром имеет в каждой точке определенный радиус – вектор $\rho(\varphi)$ и эксцентриситет e , то линия действия равнодействующей от действия нормальных нагрузок не принадлежит началу координат O_1 и поэтому необходимо пересчитать радиусы взаимодействующих поверхностей тел (оправки и шпинделя) отно-

сительно центра O_2 , принадлежащего линии действия силы P_{ni} (рис. 1).

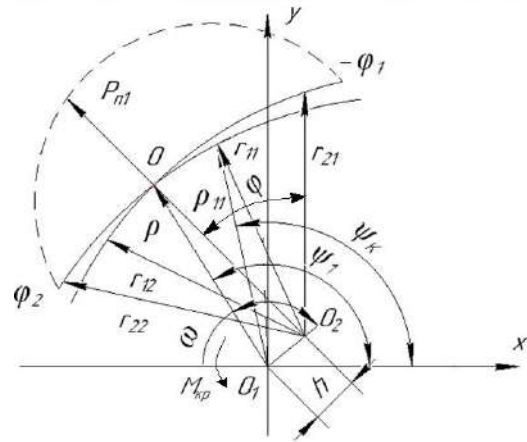


Рис. 1. Расчетная схема к определению радиусов взаимодействующих профильных поверхностей

Fig. 1. Design scheme for determining the radii of interacting profile surfaces

В дальнейшем решение контактной задачи можно вести, используя метод конечных разностей апробированный в частности в работе [15].

Приведем левую часть интегрального уравнения (3) к конечно – разностной сумме вида:

$$\begin{aligned} & -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \cos(\varphi - \varphi') \cdot \\ & \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \cdot d\varphi' = -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \\ & \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cos(\varphi - \varphi') \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \cdot d\varphi'. \\ & (x_1 \cdot r_1 - x_2 \cdot r_2) \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi' = (x_1 \cdot r_1 - \\ & - x_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi'. \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -2 \cdot v_1 \cdot r_1 \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot d\varphi' = -2 \cdot v_1 \cdot r_1 \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} d\varphi' \\ & -2 \cdot r_1 \cdot f_{np} \cdot \frac{1}{G_1} \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi' \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' = -\frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_1} \cdot \\ & \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \sin \varphi' \cdot d\varphi'. \quad (7) \end{aligned}$$

$$2 \cdot r_1 \cdot f_{np} \cdot \frac{1}{G_2} \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi' \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' = \frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_2}.$$

$$\sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cos \varphi' \cdot d\varphi' \quad (8)$$

В обоих случаях, когда $[-\varphi_1; 0]$ и $[0; \varphi_2]$ может иметь место два случая: если $\varphi > \varphi'$, тогда выражение (4) и (5) имеют вид:

$$\begin{aligned} & -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cos(\varphi - \varphi') \cdot \\ & \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \cdot d\varphi' = -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \\ & \cdot \left[-\sin(\varphi - \varphi') \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cdot (x_1 \cdot r_1 - \\ & - x_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi' = (x_1 \cdot r_1 - \\ & - x_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \left[-\cos(\varphi - \varphi') \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}}. \quad (9) \end{aligned}$$

Когда $\varphi < \varphi'$ выражения (4) и (5) имеют вид:

$$\begin{aligned} & -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cos(\varphi - \varphi') \cdot \\ & \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \cdot d\varphi' = -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \\ & \cdot \left[\sin(\varphi' - \varphi) \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi' - \varphi|}{2} \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}}. \quad (10) \end{aligned}$$

Выражения (6-8) приводятся к виду:

$$\begin{aligned} & (x_1 \cdot r_1 - x_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi' = (x_1 \cdot r_1 - \\ & - x_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \left[\cos(\varphi' - \varphi) \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}}. \quad (11) \\ & -\frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_1} \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \sin \varphi' \cdot d\varphi' = \frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_1} \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \\ & \cdot \left[\cos \varphi' \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}}. \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_2} \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cos \varphi' \cdot d\varphi' = \frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_2} \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \\ & \cdot \left[\sin \varphi' \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}}, \quad (13) \end{aligned}$$

где

$$\eta_1 = \frac{0 - (-\varphi_{01})}{n} = \frac{\varphi_{01}}{n}; \text{ при } -\varphi_1 \leq \varphi \leq 0, \quad (15)$$

$$\eta_2 = \frac{\varphi_{02} - 0}{n} = \frac{\varphi_{02}}{n}; \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_2, \quad (16)$$

$$r_1 = \sum_{K=1}^n \frac{r_{11}}{n}, \quad r_2 = \sum_{K=1}^n \frac{r_{21}}{n}; \text{ при } -\varphi_1 \leq \varphi \leq 0, \quad (17)$$

$$r_1 = \sum_{K=1}^n \frac{r_{12}}{n}, \quad r_2 = \sum_{K=1}^n \frac{r_{22}}{n} \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_2. \quad (18)$$

Полученные выражения позволяют составить и решить с помощью стандартной программной процедуры систему линейных алгебраических уравнений, определить характер и величины распределения контактных давлений при известных пределах интегрирования.

В первом приближении интервал интегрирования может быть определен с помощью аналитических зависимостей, приведенных в работе профессора Цейтлина Н.И. при расчете удельных давлений при тесном контакте цилиндра с цилиндрическим вырезом.

Величину половины контактного угла определяют из выражения вида:

$$\varphi_0 = 0,912 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{E \cdot \varepsilon}}. \quad (19)$$

В нашем случае с учетом особенностей равноосного контура интервалы интегрирования могут быть определены из системы уравнений вида:

$$\varphi_{01} = 0,912 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{ni}}{E \cdot \varepsilon_1}}, \text{ при } -\varphi_1 \leq \varphi \leq 0, \quad (20)$$

$$\varphi_{02} = 0,912 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{ni}}{E \cdot \varepsilon_2}}, \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_2, \quad (21)$$

где $\varepsilon_{1,2}$ – величина зазора посадки.

Необходимо отметить, что для каждой поверхности (зоны) контакта, профильного трехгранного соединения величины контактных углов будут разные в силу того, что на поверхностях контакта действуют разные равнодействующие нормальных нагрузок P_n . В тоже время эпюры распределения контактных давлений несимметричны в силу несимметричного характера распределения зазоров в стыках. В связи с этим определение пределов интегрирования ведем методом поверхности отклика (МПО).

В силу того, что пределы интегрирования найдены по зависимостям для симметричных областей контакта, необходимо уточнить решение задачи, а именно: определить пределы интегрирования для несимметричных областей.

Рассмотрим пример расчета профильного трехгранного соединения типа Р-3, которое передает крутящий момент $M_{кр} = 7$ Н·м. При этом теорети-

ческий зазор посадки в соединении равен $\Delta_T = 0,228$ мм; материал втулки (шпинделя) сталь 40Х, материал вала (оправки) сталь 40Х, средний диаметр 50 мм, эксцентриситет профиля равен 1,8 мм в плоской постановке.

Требуется определить величины углов контакта и контактных давлений.

Установим связь между параметрами φ_1 , φ_2 и параметрами P_{Ki} , Δ_{ni} процесса. Определим φ_1 , φ_2 как угловые координаты границ контактных зон.

С этой целью воспользуемся методом поверхности отклика, разработанным в работе [15]. Расчет ведем по алгоритму, предложенному в работе [15].

1. Составляется исходная система уравнений, описывающая исследуемый процесс.

Обозначим линейные члены уравнения (3) как Z_{Ki} :

$$P_{Ki} = Z_{Ki},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ ($n = 8$).

Тогда выражение (3) запишется в матричном виде [14]:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{K_1} \\ \vdots \\ Z_{K_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \vdots \\ \Delta_n \end{pmatrix}, \quad (22)$$

где a_{lk} – коэффициенты при неизвестных Z_{Ki} ; Δ_l – свободные члены, $k = 1, 2, \dots, n$; $l = 1, 2, \dots, n$.

2. Постулируются зависимости между нелинейными членами φ_1 , φ_2 и параметрами P_{Ki} , Δ_l .

Опираясь на результаты работы [14, 15] можно принять модель вида:

$$\Delta_l = C_k \cdot \varphi_1^{\alpha_1} \cdot \varphi_2^{\alpha_2}. \quad (23)$$

3. Выбирается матрица планирования нелинейных членов.

Выражение (23) после логарифмирования приводится к виду:

$$\ln \Delta_l = \ln C_k + \alpha_1 \cdot \ln \varphi_1 + \alpha_2 \cdot \ln \varphi_2, \quad (24)$$

$$y_l = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2, \quad (25)$$

где x_1 , x_2 – кодированные переменные.

На основании формулы (25) принимается ортогональный план первого порядка с результатами расчета (табл. 1).

Таблица 1. Ортогональный план первого порядка
Table 1. Orthogonal plan of the first order

u	X ₀	X ₁	X ₂	P ₁ , МПа	P ₂ , МПа	P ₃ , МПа	P ₄ , МПа	P ₅ , МПа	P ₆ , МПа	P ₇ , МПа	Δ _i , мм
1	+1	-1	-1	1,248	2,986	2,134	0,298	0,239	0,207	0,135	0,00257
2	+1	-1	+1	2,49	6,58	5,107	0,676	0,552	0,441	0,336	0,00160
3	+1	+1	-1	2,445	6,47	5,018	0,667	0,545	0,432	0,362	0,00153
4	+1	+1	+1	1,217	2,883	1,953	0,228	0,172	0,216	0,061	0,00104

4. Задаются границы варьирования контролируемых переменных. Принятый план требует задания контролируемых переменных на двух уровнях максимальном $\varphi_{1\max}$, $\varphi_{2\max}$ и минимальном $\varphi_{1\min}$, $\varphi_{2\min}$.

Предварительный расчет ведем для случая внедрения одного тела (оправки) в другое тело (шпиндель).

На основании предварительных расчетов можно принять:

$$\varphi_{1\max} = 6, \varphi_{1\min} = 5, \varphi_{2\max} = 3, \varphi_{2\min} = 2.$$

5. Формируется массив коэффициентов a_{lk} , Δ_l для различных опытов u . Значения a_{lk} , Δ_l подсчитываются по формулам (1, 2, 9-14) заданным в таблице различным сочетаниям уровней φ_1 и φ_2 .

6. Решается система уравнений относительно неизвестных (табл. 1).

Решение линейной системы (22) ведем методом Гаусса.

7. Методом наименьших квадратов находятся значения коэффициентов уравнения (25) для кодированных переменных φ_1 , φ_2 , обозначенных через x_1 и x_2 .

$$b_{k,v} = \sum_{u=1}^a x_{u,v} \cdot \frac{y_{u,k}}{\sum_{u=1}^a x_{u,v}^2}, \quad (26)$$

где v – порядковый номер переменной x ($v = 0, 1, 2$).

8. Осуществляется по формулам кодирования переход к фактическим параметрам α_k уравнения (6). Для чего в уравнение (25) подставляются следующие формулы:

$$x_1 = \frac{2 \cdot (\ln \varphi_1 - \ln \varphi_{1\max})}{\ln \varphi_{1\max} - \ln \varphi_{1\min}} + 1,$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot (\ln \varphi_2 - \ln \varphi_{2\max})}{\ln \varphi_{2\max} - \ln \varphi_{2\min}} + 1. \quad (27)$$

Значения найденных таким образом коэффициентов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Числовые значения коэффициентов для кодированных переменных по результатам опыта
Table 2. Numerical values of the coefficients for the coded variables according to the results of the experiment

u	φ ₁ , град	φ ₂ , град	ln	Кодированные	
				b ₁	b ₂
1	5	2	P _{Ki}	0,864	1,566
2	5	3			
3	6	2	Δ _{ni}	-3,783	-6,890
4	6	3			

9. Искомые значения φ_1 и φ_2 , соответствующие заданным величинам P_{Ki} и Δ_{ni} , находятся решением системы уравнений вида:

$$\ln P_{Ki} = 0,864 \cdot \ln \varphi_1 + 1,566 \cdot \ln \varphi_2,$$

$$\ln \Delta_{ni} = -3,783 \cdot \ln \varphi_1 - 6,890 \cdot \ln \varphi_2. \quad (28)$$

10. Проверяется точность расчета.

Для чего найденные по формулам значения φ_1 и φ_2 подставляются в исходную систему, и последняя решается относительно z_k . Определяются величины невязок δ . Если точность неудовлетворительна, то область аппроксимации уменьшается делением первоначально выбранной области на части или принимается другая аппроксимирующая модель и весь цикл повторяется снова.

В результате расчетов установлен несимметричный характер распределения контактных давлений в зонах контактного взаимодействия при действии внешней нагрузки (рис. 2). Определен характер изменения величин контактных углов от величины крутящего момента для разных зазоров в соединении (рис. 3). Определен нелинейный характер изменения величины контактных углов и давлений для разных зазоров в соединении (рис. 4). Установлено, что при схеме нагружения трехгранного профильного соединения крутящим моментом и радиальной силой, последнее вызывает перераспределение величин контактных давлений в зонах контакта. Изменение контактных давлений в условиях циклического нагружения профильного соединения шпиндель-оправка при обработке изделий может приводить к возникновению процесса фреттинг-износ посадочных поверхностей деталей соединения, понижая точность и контактную жесткость соединения и шпиндельного узла станка с ЧПУ [16-18].

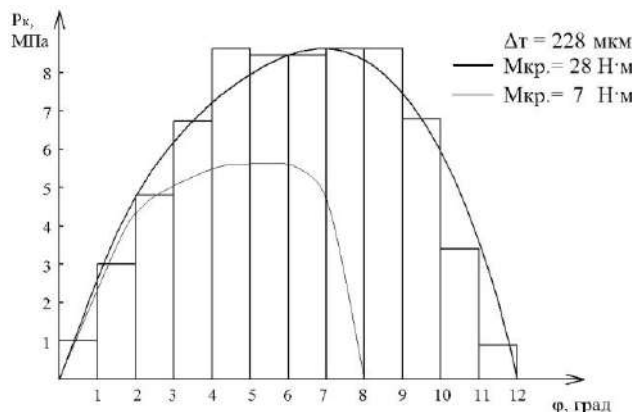


Рис. 2. Распределение контактных давлений в профильном соединении при передаче крутящего момента
Fig. 2. Distribution of contact pressures in the profile connection during transmission of torque

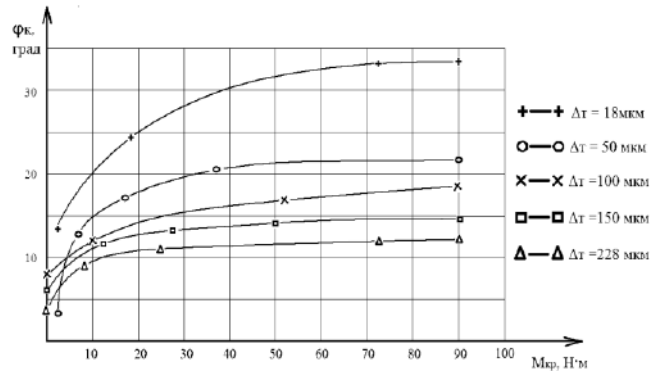


Рис. 3. Зависимость величин контактных углов в профильном соединении от внешней нагрузки (крутящего момента)

Fig. 3. Dependence of the values of the contact angles in the profile connection on the external load (torque)

В результате приближенного решения контактной задачи (в плоской постановке) установлены зависимости между параметрами контакта и внешней нагрузкой передаваемой профильным соединением (рис. 3-4).

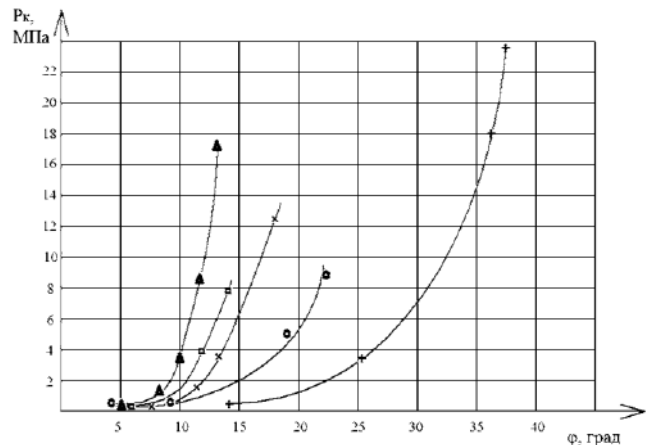


Рис. 4. Зависимость изменения величины контактных давлений в профильном соединении от величины угла контакта

Fig. 4. Dependence of the change in the magnitude of the contact pressure in the profile connection on the magnitude of the contact angle

Заключение

1. Приближенно решена контактная задача теории упругости для трех-связанных контактных зон применительно к профильным соединениям с равноосным контуром для соединения типа Р-3 шпиндель – оправка при передаче крутящего момента в плоской постановке.

2. Установлены связи между параметрами контактного взаимодействия и условиями эксплуатации, а также конструктивно-технологическими параметрами профильных соединений типа Р-3. При изменении величин зазора посадки в соединении от

18 мкм до 228 мкм величина предельных значений контактных давлений возрастает до 41 %, величина контактной жесткости соединения шпиндель-оправка уменьшается до 22 %.

3. Определена возможность применения метода поверхности отклика при решении систем нелиней-

ных уравнений при разработке имитационной контактной задачи. Предложен порядок решения контактной задачи применительно к профильным соединениям с равноосным контуром в шпиндельном узле.

Список литературы

1. Аверьянов О.И., Аверьянова И.О. Модульный принцип построения многоцелевых станков с ЧПУ. Старый Оскол : ТНТ, 2018. 164 с.
2. Молодцов В.В. Методы проектирования высокоэффективных металлообрабатывающих станков как мехатронных систем : дис. ... докт. техн. наук : 05.02.07 / В.В. Молодцов ; МГТУ. Москва, 2016. 390 с.
3. Акмаев О.К., Кудояров Р.Г., Башаров Р.Р. Оценка работоспособности инструментальных оправок при высокоскоростной обработке деталей на многоцелевых станках // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13. №1 (34). С. 138–140.
4. Григорьев С. Н., Кохомский М.В., Маслов А.Р. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ : справочник. М. : Машиностроение, 2006. 544 с.
5. Украженко К.А. Разработка и исследование методов повышения жесткости и быстротенности инструментальных систем многоцелевых станков : дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / К.А. Украженко ; МГТУ. Москва, 2007. 435 с.
6. Линейцев В.Ю., Ильиных В.А. Имитационное моделирование деталей конического соединения на основе РК-3 профильных кривых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 51–55.
7. Линейцев В.Ю., Ильиных В.А., Ярилов В.Е. Исследование конических РК-3 профильных соединений на точность и жесткость // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 36–39.
8. Пат. 184076 Рос. Федерация. Шпиндель-инструментальная оправка / В.А. Ильиных. ; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщ. №2018109190 ; заявл. 14.03.2018 ; опубл. 15.10.2018, Бюл. № 29.
9. Ильиных В.А., Ярилов В.Е., Рожкова Е.А. Оценка точности и прочности модульной системы вспомогательного инструмента на основе профильных соединений // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2019. 23(3). С. 451–462. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-451-462.
10. Ильиных В.А. Оценка точности конических профильных соединений вспомогательного инструмента многоцелевого станка при высокоскоростной обработке // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 2. С. 140–147. DOI: 10.18721/JEST.26211.
11. Ильиных В.А. Применение конических профильных соединений шпиндель-оправка в многоцелевых станках // Омский научный вестник. 2021. №1 (175). С. 12–16. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-12-16.
12. Соломенцев Ю.М., Косов М.Г., Митрофанов В.Г. Моделирование точности при автоматизированном проектировании металлорежущего оборудования. М. : НИИМАШ, 1985. 68 с.
13. Иосилевич Г.Б. Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин. М. : Машиностроение, 1981. 116 с.
14. Ильиных В.А. Расчет и выбор конструктивных параметров профильных соединений с равноосным контуром : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / В. А. Ильиных. М. : МВТУ, 1987. 285 с.
15. Косов М.Г. Моделирование точности при автоматизированном проектировании и эксплуатации металлорежущего оборудования: автореф. ... докт. техн. наук / М.Г. Косов М. : Станкин, 1985. 48 с.
16. Ilinykh V. Experimental study of profile connections of auxiliary tool multi-purpose machines in cyclic loading // SibTrans – 2019 : materials Science and Engineering. 2020. Vol. 760. DOI:10.1088/1757-899X/760/1/012025.
17. Ilinykh V., Pichuev E. Evaluation of quality parameters of the torque transmission connections of the multi-purpose machine spindle joints // Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012102.
18. Ilinykh V. Evaluation of quality parameters of conical profile com-pounds in nodes of multi-purpose machines // E3S Web of Conferences 2019. Vol. 140. DOI:https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914002003.

References

1. Aver'yanov O.I., Aver'yanova I.O. Modul'nyi printsip postroeniya mnogotselevykh stankov s ChPU: monografiya [Modular principle of construction of multi-purpose CNC machines: a monograph]. Stary Oskol: TNT Publ., 2018. 164 p.
2. Molodtsov V.V. Metody proektirovaniya vysokoeffektivnykh metalloobrabatvyayushchikh stankov kak mekhatronnykh sistem: dis. dokt. tekhn. nauk: 05.02.07 [Methods of designing highly efficient metalworking machines as mechatronic systems: D. Sc. (Engineering) diss.: 05.02.07. Moscow, MSTU Publ., 2016. 390 p.
3. Akmaev O.K., Kudesanova R.G., Sharamov R.R. Otsenka rabotosposobnosti instrumental'nykh opravok pri vysokoskorostnoi obrabotke detalei na mnogotselevykh stankakh [Evaluation of the designer's work complete set at high speed of data processing on multi-purpose machines] // Vestnik UGATU, Vol. 13, 2009. No. 1 (34). Pp. 138–140.
4. Grigor'ev S.N., Kokhomskii M.V., Maslov A.R. Instrumental'naya osnastka stankov s ChPU: spravochnik [Instrumental equipment of CNC machines: a reference book]. In Maslov A. R. (ed.) Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006. 544 p.
5. Ukrazhenko K. A. Razrabotka i issledovanie metodov povysheniya zhestkosti i bystrosmennosti instrumental'nykh sistem mnogotselevykh stankov: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.03.01 [Development and research of methods of increasing the rigidity and quick-changeability of tool systems of multi-purpose machines: D. Sc. (Engineering) diss.: 05.03.01]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2007. 435 p.

6. Lineitsev V.Yu., Il'nykh V.A. Imitatsionnoe modelirovanie detalei konicheskogo soedineniya na osnove RK-3 profil'nykh krivykh [Simulation modeling of details of conical connections on the basis of P-3-profile curves] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technology. System analysis. Modeling]*, No. 2 (46). Irkutsk: IrGUPS Publ., 2015. Pp. 51–55. (The journal is listed in HAC under No. 1819).

7. Lineitsev V.Yu., Il'nykh V.A., Yarilov V.E. Issledovanie konicheskikh RK-3 profil'nykh soedinenii na tochnost' i zhestkost' [The accuracy and stiffness study of conical P-3-profile connections] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technology. System analysis. Modeling]*. Irkutsk: IrGUPS Publ., No. 1 (53), 2017. Pp. 36–39 (The journal is listed in HAC under No. 1819).

8. Il'nykh V.A. *Shpindel'-instrumental'naya opravka [The spindle-tool mandrel]* // Utility model patent: No.184076, State register of utility models. Patent application for utility model No. 2018109190 dated March 14, 2018. The term of the patent is until March 14, 2028.

9. Il'nykh V. A., Yarilov V. E., Rozhkova E. A. Otsenka tochnosti i prochnosti modul'noi sistemy vspomogatel'nogo instrumenta na osnove profil'nykh soedinenii [Evaluation of the accuracy and strength of the modular system of auxiliary tools based on profile connections] // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of the Irkutsk State Technical University]*, 2019; 23(3):451–462. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-451-462.

10. Il'nykh V. A. Otsenka tochnosti konicheskikh profil'nykh soedinenii vspomogatel'nogo instrumenta mnogotselovogo stanka pri vysokoskorostnoi obrabotke [Evaluation of the accuracy of conical profile joints of auxiliary tools of a multi-purpose machine tool for high-speed processing]. *Materialovedenie. Energetika. [Materials science. Power engineering]*, 2020. Vol. 26, No. 2. Pp. 140–147. DOI: 10.18721/JEST. 26211

11. Il'nykh V.A. Primenenie konicheskikh profil'nykh soedinenii shpindel'-opravka v mnogotselovykh stankakh [The use of conical profile spindle-mandrel connections in multi-purpose machines] // *Omskii nauchnyi vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 2021. No. 1 (175). Pp. 12–16. DOI: 10.25206/ 1813-8225-2021-175-12-16.

12. Solomentsev Yu.M., Kosov M.G., Mitrofanov V.G. Modelirovanie tochnosti pri avtomatizirovannom proektirovanii metallovezhushchego oborudovaniya [Modeling accuracy in automated design of metal-cutting equipment]. Moscow: NIIMASH Publ., 1985. 68 p.

13. Iosilevich G. B. Kонтсentratsiya napryazhenii i deformatsii v detalyakh mashin [Concentration of stresses and deformations in machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 116 p.

14. Il'nykh V.A. Raschet i vybor konstruktivnykh parametrov profil'nykh soedinenii s ravnoosnym konturom: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.02 [Calculation and selection of structural parameters of profile connections with an equiaxed contour: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.02.02]. Moscow: MVTU Publ., 1987. 285 p.

15. Kosov M. G. Modelirovanie tochnosti pri avtomatizirovannom proektirovanii i ekspluatatsii metallovezhushchego oborudovaniya: avtoreferat ... dokt. tekhn. nauk [Modeling accuracy in automated design and operation of metal-cutting equipment: author's abstract of D. Sc. (Engineering) diss.]. Moscow: Stankin Publ., 1985. 48 p.

16. Il'nykh V. Experimental study of profile connections of auxiliary tool multi-purpose machines in cyclic loading. *Materials Science and Engineering* 760, 012025 (2020) SibTrans – 2020.

17. Il'nykh V., Pichuev E. Evaluation of quality parameters of the torque transmission connections of the multi-purpose machine spindle joints. *Materials Science and Engineering* 896 (2020) 012102 doi:10.1088/1757-899X/896/1/012102 MPCPE – 2020.

18. Il'nykh V. Evaluation of quality parameters of conical profile com-pounds in nodes of multi-purpose machines. *E3S Web of Conferences* 140, 02003 (2019) EECCE – 2019.

Информация об авторах

Ильиных Виктор Анатольевич – доцент, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, канд. техн. наук., г. Чита, e-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

Information about the authors

Viktor A. Ilynykh – The Zabaikal'sk Institute of Rail Transport, Chita, e-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23

УДК 621.398.001.2

Интеграция этапов подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей на станках с числовым программным управлением

Ю. И. Карлина ✉

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ karlinigor@mail.ru

Резюме

Для проведения интеграции этапов технологической подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей коаксиальных радиокомпонентов на станках с числовым программным управлением проведено исследование особенностей производства деталей и стандартных функциональных возможностей САМ-систем. В работе использовались теоретические методы – классификационный анализ и обобщение для дальнейшего моделирования методики создания и ве-

рификации управляющих программ. Разработана классификация этих деталей по типу оборудования, типовым конструкциям, серийности, параметрам конструктивного исполнения, инструменту. Рассмотрены возможности расширения функций САМ-систем, существующие методики создания, проверки и отладки управляющих программ. Приведен пример успешного расширения функциональных возможностей стандартной САМ-системы в радиоэлектронной промышленности – модуль повышения точности обработки без изменения режима резания за счет настройки взаимного позиционирования инструмента и заготовки. Выработаны требования к разработке специализированной комбинированной методики создания и верификации управляющих программ с применением существующих возможностей верификации и минимальным использованием отладки и верификации непосредственно на станке. Методика включает формирование и использование справочников отработанных режимов обработки, при которых количество и размер заусенцев минимальны, а также библиотеки управляющих программ, оснащенной системой поиска по параметрам различия исполнений деталей, применяемым материалам, инструменту. Методика предназначена для минимизации трудозатрат технолога-программиста на создание, проверку и отладку управляющих программ, и снижения станкоемкости опытных работ по проведению натуральных экспериментов для верификации управляющих программ.

Ключевые слова

технологическая подготовка производства, САМ-система, управляющая программа, станки с числовым программным управлением, автоматизация технологической подготовки производства

Для цитирования

Карлина Ю.И. Интеграция этапов подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей на станках с числовым программным управлением / Ю.И. Карлина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 17–23. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.01.2021, поступила после рецензирования: 12.02.2021, принята к публикации: 22.02.2021

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90184

Integration of stages of preparation of production of high-precision small parts on CNC machines

Yu. I. Karlina✉

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ karlinigor@mail.ru

Abstract

To integrate the stages of technological preparation of the production of high-precision small-sized parts of coaxial radio components on CNC machines, the features of the production of parts and the standard functionality of Computer-Aided Manufacturing (CAM) systems were studied. The study was carried out using theoretical methods - classification analysis and generalization to further simulate the methodology of creating and verifying control programs. A classification of these parts has been developed by the type of equipment, standard designs, serial production, design parameters, and tool. The possibilities of the extensibility of the functions of CAM systems, the existing methods of creating, testing and debugging control programs are considered. An example of a successful expansion of the functionality of a standard CAM system in the radio-electronic industry is given – a module for increasing machining accuracy without changing the cutting mode by adjusting the mutual positioning of the tool and the workpiece. Requirements for the formulation of a specialized combined methodology of creating and verifying control programs using the existing verification capabilities and minimal use of debugging and verification directly on the machine have been developed. The methodology includes the creation and use of reference books of job-proved processing modes, in which the number and size of burrs are minimal, as well as a library of control programs equipped with a search system for the parameters of differences in the design of parts, the materials used, and the tool. The methodology is intended to minimize the labor costs of the programmer technologist to create, verify and debug control programs, and to reduce the machining content of experimental work on conducting field experiments for verification of control programs.

Keywords

technological preparation of production, CAM system, control program, CNC machines, automation of technological preparation of production

For citation

Karlina Yu. I. Integratsiya etapov podgotovki proizvodstva vysokotochnykh malogabaritnykh detalei na stankakh s CHPU [Integration of the stages of preparation of production of high-precision small-sized parts on CNC machines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 17–23. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23

Article info

Received: 10.01.2021, Revised: 12.02.2021, Accepted: 22.02.2021

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90184

Введение

Детали коаксиальных радиокомпонентов являются малогабаритными, высокоточными и изготавливаются из труднообрабатываемых материалов. Точность изготовления достигает 7 квалитета, габаритные размеры от 0,39 до 6 мм в диаметре и длиной до 15 мм. Выбор материалов для изготовления ограничен техническими требованиями [1, 2]. Для выпуска внутренних и наружных проводников герметичных коаксиальных радиокомпонентов используют ковар, что позволяет получить герметичный спай со стеклом С52-1 благодаря согласованным по величине коэффициентам термического расширения этих материалов [3]. Детали негерметичных коаксиальных радиокомпонентов выпускают из латуни или бериллиевой бронзы, что обусловлено пружинящими свойствами этих материалов, необходимыми для плотного обжатия ламелей при сборке. При лезвийной механообработке на поверхностях деталей из материалов образуются заусенцы, предотвратить появление которых не получается. Однако контроль параметров заусенцев позволяет значительно снизить издержки на их удаление. Для минимизации количества и размеров заусенцев необходимо проводить подбор инструмента и режимов лезвийной обработки, а во время обработки периодически производить замеры как габаритных размеров, так и заусенцев. Такой этап подготовки производства требует изучения рекомендованных диапазонов для режимов обработки, установки конкретных значений и проведения испытаний на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Испытание проводится до получения допустимого количества и размеров заусенцев на протяжении периода времени, позволяющего оценить выполнение требования обеспечения износостойкости инструмента и допустимых параметров заусенцев. Издержки на создание управляющих программ и натурные испытания можно сократить благодаря применению ряда мероприятий по интеграции процессов разработки технологических процессов и обработки на станках с ЧПУ.

Для проведения интеграции процессов разработки технологических процессов и обработки деталей на станках с ЧПУ необходимо провести исследование следующих вопросов [8–11]:

- классификация деталей по типу оборудования, видам, серийности, изменяемым параметрам внутри вида, материалам, инструменту;
- расширяемость функциональных возможностей САМ-систем;

- методики верификации управляющих программ;
- методики создания управляющих программ с учетом классификации деталей.

Классификация деталей по типу оборудования, серийности, типовым конструкциям с изменяемыми параметрами, материалам, инструменту

По труднодоступности поверхностей для удаления заусенцев детали коаксиальных радиокомпонентов можно разделить на две группы: внутренние проводники – детали, не имеющие внутренних труднодоступных поверхностей, наружные проводники – детали, имеющие внутренние труднодоступные поверхности (пазы, карманы, канавки и т. п.). Удаление заусенцев с внутренних проводников (оси, втулки и т. п.) легко производится в галтовочном барабане, и допустимо достаточно большое количество более крупных заусенцев. Удалить заусенцы и скруглить острые кромки деталей, имеющих внутренние труднодоступные поверхности, сложнее. Отказаться от удаления заусенцев вручную можно за счет применения термоимпульсного метода удаления заусенцев [4, 5]. Для качественного термоимпульсного удаления заусенцев необходимо контролировать их размер. Максимальный размер удаляемого заусенца зависит от вида материала детали, а также от наличия тонкостенных элементов. Соотношение размера заусенца и минимальной толщины детали не должно превышать 1:4, в противном случае тонкостенные элементы конструкции будут деформированы из-за отжигания [6, 7].

По серийности детали необходимо различать на серийные и разовые заказы малых объемов. Разовые заказы с перспективой дальнейшего серийного производства целесообразно относить к серийным. Верификацию серийных деталей необходимо проводить с учетом обеспечения плановой износостойкости инструмента, для разовых заказов достаточно убедиться, что инструмент сохраняет стойкость, конструкторские размеры и качество поверхности соответствуют чертежу на протяжении нескольких циклов выполнения управляющей программы.

По типовым конструкциям с наличием различных исполнений, детали можно сгруппировать по наименованию детали и параметрам исполнений, которые указываются в чертеже. Исполнения деталей могут иметь различные длину, диаметр, резьбу, геометрию торца, дополнительные конструктивные элементы. Например, деталь токовывод радиочастотного соединителя имеет 52 исполнения, отлич-

чающихся длиной токовывода L (мм), длиной вылета l (мм), наличием радиуса на торце токовывода. Далее приведен фрагмент чертежа детали, имеющей множественное исполнение, демонстрирующий различие по размерам (рис. 1).

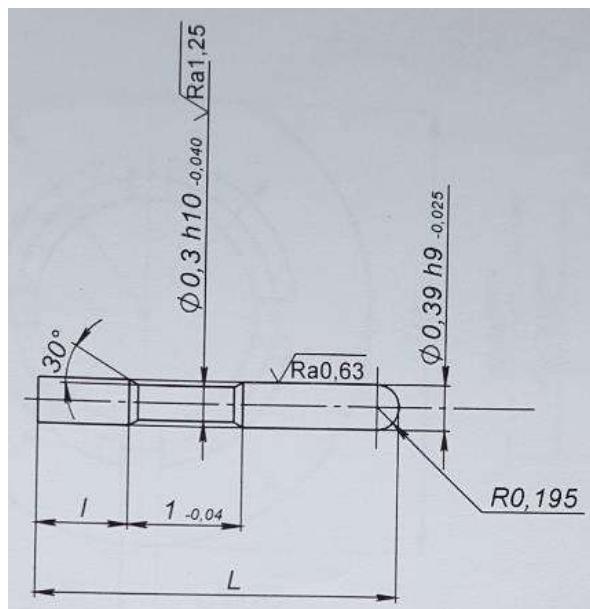


Рис. 1. Фрагмент чертежа детали, имеющей множественное исполнение с различием по длинам L и l

Fig. 1. Fragment of a drawing of a part having a multiple design with a difference in lengths L and l

Приведен также фрагмент чертежа детали, имеющей множественное исполнение, демонстрирующий различие по геометрическим элементам конструкции (рис. 2).

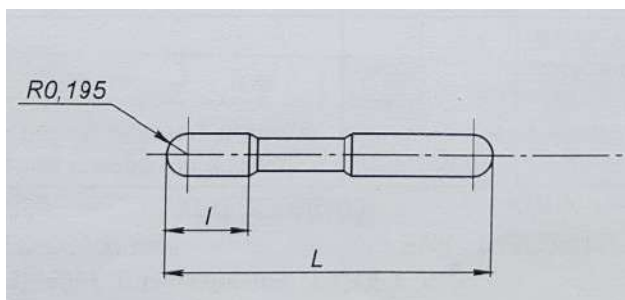


Рис. 2. Фрагмент чертежа детали, имеющей множественное исполнение с различием по наличию радиуса на торце токовывода

Fig. 2. Fragment of a drawing of a part having a multiple design with a difference in the presence of a radius at the end of the terminal

Применение материалов и инструментов из списка допустимых заменителей также приводит к необходимости корректировки управляющей программы с последующей ее верификацией. Напри-

мер, изменение диаметра проволоки для изготовления детали (см. рис. 1) приведет к изменению глубины резания, объема снимаемого материала и нормы расхода. Замена инструмента на допустимый по технологической документации аналог, или даже замена производителя инструмента с тем же каталожным номером приводит к необходимости изменения плановой износостойкости и корректировке режимов резания. Режимы резания и набор инструмента также могут зависеть от особенностей конкретного оборудования.

Набор функциональных возможностей САМ-систем и возможность их расширения

Многообразие существующих САМ-систем обусловило их специализацию по отраслям применения и набору функциональных возможностей. На данном этапе развития САМ-систем целесообразно подразделить их по степени автоматизации, виду оборудования, количеству координат обработки, способу выбора стратегии обработки.

По степени автоматизации САМ-системы можно разделить на следующие классы:

- ручное программирование, когда технолог-программист составляет управляющую программу в текстовом редакторе общего назначения;
- с автоматизированной функцией расчета координат опорных точек и построения траектории движения инструмента, например, как компас ЧПУ;
- с автоматизированными функциями расчета режимов резания и формирования технологии обработки на основе созданной вручную технологом-программистом схемы обработки, перечней оборудования и инструмента, детализации операции, например, как Гемма;
- с автоматизированной функцией создания технологии обработки при участии программиста-технолога, например, как СпрутСАМ.

По типам оборудования САМ-системы может быть для фрезерной, электроэрозионной, токарной обработки, обрабатывающих центров, деревообработки и гравировки.

По количеству координат и сложности выполняемой операции выделяют 2-, 2,5-, 3-, 4-, 5-координатные САМ-системы.

По способу формирования стратегии обработки:

- САМ-системы на основе операций, которые требуют выполнения технологом-программистом множества операций по выбору технологии обработки всех поверхностей заготовки;
- САМ-системы на основе конструктивных элементов используют набор элементов обработки для описания законченной детали;
- САМ-системы на основе процесса применяются, как правило, для программирования типовых процессов и операций [12].

Выбор САМ-системы существенно ограничивается совместимостью с используемой на предприятии САД-системы. Электронные модели, созданные в САД-системе, должны быть читаемы САМ-системой. Современные САМ-системы имеют модульную структуру [13, 14]. Состав модулей по функциональным возможностям и расширяемости можно подобрать под потребности конкретного вида производства. Наличие встроенных средств программирования облегчает настройку САМ-системы под нужды производства: описать постпроцессоры, подключить модули расширения, написанные на высокоуровневых языках программирования.

Заусенцы и острые кромки на деталях коаксиальных радиокомпонентов недопустимы, их наличие приводит к необходимости подбора параметров обработки и верификации управляющих программ для проверки качества обработки и его стабильности при различной степени износа инструмента с помощью натурального эксперимента. Решение такой задачи не может быть реализовано типовыми средствами САМ-систем общего назначения, поэтому возникает необходимость в разработке дополнительных программных продуктов для автоматизации и снижения издержек на составление, проверку и отладку управляющих программ.

Автоматизация процедур проверки и отладки управляющих программ

После создания управляющей программы необходимо провести процедуру ее проверки и отладки. Снизить издержки на этом этапе можно, применив средства автоматизации отладки.

Простейшая методика проверки и отладки управляющих программ подразумевает использование встроенной функции проверки синтаксиса и исправления синтаксических ошибок управляющей программы средствами программирования и отладку управляющей программы на станке путем проведения натуральных экспериментов по выпуску деталей с дальнейшей корректировкой управляющих программ. Такая методика отладки не требует затрат на приобретение дополнительных средств автоматизации процесса подготовки управляющих программ, но характеризуется повышенной трудоемкостью, станкоемкостью, вследствие чего является неэффективной.

Целесообразно использовать САМ-системы, имеющие встроенные верификаторы или дополненные симулятором для воспроизведения результатов работы управляющей программы, которые имеют возможность графического построения, воссоздания траектории движения инструмента по управляющей программе [15]. Далее симулятор производит моделирование обработки согласно управляющей программе и показывает возникающие ошибки. Возможно применение режима расширенной верификации, при котором производится как отладка, так и анализ, и оптимизация

управляющей программы. Использование таких модулей расширения функционала САМ-системы значительно повышает эффективность процесса разработки управляющих программ.

Однако оценка размеров, количества заусенцев на протяжении всего жизненного цикла инструмента, и их контроль не охвачены существующими функциональными возможностями САМ-систем. Поэтому необходимо разработать специализированную комбинированную методику верификации управляющих программ с использованием всех существующих возможностей верификации и минимальным использованием отладки и верификации непосредственно на станке с ведением справочников отработанных режимов обработки, при которых количество и размер заусенцев минимальны, а также библиотеки управляющих программ, параметризованной по параметрам классификации по типовым конструкциям с наличием различных исполнений.

Технологии подготовки управляющих программ

Для создания управляющих программ в рамках процесса технологической подготовки производства предприятия могут воспользоваться следующими технологиями:

1. Ручная подготовка управляющих программ непосредственно на станке.

2. Автоматизированное создание управляющих программ, для реализации которого требуется оснастить рабочее место компьютером с установленной САМ-системой общего назначения или специализированной САМ-системой, дополненной модулями расширения функциональных возможностей, а также постпроцессорами для используемых станков.

3. Создание программ без использования расширенной верификации.

4. Создание программ с применением симуляторов для проверки и отладки:

- встроенных средств верификации САМ-системы;
- специализированных верификаторов;
- интегрированных средств анализа и оптимизации [16, 17], таких как «Тесноматix».

На выбор технологии подготовки управляющих программ оказывают влияние следующие особенности производства:

- размер серии выпуска;
- сроки поставки продукции;
- характеристики применяемых станков с ЧПУ;
- применяемое программное обеспечение;
- сложность проектируемого изделия;
- технические требования проектируемого изделия;
- уровень компетентности разработчиков.

В качестве примера расширения функциональных возможностей САМ-систем можно привести модуль повышения точности обработки без измене-

ния режима резания за счет настройки взаимного позиционирования инструмента и заготовки. В процессе разработки управляющих программ для станков с ЧПУ технолог-программист производит расчет оптимальных параметров позиционирования [18]. Для автоматизации проведения этих расчетов в радиоэлектронной промышленности создано дополнительное программное обеспечение, расширяющее стандартные возможности САМ-системы [19, 20].

Заключение

Исследование особенностей производства деталей коаксиальных радиокомпонентов и функциональных возможностей САМ-систем позволило

классифицировать детали типу оборудования, видам, серийности, изменяемым параметрам внутри вида, материалам, инструменту. Выработать требования к созданию специализированной комбинированной методики верификации управляющих программ с применением всех существующих возможностей верификации и минимальным использованием отладки и верификации непосредственно на станке с ведением справочников отработанных режимов обработки, при которых количество и размер заусенцев минимальны, а также библиотеки управляющих программ.

Список литературы

1. ОСТ 4 ГО.070.014-79. Детали радиоэлектронной аппаратуры. Общие технические условия. Введ. 01–09–1975. М. : Радиостандарт-ЦНИИРЭС. 1992. 15 с.
2. STD-01. WBTC.1996. draft. DeburringTechnologyInternational, Inc., KansasCity, MO.
3. Джурицкий К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. Соединители, коаксиально-микрополосковые переходы, адаптеры, СВЧ-вводы, низкочастотные вводы, изоляционные стойки, фильтры помех. М. : Техносфера, 2006. 216 с.
4. Хрипунов В., Кравчик А. Современные технологии удаления заусенцев в отверстиях малых диаметров при изготовлении деталей гидравлического оборудования // СтанкоАрена : сайт. URL: <https://stankoarena.ru/article/sovremennye-tekhnologii-udaleniya-zausentsev-v-otverstiyakh-malykh-diametrov.html> (дата обращения 20.01.2020).
5. John Halladay. Практическое применение методов термического и электрохимического удаления заусенцев // Станкофорвард : сайт. URL: <http://stankoforward.ru/tehnologii-udaleniya-zausentsev> (дата обращения 20.01.2020).
6. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Сулова. М. : Машиностроение. 2008. 320 с.
7. Титов С.Н. Снятие заусенцев термоимпульсной установкой Pulsar TI-576 // Вестник научных конференций. 2016. № 12-4. С. 176–177.
8. Куликов Д.Д., Падун Б.С., Яблочников Е.И. Перспективы автоматизации технологической подготовки производства // Изв. вузов. Сер.: Приборостроение. 2014. № 8 (57). С. 7–12.
9. Зильбербург Л.И., Молочник В.И., Яблочников Е.И. Информационные технологии в проектировании и производстве. СПб. : Политехника, 2008. 304 с.
10. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы данных интеллектуальных систем. СПб. : Питер, 2000. 384 с.
11. Применение многоагентных технологий для реализации системы управления виртуальным предприятием / М.Я. Афанасьев и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 5(75). С. 105–111.
12. Куликов Д.Д., Яблочников Е.И. Применение оценочных метрик для анализа технологической подготовки производства // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 6 (76). С. 109–112.
13. Яблочников Е.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А. Организация технологической подготовки производства в распределенной среде // Изв. вузов. Сер.: Приборостроение. 2010. Т. 53, № 6. С. 12–15.
14. Аверин В.В., Гусельников В.С. Автоматизация проектирования управляющих программ / Изв. вузов. Сер.: Приборостроение. 2010. № 6 (53). С. 67–71.
15. Вороненко В.П., Седых М.И., Шашин А.Д. Проектирование и эффективная эксплуатация производственных участков многономенклатурного машиностроительного производства // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. 2017. № 1 (40). С. 182–189.
16. Вороненко В.П., Шашин А.Д. Планирование опытного производства с учетом его текущего состояния // Автоматизированное проектирование в машиностроении : материалы V междунар. заочной науч.-практ. конф. Новокузнецк : НИЦ МС, 2017. № 5. 134 с.
17. Маданов А.В. Анализ проблем при обработке деталей сложной геометрии и путей их решения на этапе технологической подготовки производства // Проблемы науки. 2015. № 1 (1). С. 14–16.
18. Будущее машиностроения России // Сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. С. 48.
19. Либерман Я.Л., Черногорова С.А. Повышение точности систем ЧПУ // СТИН. 2008. № 1. С. 6–9.
20. Ловыгин А.А., Васильев А.В., Кривцов С.Ю. Современный станок с ЧПУ и САД/САМ-система. М. : Эльф ППР, 2006. 286 с.

References

1. OST 4GO.070.014-79. Detali radioelektronnoi apparatury [OST 4GO.070.014-79. Details of electronic equipment]. Moscow: "Radiostandard-TsNIRES" OOO. Moscow, 1992. 15 p.

2. STD-01. WBTC.1996, draft. Deburring Technology International, Inc., Kansas City, MO.
3. Dzhurinskii K.B. Miniaturnye koaksial'nye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCh. Soediniteli, koaksial'no-mikropoloskovye perekhody, adaptory, SVCh-vvody, nizkochastotnye vvody, izolyatsionnye stoiki, fil'try pomekh [Miniature coaxial radio components for microwave microelectronics. Connectors, coaxial-microstrip transitions, adapters, microwave inputs, low-frequency inputs, isolation racks, noise filters]. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2006. 216 p.
4. Sovremennyye tekhnologii udaleniya zausentsev v otverstiyakh malykh diametrov pri izgotovlenii detalei gidravlicheskogo oborudovaniya [Modern technologies for deburring small-diameter holes in the manufacture of hydraulic equipment parts] [Electronic media]. URL: <https://stanko-arena.ru/article/sovremennyye-tekhnologii-udaleniya-zausentsev-v-otverstiyakh-malykh-diametrov.html>. Accessed January 20, 2020.
5. Halladay J. Prakticheskoe primeneniye metodov termicheskogo i elektrokhimicheskogo udaleniya zausentsev [Practical application of thermal and electrochemical deburring methods] [Electronic media]. URL: <http://stankoforward.ru/tekhnologii-udaleniya-zausentsev>. Accessed January 20, 2020.
6. Inzheneriya poverkhnosti detalei [Engineering of the surface of parts]. In Suslov A.G. (ed.) Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008. 320 p.
7. Titov S.N. Snyatie zausentsev termopul'snoi ustanovkoi Pulsar TI-576 [Deburring with the Pulsar TI-576 thermal pulse installation]. *Vestnik nauchnykh konferentsii [Bulletin of scientific conferences]*, 2016. No. 12-4. Konsaltingovaya Kompaniya OOO Publ. (Tambov). Pp. 176–177.
8. Kulikov D.D., Padun B.S. Yablochnikov E.I. Perspektivy avtomatizatsii tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva [Prospects for the automation of technological preparation of production]. *Izv. vuzov. Priborostroenie [Journal of Instrument Engineering]*, 2014. No. 8 (57). Pp. 7–12.
9. Zilberburg L.I., Molochnik V.I., Yablochnikov E.I. Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve [Information technologies in design and production]. Saint Petersburg: Politehnika Publ., 2008. 304 p.
10. Gavrilova T.A., Khoroshevskii V.F. Bazy dannykh intellektual'nykh sistem [Databases of intelligent systems]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2000. 384 p.
11. Afanas'ev M.Ya., Salomatina A.A., Alyoshina E.E., Yablochnikov E.I. Primeneniye mnogoagentnykh tekhnologii dlya realizatsii sistemy upravleniya virtual'nym predpriyatiem [Application of multi-agent technologies for the implementation of a virtual enterprise management system]. *Nauch.-tekhn. vestn. Informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]*, 2011. No. 5 (75). Pp. 105–111.
12. Kulikov D.D., Yablochnikov E.I. Primeneniye otsenochnykh metrik dlya analiza tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva [Application of evaluative metrics for the analysis of technological preparation of production]. *Nauch.-tekhn. vestn. Informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]*, 2011. No. 6 (76). Pp. 109–112.
13. Yablochnikov E.I., Fomina Yu.N., Salomatina A.A. Organizatsiya tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva v raspredelennoi srede [Organization of technological preparation of production in a distributed environment]. *Izv. vuzov. Priborostroenie [Journal of Instrument Engineering]*, 2010. Vol. 53. No. 6. Pp. 12–15.
14. Averin V.V., Gusel'nikov V.S. Avtomatizatsiya proektirovaniya upravlyayushchikh programm [Design automation of control programs]. *Izv. vuzov. Priborostroenie [Journal of Instrument Engineering]*, 2010. No. 6 (53). Pp. 67–71.
15. Voronenko V.P., Sedykh M.I., Shashin A.D. Proektirovanie i effektivnaya ekspluatatsiya proizvodstvennykh uchastkov mnogonomenklaturnogo mashinostroitelnogo proizvodstva [Design and efficient operation of production areas of multi-product machine-building production]. *Vestnik RGATU imeni P.A. Solov'eva [Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University]*, 2017. No. 1 (40). Pp. 182–189.
16. Voronenko V.P., Shashin A.D. Planirovanie opytного proizvodstva s uchetom ego tekushchego sostoyaniya [Planning a pilot production taking into account its current state]. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii: Materialy V mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Computer-aided design in mechanical engineering: Proceedings of the V international correspondence scientific and practical conference]*. Novokuznetsk: SRC MS Publ., 2017. No. 5. 134 p.
17. Madanov A.V. Analiz problem pri obrabotke detalei slozhnoi geometrii i putei ikh resheniya na etape tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva [Analysis of problems in processing parts of complex geometry and ways to solve them at the stage of technological preparation of production]. *Problemy nauki [Problems of Science]*, 2015. No. 1 (1). Pp. 14–16.
18. Budushchee mashinostroeniya Rossii [The future of mechanical engineering in Russia]. *Sbornik trudov Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov [Proceedings of the All-Russian conference of young scientists and specialists]*. Bauman MSTU Publ., 2008. Pp. 48.
19. Liberman Ya.L., Chernogolova S.A. Povysheniye tochnosti sistem ChPU / STIN [Improving the accuracy of CNC / STIN systems], 2008. No. L. Pp. 6–9.
20. Lovygin A.A., Vasil'ev A.V., Krivtsov S.Yu. Sovremennyyi stanok s ChPU i CAD/CAM-sistema [The modern machine with CNC and CAD/CAM-system]. Moscow: El'f PPR Publ., 2006. 286 p.

Информация об авторах

Карлина Юлия Игоревна – научный сотрудник Научно-исследовательской части, аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: karlinigor@mail.ru

Information about the authors

Yuliya I. Karlina, Researcher of Research Department, Ph.D. student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: karlinigor@mail.ru

Компьютерное моделирование раскачивания груза при телескопировании

А. А. Реутов✉

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская федерация

✉ bgtu2012@yandex.ru

Резюме

В статье представлена компьютерная динамическая модель раскачивания груза на канате при различных управлениях выдвиганием секций телескопической стрелы крана. Цель работы – анализ возможности снижения раскачивания груза на канате при различных управлениях выдвиганием секций телескопической стрелы крана. Методом проведения работы является компьютерное моделирование движения телескопической стрелы с грузом с учетом механических характеристик канатов, секций и их контактного взаимодействия с использованием программного комплекса «Универсальный механизм». Проведено моделирование движения телескопической стрелы с грузом с одноэтапным и трехэтапными режимами управления, с зависимостью скорости выдвигания от времени и перемещения. Моделирование показало, что трехэтапный режим управления движением с переменным ускорением лучше снижает колебания груза по сравнению с двумя другими рассмотренными режимами, хотя максимальные значения отклонения и угла перекоса груза в большей мере зависят от ускорения движения секций, чем от закона движения. Использование зависимости скорости выдвигания от перемещения менее эффективно, чем зависимости от времени, и замедляет движение секций. Погрешность позиционирования обусловлена отличием фактической скорости выдвигания секций от заданной и составляет 0,8–1,3 %. Погрешность позиционирования может быть уменьшена уточнением значений силы гидроцилиндра. Компьютерную модель и установленные закономерности телескопирования грузов целесообразно использовать при проектировании монтажных операций, осуществляемых грузоподъемными кранами с телескопическими стрелами.

Ключевые слова

телескопическая стрела, динамическая модель, управление движением, раскачивание груза, «Универсальный механизм»

Для цитирования

Реутов А.А. Компьютерное моделирование раскачивания груза при телескопировании / А.А. Реутов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 24–32. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).24-32

Информация о статье

поступила в редакцию: 03.02.2021, поступила после рецензирования: 08.02.2021, принята к публикации: 17.02.2021

Computer simulation of load swaying while telescoping

А. А. Reutov✉

Bryansk State Technical University, Bryansk, the Russian Federation

✉ bgtu2012@yandex.ru

Abstract

The article presents a computer dynamic model of swaying a load on a rope with various controls by extending the sections of the telescopic boom of the crane. The purpose of the work is to analyze the possibilities of reducing the swaying of the load with various controls by extending sections of the telescopic boom of the crane. The method of carrying out the work is computer simulation of the movement of a telescopic boom with a load, taking into account the mechanical characteristics of ropes, sections and their contact interaction using the “Universal Mechanism” software. The simulation of the movement of a telescopic boom with a load with one-stage and three-stage control modes, with the dependence of the extension speed on time and movement, has been carried out. The simulation has shown that the three-stage motion control mode with variable acceleration better reduces the load oscillations in comparison with the other two considered modes, although the maximum values of the deflection and skew angle of the load depend more on the acceleration of the sections movement than on the law of motion. Using the dependency of extension speed on displacement is less effective than using the time dependency and slows down the movement of the sections. The positioning error is conditioned by the difference between the actual section extension speed from the specified one. Positioning error is 0,8–1,3 % and can be reduced by adjusting the hydraulic cylinder force values. It is advisable to use a computer model and the established patterns of loads telescoping when designing assembly operations carried out by cranes with telescopic booms.

Keywords

telescopic boom, dynamic model, movement control, load sway, “Universal mechanism”

For citation

Reutov A.A. Komp'yuternoe modelirovanie raskachivaniya gruza pri teleskopirovanii [Computer simulation of load swaying while telescoping]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 24–32. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).24-32

Article Info

Received: 03.02.2021, Revised: 08.02.2021, Accepted: 17.02.2021

Введение

Телескопические стрелы с гидравлическим приводом нашли широкое применение в современных мобильных грузоподъемных кранах. В России наиболее распространены мобильные краны грузоподъемностью 25–50 т с трех- и четырехсекционными стрелами и высотой подъема до 50 м.

Телескопированием называют перемещение груза путем выдвижения или втягивания секций телескопической стрелы крана. Телескопирование применяют при невозможности перемещения груза другим способом, например, для подачи груза в проем здания.

Раскачивание груза на канате при перемещении краном снижает производительность крана, создает опасность повреждения груза и близко расположенных конструкций.

Для оценки интенсивности раскачивания груза при перемещении краном предложено много математических моделей, отличающихся расчетными схемами, способами описания движения тел, способами управления.

В настоящей статье, в отличие от аналитических моделей, разработана компьютерная модель движения секций телескопической стрелы крана с полиспастом и грузом. Компьютерная модель создана в среде программного комплекса «Универсальный механизм» (далее – Комплекс УМ).

Способы ограничения раскачивания груза при перемещении кранами

Во многих математических моделях поднимаемый груз представлен одинарным маятником с точечной массой. В работе [1] получены аналитические зависимости, учитывающие изменение длины каната при подъеме и опускании груза. Полная модель крана, включающая привод, была создана с использованием инструментов «Matlab» и успешно проверена на реальном кране [2].

На основе дифференциальных уравнений затухающих колебаний плоского маятника с подвижной точкой подвеса получены аналитические зависимости угла наклона грузового каната и его первой производной от времени при постоянном ускорении точки подвеса [3]. Разделение процесса разгона моста или грузовой тележки крана на три этапа (разгон с постоянным ускорением, движение с постоянной скоростью, дальнейший разгон с постоянным ускорением) позволяет выйти на режим заданной максимальной скорости перемещения точки подвеса груза при полном гаше-

нии колебаний груза. Получена аналитическая зависимость угла наклона грузового каната относительно вертикали при движении точки подвеса груза с постоянным ускорением. Показано, что разбиение процесса разгона точки подвеса груза на три этапа с различными ускорениями обеспечивает режим максимальной скорости перемещения точки подвеса груза при гашении колебаний грузового каната.

Недостатком данного способа разгона точки подвеса груза является необходимость использования высокоточного привода, обеспечивающего оптимальные длительности и ускорения этапов разгона.

Математические модели, представляющие крюковую подвеску и груз как двойной маятник представлены для мостового крана [4] и башенного крана [5]. Здесь уравнения Лагранжа использованы для описания движения узлов крана и груза, проектирования управления. Недостатком этих работ является неопределенность законов изменения силы (момента) привода, необходимых для реализации требуемого движения.

Среди множества схем управления кранами можно выделить замкнутые, незамкнутые и комбинированные (гибридные) схемы. Исследователи часто используют незамкнутые схемы управления для контроля раскачивания груза, поскольку они не требуют установки датчиков измерения угла отклонения каната [6]. Недостатком незамкнутых схем управления является их нечувствительность к внешним воздействиям, например, ветровой нагрузке. Кроме того, использование незамкнутой системы управления, задающей только закон движения или закон изменения скорости как функцию времени, невозможно.

Для достижения точного позиционирования при небольшом раскачивании груза изучались комбинированные методы управления. Это сделано для дальнейшего повышения производительности кранов, чего нельзя было добиться при использовании одного контроллера. Комбинированное управление снижает колебания груза при порывах ветра. Примеры моделирования подтверждают устойчивость комбинированного управления при различных комбинациях движения крана и ветровой нагрузки. Эти гибридные контроллеры включают комбинированное управление со скользящим режимом и частичной линеаризацией обратной связи, формирование входных сигналов с помощью адаптивного управления скользящим режимом и оптимальное ПИД-регулирование [11–13]. Формирование входных сигналов было объеди-

нено с контроллером обратной связи и с демпфером [14, 15].

Цель и метод проведения работы

Целью работы является сравнительный анализ снижения раскачивания груза на канате при различных управлениях выдвиганием секций телескопической стрелы крана.

Методом проведения работы является компьютерное моделирование движения телескопической стрелы с грузом с учетом механических характеристик канатов, секций и их контактного взаимодействия с использованием Комплекса УМ.

Отличительными особенностями данной работы являются:

- создание компьютерной модели, позволяющей рассматривать телескопирование груза как управляемое движение многомассовой нелинейной системы;
- использование способа управления, задающего силу гидроцилиндра выдвигания секций (ГЦ) как функцию задаваемой и фактической скоростей выдвигания ГЦ;
- вычисление силы ГЦ с учетом механических характеристик узлов стрелы, полиспаста и груза.

Описание компьютерной модели телескопической стрелы

Для моделирования движения телескопической стрелы создана компьютерная 2D-модель трехсекционной стрелы в среде Комплекса УМ (рис. 1).



Рис. 1. Компьютерная модель трехсекционной телескопической стрелы

Fig. 1. Computer model of a three-section telescopic boom

Компьютерная модель включает три секции стрелы, полиспаст с крюковой подвеской, груз, гид-

роцилиндры подъема стрелы и выдвигания секций, канатный механизм. Тела модели перемещаются в вертикальной плоскости YZ . Силы и перемещения тел в направлении оси X не рассматриваются.

Секция № 1, установленная на поворотной платформе крана, может вращаться в вертикальной плоскости относительно оси крепления. Секции № 2 и 3, полиспаст с крюковой подвеской, груз могут перемещаться в вертикальной плоскости, имея три степени свободы.

Контактное взаимодействие каждой пары секций представлено 4 контактными силами «точка – плоскость», описанными в Руководстве пользователя УМ [7]. Схема расположения контактных точек представлена (рис. 2).

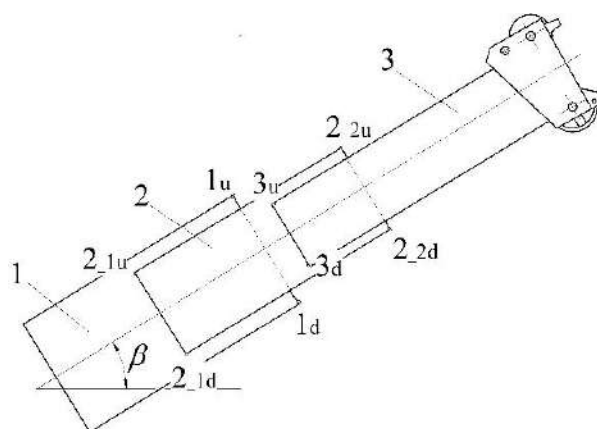


Рис. 2. Схема расположения контактных точек модели (1, 2 и 3 – секции № 1, 2 и 3)

Fig. 2. Model contact points layout (1, 2 and 3 are sections No. 1, 2 and 3)

Две контактные точки секции № 1 обозначены 1d и 1u. Секция № 2 имеет четыре контактные точки, обозначенные 2_1d и 2_1u, 2_2d и 2_2u. Секция № 3 имеет две контактные точки – 3d и 3u [8], β – угол наклона продольной оси стрелы к горизонту.

Силы трения F_{mp} в опорах скольжения секций определены через коэффициент трения скольжения f и нормальные реакции N :

$$F_{mp} = fN.$$

В модели принята экспоненциальная зависимость коэффициента трения скольжения f от скорости скольжения. Переход от трения скольжения к трению покоя происходит, если скорость скольжения меняет направление на противоположное.

Во многих конструкциях телескопических стрел с 3 или 4 секциями используют канатный механизм выдвигания и втягивания секций, содержащий канат выдвигания и канат втягивания. У автомобильного крана КС-55713-5К-1 две ветви каната выдвигания расположены в вертикальной плоскости [9], оба конца каната закреплены на секции № 1 натяжителями (рис. 3).

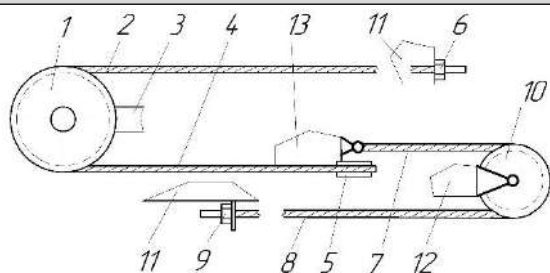


Рис. 3. Кинематическая схема канатного механизма выдвижения и втягивания секции № 3 стрелы автомобильного крана КС-55713-5К-1:

1 – шкивы блока каната выдвижения; 2 – верхняя ветвь каната выдвижения; 3 – гидроцилиндр; 4 – нижняя ветвь каната выдвижения; 5 – полушкив секции № 2; 6 – натяжители каната выдвижения; 7 – верхняя ветвь каната втягивания; 8 – нижняя ветвь каната втягивания; 9 – натяжитель каната втягивания; 10 – шкив каната втягивания; 11–13 – соответственно секции № 1–3

Fig. 3. Kinematic diagram of the cable mechanism for extending and retracting section No. 3 of the automobile crane boom KS-55713-5K-1:

1 – extension rope block sheaves; 2 – the upper branch of the extension rope; 3 – hydraulic cylinder; 4 – the lower branch of the extension rope; 5 – dead sheave of section No. 2; 6 – extension rope tensioners; 7 – the upper branch of the retraction rope; 8 – the lower branch of the retraction rope; 9 – pull-in rope tensioner; 10 – retraction rope sheave; 11–13 – respective sections No. 1–3

Канат втягивания охватывает шкив блока, закрепленного на секции № 2. Конец верхней ветви каната выдвижения закреплен на секции № 3, конец нижней ветви – на секции № 1 посредством натяжителя (см. рис. 3).

Канаты выдвижения и втягивания в компьютерной модели представлены телами каната (ТК), соединенными упруго-диссипативными элементами (УДЭ). Изгибная жесткость канатов не учитывается. Необходимые количества ТК N_1 и N_2 определяются соотношениями длин канатов (l_1 и l_2) и диаметров блоков (D_1 и D_2) механизмов выдвижения и втягивания:

$$N_1 > 3l_1 / D_1 \text{ и } N_2 > 3l_2 / D_2.$$

Если канаты выдвижения и втягивания имеют жесткость на растяжение E_1 и E_2 соответственно, то жесткость УДЭ с длинами в недеформированном состоянии l_{01} и l_{02} определяется формулами

$$C_1 = E_1 / l_{01}, \quad C_2 = E_2 / l_{02}.$$

Коэффициенты диссипации УДЭ определены по формулам

$$\mu_1 = \eta_1 / l_{10}, \quad \mu_2 = \eta_2 / l_{20},$$

где η_1 и η_2 – коэффициенты вязкости при растяжении канатов выдвижения и втягивания.

Жесткости канатов E_1 и E_2 , коэффициенты вязкости η_1 и η_2 определяют по экспериментальным данным затухающих продольных колебаний образцов канатов. Силы предварительного натяжения канатов обеспечивают их растянутое состояние при всех режимах работы.

Для канатных блоков механизмов выдвижения и втягивания моменты сопротивления вращению M_{Ci} выражены через реакции подшипников блоков R_i :

$$M_{Ci} = R_i K_c, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где K_c – коэффициент сопротивления i -го канатного блока.

Моделирование грузового каната цепью ТК и УДЭ усложняет модель при увеличении кратности полиспаста. Существенно упростить модель полиспаста можно, если не учитывать изменение массы и жесткости каната полиспаста при изменении его длины, а рассмотреть только изменение длины полиспаста [10]. В этом случае модель полиспаста включает верхний блок, соединенный с нижним блоком поступательным шарниром.

При заторможенном барабане грузового каната поступательный шарнир обеспечивает изменение длины полиспаста Δ_n по закону

$$\Delta_n(t) = \Delta_b(t) / K_n, \quad (2)$$

где t – время; K_n – кратность полиспаста; Δ_b – изменение длины стрелы.

Каждая ветвь стропа представлена в модели отдельным УДЭ, учитывающем механические свойства самой стропы и каната полиспаста средней для рассматриваемой задачи длины.

Воздействие верхней ветви грузового каната на секцию № 3 представлено силой S_k :

$$S_k = R_n / K_n \zeta_n \text{ – при подъеме груза;} \quad (3)$$

$$S_k = R_n \zeta_n / K_n \text{ – при опускании груза,}$$

где R_n – реакция подшипников верхнего блока полиспаста, ζ_n – коэффициент полезного действия полиспаста.

Способ управления выдвижением секций

Для выдвижения и втягивания секций с заданной скоростью V усилие ГЦ F_h задано формулой

$$F_h = \gamma_0 + \gamma_1 (V - v_2), \quad (4)$$

где $\gamma_0 = F_{h0} \sin(\pi t / 2t_0)$ при $t \in [0, t_0]$;

$\gamma_0 = F_{h0} + (F_{hL} - F_{h0})t / T_0$ при $t \in [t_0, T_0]$, при этом

$$\gamma_0 = F_{h0} \text{ при } t \geq T_0. \quad (5)$$

Здесь F_{h0} и F_{hL} – значения силы F_h , необходимые для выдвижения секций при $y = 0$ и $y = L_0$; y – продольная координата секции № 2; L_0 – величина необходимого выдвижения ГЦ; v_2 – текущая скорость выдвижения секции № 2; t_0 – длительность плавного

возрастания силы F_h от 0 до F_{h0} ; γ_1 – коэффициент пропорциональности; T_0 – время телескопирования.

Уравнение (4) соответствует замкнутой схеме управления, поскольку учитывает фактическую скорость выдвигания секции № 2.

В компьютерной модели зависимости (1)–(5) созданы с использованием мастера связи с внешними библиотеками.

Программа моделирования телескопирования груза

Рассмотрим телескопирование груза на расстояние Δ_b синхронным выдвиганием секций. Для удлинения стрелы на величину Δ_b необходимо выдвигание ГЦ на величину L_o . Для трехсекционной стрелы с канатным механизмом $L_o = \Delta_b / 2$.

Представим скорость выдвигания секции № 2 V как функцию времени t . Правила эксплуатации [9] ограничивают скорость выдвигания ГЦ величиной 0,25 м/с.

Пусть при одноэтапном телескопировании

$$V = V_m \sin(k_1 t), \quad (6)$$

где V_m – максимальная скорость выдвигания ГЦ.

Тогда перемещение секции № 2 y определяется формулой $y = (V_m / k_1)[1 - \cos(k_1 t)]$.

Если заданы перемещение ГЦ L_o и время телескопирования T_0 , то $k_1 = \pi / T_0$, $V_m = \pi L_o / 2 T_0$.

Если заданы L_o и V_m , то вычислим $T_0 = \pi L_o / 2 V_m$

и $k_1 = 2V_m / L_o$.

Ускорение секции № 2 определяется формулой $a = V_m k_1 \cos(k_1 t)$. Максимальной величины $a_{max} = \pi V_m / T_0$ ускорение секции № 2 достигает в начале и конце движения (при $t = 0$, $t = T_0$).

При трехэтапном телескопировании с постоянными ускорением и замедлением на 1 и 3 этапах:

$$V = V_m t / t_1 \text{ при } t \in [0, t_1];$$

$$V = V_m \text{ при } t \in [t_1, t_1 + t_2]; \quad (7)$$

$$V = V_m [1 - (t - t_1 - t_2) / t_3] \text{ при } t \in [t_1 + t_2, T_0].$$

Здесь t_1 , t_2 и t_3 – длительности 1, 2 и 3 этапов.

Если заданы длины трех участков выдвигания y_1 , y_2 и y_3 ($L_o = y_1 + y_2 + y_3$) и V_m , то вычислим длительности этапов и время телескопирования:

$$t_1 = 2y_1 / V_m, \quad t_2 = y_2 / V_m, \quad t_3 = 2y_3 / V_m, \quad (8)$$

$$T_0 = (2y_1 + y_2 + 2y_3) / V_m.$$

Если заданы длительности этапов, то вычислим длины трех этапов и величину выдвигания ГЦ:

$$y_1 = V_m t_1 / 2, \quad y_2 = V_m t_2, \quad y_3 = V_m t_3 / 2, \quad (9)$$

$$L_o = V_m (t_1 / 2 + t_2 + t_3 / 2).$$

Максимальное ускорение $a_{max} = V_m / t_1$ или $a_{max} = V_m / t_3$ секция № 2 имеет на 1 или 3 этапе.

При трехэтапном телескопировании с переменными ускорением и замедлением на 1 и 3 этапах:

$$V = V_m [1 - \cos(\omega_1 t)] / 2 \text{ при } t \in [0, t_1]; \quad (10)$$

Таблица 1. Исходные данные для моделирования (одинаковые для всех расчетов)

Table 1. Initial data for modeling (the same for all calculations)

Наименование (и обозначение) параметра	Размерность	Значение
Масса секции № 1, 2 и 3	кг	1 200, 1 000, 800
Масса крюковой подвески с нижним блоком полиспаста	кг	300
Масса элемента каната	кг	0,27
Длина груза	м	2
Длина ветви стропа	м	1,47
Коэффициенты трения покоя и скольжения	–	0,155; 0,15
Скорость Стрибека	м/с	0,001
Коэффициент контактной жесткости опор скольжения секций	Н/м	1,0e8
Коэффициент демпфирования контакта опор скольжения секций	Н·с/м	3000
C_1 и C_2 – жесткость УДЭ канатов выдвигания и втягивания	Н/м	9,25e7; 6,1e7
μ_1 и μ_2 – коэффициенты диссипации УДЭ канатов выдвигания и втягивания	Н·с/м	5 600
Коэффициент жесткости контакта каната со шкивом	Н/м	1,0e7
Коэффициент демпфирования контакта каната со шкивом	Н·с/м	500
K_c – коэффициент сопротивления канатного блока	м	2,0e-4
Жесткость ветви стропа	Н/м	9,0e6
Коэффициент демпфирования ветви стропа	Н·с/м	140
K_n – кратность полиспаста	–	6
ζ_n – коэффициент полезного действия полиспаста	–	0,95
t_0 – длительность плавного возрастания силы F_h	с	0,5
V_m – максимальная скорость выдвигания ГЦ	м/с	0,2

$$V = V_m \text{ при } t \in [t_1, t_1 + t_2);$$

$$V = V_m [1 + \cos(\omega_2(t - t_1 - t_2))]/2$$

при $t \in [t_1 + t_2, T_0]$.

Здесь $\omega_1 = \pi/t_1$, $\omega_2 = \pi/t_3$.

Если заданы длины участков выдвижения, то длительности этапов и время телескопирования вычислим по формулам (8). Если заданы длительности этапов, то длины этапов и величину выдвижения ГЦ вычислим по формулам (9).

Максимальной величины $a_{max} = \pi V_m / 2t_1$ или $a_{max} = \pi V_m / 2t_3$ ускорение секции № 2 достигает в середине 1 или 3 этапа.

При трехэтапных режимах телескопирования для сокращения времени выдвижения необходимо сократить длительности t_1 и t_3 по сравнению с t_2 , хотя это приводит к увеличению ускорений секций и большему раскачиванию груза.

Для сравнения разных законов изменения скорости секции № 2 проведем моделирование телескопирования груза и сравним точность позиционирования стрелы, максимальное горизонтальное отклонение центра груза Δ_{max} , максимальный угол перекоса груза в вертикальной плоскости Θ_{max} . Исходные данные для моделирования приведены в табл. 1 и 2.

Рассмотрим два значения угла β : $19,2^\circ$ и 45° . При $\beta = 19,2^\circ$ груз массой 1 т можно телескопировать на 10 м, при $\beta = 45^\circ$ на 10 м можно телескопировать груз массой 2 т [9].

Помимо зависимостей (6), (7) и (10) скорость выдвижения секции № 2 V представим также как функцию перемещения секции № 2 y . Например, при одноэтапном телескопировании

$$V = V_m \sin(k_1 y). \quad (11)$$

Аналогично, в формулах (5)–(10) аргумент t необходимо заменить на y , параметры t_1, t_2, t_3 – на y_1, y_2, y_3 .

Результаты моделирования

Далее приведены зависимости максимального горизонтального отклонения центра груза Δ_{max} (м) и максимального угла перекоса груза в вертикальной плоскости Θ_{max} (рад) от длительности телескопирования T_0 (с) при $\beta = 19,2^\circ$ (рис. 4). Длина полиспафта 0,8 м постоянна во время движения. $F_{h0} = 20$ кН, $F_{hL} = 30\text{--}40$ кН, $\gamma_1 = 2,5$ МН·с/м.

Максимальная погрешность позиционирования составляет 0,8 % для одноэтапного режима, 1,0 % для трехэтапного режима с постоянным ускорением и 1,3 % для трехэтапного режима с переменным ускорением. Погрешность позиционирования обу-

Таблица 2. Величины интервалов времени t_1, t_2, t_3 трехэтапных режимов
Table 2. Values of time intervals t_1, t_2, t_3 of three-stage modes

T_0 , с	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с
2	1	0	1
5	2,5	1	1,5
10	5	1	4
20	10	2	8
28	20	2	6

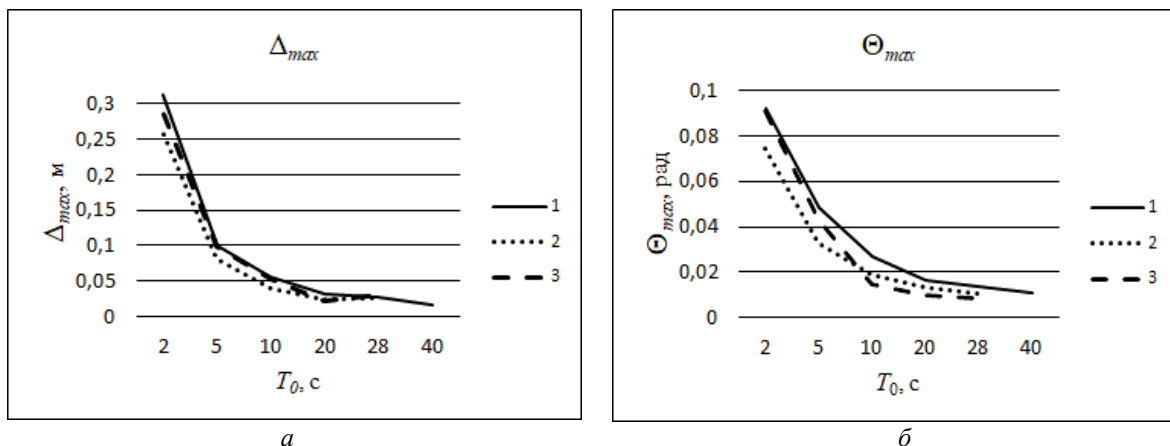


Рис. 4. Зависимости Δ_{max} (а) и Θ_{max} (б) от длительности телескопирования T_0 :
1 – одноэтапный режим; 2 – трехэтапный режим с постоянным ускорением;
3 – трехэтапный режим с переменным ускорением

Fig. 4. Dependences of Δ_{max} (a) and Θ_{max} (b) on the duration of telescoping T_0 :
1 – one-stage mode; 2 – three-stage mode with constant acceleration;
3 – three-stage mode with variable acceleration

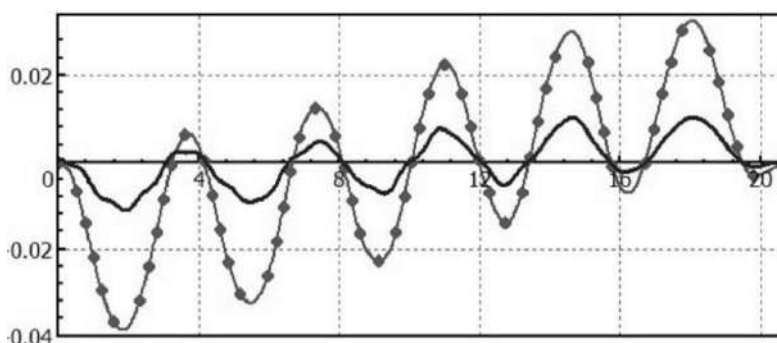


Рис. 5. Зависимости Δ (маркированная линия) и Θ от времени при $T_0 = 20$ с и $\beta = 45^\circ$

Fig. 5. Dependences of Δ (marked line) and Θ on time at $T_0 = 20$ s and $\beta = 45^\circ$

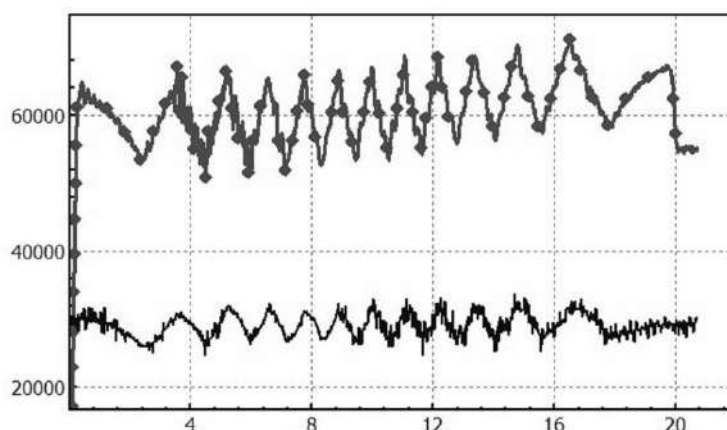


Рис. 6. Зависимости сил F_h (маркированная линия) и S_1 (Н) от времени (с) при $T_0 = 20$ с и $\beta = 45^\circ$

Fig. 6. Dependences of the forces F_h (marked line) and S_1 (N) on time (s) at $T_0 = 20$ s and $\beta = 45^\circ$

словлена отличием фактической скорости движения секций от заданной и может быть уменьшена уточнением значений F_{h0} и F_{hL} .

На (рис. 5) приведены зависимости горизонтального отклонения центра груза Δ (м) и угла перекоса груза в вертикальной плоскости Θ (рад) от времени (с) для одноэтапного режима при $T_0 = 20$ с и $\beta = 45^\circ$. Начальная длина полиспаста 2,3 м уменьшается во время движения по закону (2), а $F_{h0} = 70$ кН, $F_{hL} = 55\text{--}65$ кН, $\gamma_1 = 2,5$ МН·с/м.

Отрицательные значения Δ в первой половине движения (см. рис. 5) соответствуют отклонению груза против направления движения секций. Положительные значения Δ во второй половине движения соответствуют отклонению груза по направлению движения секций.

В начальной трети движения укорочение полиспаста небольшое, и разница перекосов и смещений груза незначительна (менее 0,5 %) по сравнению с полиспастом постоянной длины. В последней трети движения укорочение полиспаста заметное, и разница перекосов и смещений груза более существенна (Θ_{max} уменьшилось на 1,9 %, а Δ_{max} – на 14,3 %) по сравнению с полиспастом постоянной длины.

На (рис. 6) приведены зависимости изменения силы ГЦ F_h (Н) и силы растяжения каната выдвижения S_1 (Н) от времени (с) для одноэтапного режима при $T_0 = 20$ с и $\beta = 45^\circ$.

Период осцилляций силы ГЦ F_h в начале и конце движения равен 3,3 с и совпадает с периодом колебаний груза. В середине движения период осцилляций силы F_h равен 1,1 с, размах осцилляций составляет 13,4 кН, среднее значение – 60,3 кН. Силы F_h и S_1 изменяются синхронно. В начале и конце движения осцилляции силы F_h вызваны колебаниями груза, в середине движения – продольными колебаниями секций.

Общей тенденцией является снижение колебаний груза при использовании 3 режима движения по сравнению с режимами 1 и 2, хотя величины Δ_{max} и Θ_{max} в большей мере зависят от ускорения движения секций, чем от закона движения.

Для того чтобы сократить время телескопирования при трехэтапных режимах длительность 1 и 3 этапов должны быть минимальны и обеспечивать допустимые отклонения и перекосы груза. Длительность 2 этапа можно подобрать так, чтобы уменьшить колебания груза в конце телескопирования.

Зависимость скорости секции № 2 как функции перемещения y (11) замедляет движение секций по сравнению с зависимостью $V(t)$ примерно в 1,5 раза при указанных параметрах. Для сокращения времени телескопирования требуется большая разница скоростей ($V - v_2$) или большее отношение γ_0/γ_1 . В целом, использование зависимости $V(y)$ менее эффективно, чем $V(t)$.

Заключение

Разработана компьютерная динамическая модель телескопической стрелы с грузом, позволяющая определять параметры раскачивания груза на канате при различных законах управления силой ГЦ выдвигания секций с учетом механических характеристик канатов, секций и их контактного взаимодействия.

Проведено моделирование движения телескопической стрелы с грузом с одноэтапным и трехэтапными режимами управления, с зависимостью скорости выдвигания от времени и от перемещения. Моделирование показало, что максимальная погрешность позиционирования составляет 0,8 % для одноэтапного режима, 1,0 % для трехэтапного режима с постоянным ускорением и 1,3 % для трехэтапного режима с переменным ускорением. Погрешность позиционирования обусловлена отличием фактической скорости движения секций от заданной и мо-

жет быть уменьшена уточнением значений силы ГЦ F_{h0} и F_{hL} .

Общей тенденцией является снижение колебаний груза при использовании трехэтапного режима движения с переменным ускорением по сравнению с двумя другими рассмотренными режимами, хотя максимальные значения отклонения и угла перекоса груза Δ_{max} и Θ_{max} в большей мере зависят от ускорения движения секций, чем от закона движения.

Использование зависимости скорости выдвигания от перемещения $V(y)$ замедляет движение секций примерно в 1,5 раза по сравнению с зависимостью от времени $V(t)$. В целом, использование зависимости $V(y)$ для управления усилием ГЦ выдвигания менее эффективно, чем зависимости $V(t)$.

Выявлено квазипериодическое изменение силы выдвигания ГЦ F_h относительно задаваемого управления (4). В начале и конце движения осцилляции силы F_h вызваны колебаниями груза, в середине движения – продольными колебаниями секций.

Компьютерную модель и установленные закономерности телескопирования грузов целесообразно использовать при проектировании монтажных операций, осуществляемых грузоподъемными кранами с телескопическими стрелами.

Список литературы

1. An anti-swing and positioning controller for overhead cranes based on multi-sliding mode method / W. Xu, B. Liu, J. Chu et al. // *Advanced Materials Research* Vol. 468–471. P. 328–334. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.468-471.328.
2. Sorensen K., Singhose W., Dickerson S. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes // *Control Eng. Pract.* 2007. Vol. 15. P. 825–837. DOI:10.1016/j.conengprac.2006.03.005.
3. Корыгов М.С., Щербakov В.С., Титенко В.В. Аналитическое решение задачи разгона груза мостовым краном с постоянным ускорением при гашении колебаний грузового каната // *Динамика систем, механизмов и машин.* 2017. Т. 5, № 4. С. 132–135. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-132-136.
4. Singhose W., Kim D., Kenison M. Input shaping control of double-pendulum bridge crane oscillations // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2008. Vol. 130. DOI:10.1115/1.2907363.
5. Vaughan J., Kim D., Singhose W. Control of tower cranes with double-pendulum payload dynamics // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2010. Vol. 18. P. 1345–1358. DOI:10.1109/TCST.2010.2040178.
6. Saeidi H., Naraghi M., Raie A. A neural network self-tuner based on input shapers behavior for anti-sway system of gantry cranes // *Journal of Vibration and Control*. 2013. Vol. 19. P. 1936–1949. DOI: 10.1177/1077546312453065.
7. Программа ввода данных. Руководство пользователя. URL: http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/03_um_data_input_program.pdf (дата обращения 21.12.2020).
8. Шестеров Ю.В. Моделирование выдвигания секций телескопической стрелы крана // *Инновационное развитие подъемно-транспортной техники : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Брянск : Изд-во Брян. гос. техн. ун-та, 2019. С. 55–60.*
9. Кран автомобильный КС-55713-5К-1. Руководство по эксплуатации КС-55713-5К-1.00.000 РЭ. URL: <http://oaokaz.ru/catalog/avtokran/KS-55713-5K-1> (дата обращения 21.08.2020).
10. Реутов А.А. Динамическая модель полиспада механизма подъема груза // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. Курск : Юго-Запад. гос. ун-т, 2015. Т. 3. С. 391–394.*
11. Tuan L.A., Soon-Geul L., Moon S.C. Partial feedback linearization and sliding mode techniques for 2D crane control // *Transactions of the Institute of Measurement and Control covers applications in instrumentation and control.* 2014. Vol. 36. P. 78–87. DOI: 10.1177/0142331213492369.
12. Pai M.C. Closed-loop input shaping control of vibration in flexible structures via adaptive sliding mode control // *Shock and Vibration.* 2012. Vol. 19. P. 221–233. DOI: 10.1155/2012/803479
13. An optimal performance control scheme for a 3D gantry crane / M.J. Maghsoudi, Z. Mohamed, A.R. Husain et al. // *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2016. Vol. 66–67. P. 756–768. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.05.020.

14. Yang T., Singhose W. Combined input shaping and feedback control for double-pendulum systems / R. Mar, A. Goyal, V. Nguyen et al. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Vol. 85. P. 267–277. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.08.012.

15. Duc V., Trong K. Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 116. P. 310–321. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.06.056.

References

1. Xu W., Liu B., Chu J., Zhou X. An anti-swing and positioning controller for overhead cranes based on multi-sliding mode method // *Adv. Mater. Res.*, 2012. Pp. 468–471, 328–334. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.468-471.328.

2. Sorensen K., Singhose W., Dickerson S. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes [Electronic media] // *Control Eng. Pract.*, 2007. Vol. 15. Pp. 825–837. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.03.005>.

3. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Titenko V.V. Analiticheskoe reshenie zadachi razgona gruza mostovym kranom s postoyannym uskoreniem pri gashenii kolebaniy gruzovogo kanata [Analytical solution of the problem of acceleration of a load by an overhead crane with constant acceleration when damping oscillations of a cargo rope] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines], 2017. Vol. 5. No. 4. Pp. 132–135. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-132-136.

4. Singhose W., Kim D., Kenison M. Input shaping control of double-pendulum bridge crane oscillations [Electronic media] // *J. Dyn. Syst. Meas. Control – Trans. ASME*, 2008. Vol. 130. 034504–034504-7. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2907363>.

5. Vaughan J., Kim D., Singhose W. Control of tower cranes with double-pendulum payload dynamics // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2010. Vol. 18. Pp. 1345–1358. DOI: 10.1109/TCST.2010.2040178.

6. Saeidi H., Naraghi M., Raie A. A neural network self-tuner based on input shapers behavior for anti-sway system of gantry cranes // *J. Vib. Control*, 2013. Vol. 19. Pp. 1936–1949. DOI: 10.1177/1077546312453065.

7. Programma vvoda dannykh. Rukovodstvo pol'zovatelya [Data input program. User's manual] [Electronic media]. URL: http://www.universalmechanism.com/download/80/en/03_um_data_input_program.pdf (Accessed December 21, 2020).

8. Shesterov Yu.V. Modelirovaniye vydvizheniya sektsii teleskopicheskoi strely krana [Modeling the extension of sections of a telescopic boom of a crane] // *Innovatsionnoye razvitiye pod'emno-transportnoi tekhniki: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Innovative development of lifting and transport equipment: materials of the All-Russian scientific-practical conf.]. Bryansk: Bryansk State Technical University Publ., 2019. Pp. 55–60.

9. Kran avtomobil'nyi KS-55713-5K-1. Rukovodstvo po ekspluatatsii KS-55713-5K-1.00.000 RE [Automobile crane KS-55713-5K-1. Operating manual KS-55713-5K-1.00.000 RE] [Electronic media]. URL: <http://oakaz.ru/catalog/avtokran/KS-55713-5K-1> (Accessed August 21, 2020).

10. Reutov A.A. Dinamicheskaya model' polispasta mekhanizma pod'ema gruza: sb. nauch. tr. XII Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. «Sovremennyye instrumental'nye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii» 19–20 marta 2015. [The dynamic model of the chain hoist mechanism for lifting the load] // [Scientific works of the XII-th Intern. Scientific and Practical. Conf. "Modern instrumental systems, information technology and innovation" March 19–20, 2015]. Kursk: South-West State University, 2015. Vol. 3. Pp. 391–394.

11. Tuan L.A., Soon-Geul L., Moon S.C. Partial feedback linearization and sliding mode techniques for 2D crane control. *Trans. Inst. Meas. Control*, 2014. Vol. 36. Pp. 78–87.

12. Pai M.C. Closed-loop input shaping control of vibration in flexible structures via adaptive sliding mode control. *Shock Vib.*, 2012. Vol. 19. Pp. 221–233.

13. Maghsoudi M.J., Mohamed Z., Husain A.R., Tokhi M.O. An optimal performance control scheme for a 3D gantry crane. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2016. Vol. 66–67. Pp. 756–768.

14. Mar R., Goyal A., Nguyen V., Yang T., Singhose W. Combined input shaping and feedback control for double-pendulum systems. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2017. Vol. 85. Pp. 267–277.

15. Duc V., Trong K. Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2019. Vol. 116. Pp. 310–321.

Информация об авторах

Реутов Александр Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и оборудования, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, e-mail: bgtu2012@yandex.ru

Information about the authors

Aleksandr A. Reutov – Doctor of Engineering Science, Professor, the Subdepartment of Transport and Handling Machines and Equipment, Bryansk State Technical University, Bryansk, e-mail: bgtu2012@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).32-43

УДК 621.924.93

Разработка и исследование математической модели установки гидроабразивной резки

Ш. С. Нозирзода ✉

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, Российская Федерация

✉ shoni_1997@mail.ru

Резюме

В настоящее время в промышленности существуют различные методы раскроя материалов. В основном эти методы используются в заготовительном производстве. Однако появляются прогрессивные технологии, которые применяются почти во всех отраслях промышленности. Одним из таких методов является технология гидроабразивной резки. При гидроабразивной обработке не всегда удается получить нужную точность и качество изделия. Оптимизация параметров, влияющих на процесс обработки при гидроабразивной резке, для повышения качества и точности является актуальной задачей. Цель данной работы – теоретическое исследование, моделирование установки и динамических процессов гидроабразивной резки. В данной работе применен метод сравнительного анализа – метод сопоставления двух и более объектов исследования (явлений, предметов, идей, результатов и т. п.). По поставленным задачам, разработана математическая модель гидроабразивной установки, которая реализована в программном продукте MatLab. Для составленной математической модели был произведен расчет диапазона значений параметров системы. В результате теоретических исследований влияния параметров системы на вибрационные характеристики был найден вариант установки параметров, при котором наблюдались минимальные вибрации заготовки и режущей головки. В дальнейшем планируется провести модернизацию установки гидроабразивной резки как в механической части, так и в части управления. В первом случае предусматривается обеспечение жесткости системы перемещения, во втором случае будет введен контроль деформации направляющих в зависимости от зоны обработки.

Ключевые слова

гидроабразивная обработка, качество изделия, режим резки, математическая модель гидроабразивной установки, динамические процессы

Для цитирования

Нозирзода Ш.С. Разработка и исследование математической модели установки гидроабразивной резки / Ш.С. Нозирзода // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 32–43. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).32-43

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.02.2021, поступила после рецензирования: 15.02.2021, принята к публикации: 21.02.2021

Development and research of a mathematical model of a waterjet cutting plant

Sh. S. Nozirezoda✉

Yaroslav the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod, the Russian Federation

✉ shoni_1997@mail.ru

Abstract

Currently, there are various methods of cutting materials in the industry. These methods are mainly used in blank production. But recently there appear progressive technologies that are used in almost all industries. One of these methods is the technology of waterjet cutting. With waterjet processing, it is not always possible to obtain the desired accuracy and quality of a product processed. Improving the accuracy and quality of the parts obtained by waterjet cutting, significantly reduce the cost of the manufactured part. In this regard, optimizing the parameters that affect the processing workflow in waterjet cutting in order to improve quality and accuracy is currently an urgent task. The purpose of this work is a theoretical study, modeling of the plant and dynamic processes of waterjet cutting. The method of comparative analysis is applied in this paper – the method of comparing two or more objects of research (phenomena, objects, ideas, results, etc.). According to the tasks set, a mathematical model of a waterjet cutter plant has been developed, which is implemented in the MatLAB software product. For the compiled mathematical model, the range of values of the system parameters was calculated. As a result of theoretical studies of the influence of the system parameters on the vibration characteristics, a variant of setting the parameters was identified, in which minimal vibrations of the workpiece and the cutting head were observed. In the future, it is planned to modernize the waterjet cutting unit, both in the mechanical part and in the control part. In the mechanical part of the plant, the displacement system rigidity is provided. In the control system of the plant, the guides' deformation control will be introduced depending on the processing zone.

Keywords

waterjet processing, product quality, cutting mode, mathematical model of the waterjet cutting plant, dynamic processes

For citation

Nozirezoda Sh. S. Razrabotka i issledovanie matematicheskoi modeli ustanovki gidroabrazivnoi rezki [Development and research of a mathematical model of a waterjet cutting plant]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 32–43. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).32-43

Article Info

Received: 12.02.2021, Revised: 15.02.2021, Accepted: 21.02.2021

Введение

В машиностроении существует много видов технологии обработки материалов. Способы технологии обработки материалов могут быть электрофизическими и электрохимическими. Это способы, которые позволяют разделить (раскроить) материалы, их достаточно большое количество.

В промышленности существуют различные методы раскроя материалов. В основном эти методы используются в заготовительном производстве. Однако появляются прогрессивные технологии, которые применяются почти во всех отраслях промышленности. Одним из таких методов является технология гидроабразивной резки. При гидроабразивной обработке не всегда удается получить нужную точность и качество изделия. Оптимизация параметров, влияющих на процесс обработки при гидроабразивной резке, для повышения качества и точности в настоящее время является актуальной задачей [1].

Главным преимуществом технологии гидроабразивной обработки заключается в том, что можно обрабатывать практически все виды материалов. Важно отметить, что гидроабразивная резка альтернатива не только механической, но и лазерной, плазменной, а также ультразвуковой резке, а в некоторых случаях она является единственно возможной.

Рабочая среда в данном процессе – вода с водородными показателями pH – нейтральная, под давлением 3–4 кг/см². Режущий инструмент на гидроабразивной установке – струя смеси рабочей среды с абразивом. В качестве абразива в данной работе применен гранатовый песок марки Mesh 80. Расход воды 5 л / мин, а расход абразива 400 г / мин.

Метод решения задачи и принятые допущения

Целью данной работы является исследование влияния жесткости конструкции на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки, и разработка математической модели.

Объектом исследования является взаимосвязь

конструктивных особенностей технологического оборудования и технологических параметров, влияющих на точность и качество обработки деталей при гидроабразивной резке.

Предмет исследования – влияние жесткости конструкции на точность и качество деталей, полученных на установке гидроабразивной резки.

При выполнении данной работы применялись следующие методы исследования: сравнительный анализ, моделирование, синтез, эксперимент, наблюдение, измерение, сравнение, описание.

Разработка математической модели и анализ параметров установки

В данной работе применяется метод представления процессов в системах из самих систем в переменных «вход – выход», т. е. которые реально действуют на систему. Рассматривается влияние измеряемых физических переменных, характеризующих динамические процессы. Данный метод позволяет более точно определить состояние устойчивости системы. В данной работе рассматривается теоретическое исследование и моделирование установки и динамических процессов гидроабразивной резки. Внешний вид гидроабразивной установки и ее расчетная схема приведены (рис. 1). Составленная расчетная схема описывает элементы конструкции установки.

Данная система состоит из шести компонентов массы: m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , m_5 и m_6 . В данной вибрационной системе, которая описывает гидроабразивную установку, масса m_1 – заготовка, m_2 – основание, m_6 – режущая головка, m_5 – порталная система перемещения, т. е. направляющие (балка), m_3 и m_4 – стойки. Определены параметры элементов, входящих в состав структурной схемы. Масса m_1 – заготовка ложится на установочную решетку с жесткостью C_1 и коэффициентом демпфирования h_1 . Жесткость решеток была определена экспериментальным путем. Основание стоит на 8 опорах с жесткостью C_2 (рис. 2).

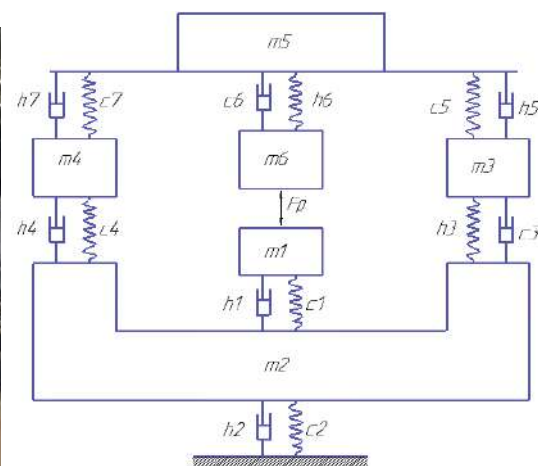


Рис. 1. Внешний вид гидроабразивной установки и расчетная схема
Fig. 1. The appearance of the waterjet plant and the design scheme

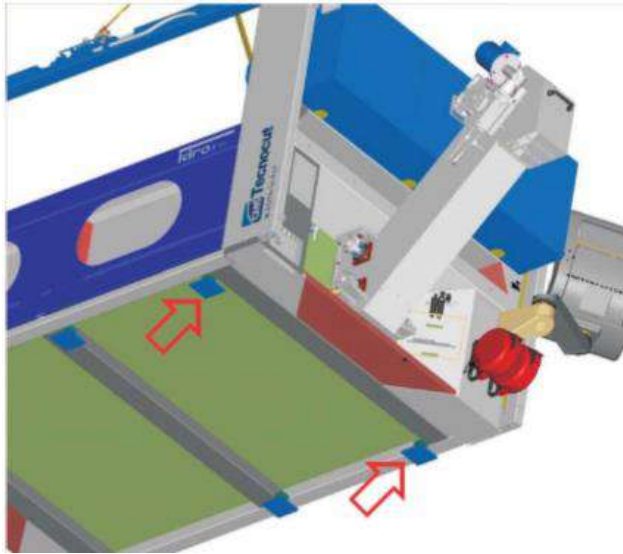


Рис. 2. Положение винтовых опор в конструкции гидроабразивной резки

Fig. 2. The position of the screw supports in the waterjet cutting structure

Приближенное значение жесткости опор винта:

$$j_0 = e d_0 \text{ (Н/мкм)}, \quad (1)$$

где $e = 5; 10; 30$ соответственно для радиально упорных, шариковых и роликовых упорных подшипников; d_0 – диаметр винта, мм [2].

Декремент затухания рассчитывается по графику затухающих колебаний. Для колебательных систем с вязким трением (сила сопротивления пропорциональна скорости движения) – физической величиной, определяющей характер колебаний, является коэффициентом демпфирования.

$$h = \frac{c}{2\sqrt{mk}}, \quad (2)$$

где c – коэффициент силы сопротивления движению; k – коэффициент упругости; m – масса подвижного груза.

При коэффициенте демпфирования меньше 1 колебательная система будет плавно затухать, чем меньше будет коэффициент, тем дольше будут длиться колебания. При коэффициенте равном 1 или больше никаких колебаний система испытывать не будет, а просто плавно будет стремиться к нулевому положению [3].

Масса m_b включает режущую головку. Режущая головка состоит из заправочной емкости и системы подачи и смешивания воды с абразивом, сопло, шланги для транспортировки воды и абразив. Между массой m_b и m_1 находится зона, где происходит обработка материалов. Тут возникает сила резания или сила резки, которая является внешним воздействием в данной вибрационной системе.

Сила резания при гидроабразивной обработки рассматривается как сила воздействия гидромониторной струи на вертикальную преграду [4], которая рассчитывается по формуле (3).

В процессе гидроабразивной обработки водяные струи оказывают гидродинамическое воздействие на обрабатываемые поверхности. Ударная сила струи, истекающей из сопла, теоретически равна

$$F_t = m \cdot \vartheta = \rho \cdot S \cdot \vartheta^2, \quad (3)$$

где F_t – сила удара струи в заготовку, Н; m – секундный расход воды, кг/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; S – площадь поперечного сечения струи, м²; ϑ – скорость вылета струи из сопла, м/с.

На достаточно близких расстояниях от сопла, где влияние трения струи о воздух и рассеивание воды в окружающую среду не столь заметны, сила воздействия струи на поверхности заготовки будет приблизительно равна теоретической величине, определяемой по уравнению (3). С дальнейшим увеличением расстояния между соплом и преградой сила воздействия струи постепенно уменьшается. Так как при гидроабразивной обработке расстояние от сопла до заготовки небольшое, применяем данную формулу для расчета силы резания.

Средняя скорость вылета струи V – средняя скорость набегания потока на тело:

$$V = \frac{G_{ж}}{S}, \quad (4)$$

где $G_{ж}$ – расход жидкости.

Расход жидкости находится по формуле:

$$G_{ж} = G_b + G_a, \quad (5)$$

где G_b – расход воды; G_a – расход абразива; S – площадь миделева сечения (площадь проекции тела на плоскость, нормальную к вектору скорости воды) –

$$S = \pi \cdot R^2, \quad (6)$$

где R радиус сопла.

Плотность смеси воды и абразива равна:

$$\rho_{ж} = \frac{m_b + m_a}{\frac{m_b}{\rho_b} + \frac{m_a}{\rho_a}}, \quad (7)$$

где m_b – масса воды, m_a – масса абразива, ρ_b – плотность воды, ρ_a – плотность абразива.

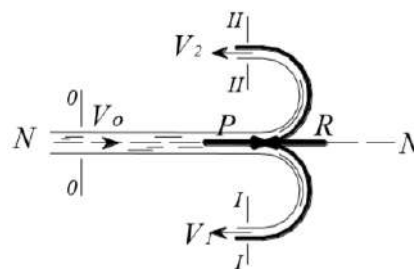


Рис. 3. Силы давления струи на криволинейную симметричную преграду

Fig. 3. Forces of the pressure of the jet on a curved symmetrical barrier

По данной схеме, когда струи направлены прямо на поверхность заготовки (рис. 3), сила давления P достигает максимума. Если струя будет направлена под углом, то в формуле вместо 2 будет соответствующий коэффициент [5]. Данный коэффициент

зависит от синуса угла наклона струи.

Сила резания в двух случаях отличается. В случае устойчивого резания величина силы резания будет уменьшаться, и зависит она от физико-механических свойств обрабатываемого материала, колебания давления струи, равномерности подачи абразива и сопла, формы зерна, режима, течения воды, трения воды и абразива и многих других факторов. Закон изменения силы резания в процессе обработки (рис. 4) необходимо определить экспериментальным путем.

Гидроабразивную струю можно рассматривать как твердый режущий абразивный инструмент, который имеет определенный диаметр. В формировании поверхности при гидроабразивной обработке можно заметить, что участвует лишь небольшой сектор режущей струи (рис. 5).

В большинстве работ, посвященных изучению зависимости длины начального участка, струи от исходных параметров, приводятся различные аналитические зависимости, в которых влияние исходных параметров струи на безразмерную длину начального участка l_n/d_0 выражается при помощи числа Рейнольдса Re . Эти зависимости имеют одно общее свойство: выраженная в них функциональная связь

$l_n/d_0 = f(Re)$ отражает постепенное уменьшение безразмерной длины начального участка с увеличением числа Re в пределах $(1,0-3,0) \cdot 10^6$.

Жесткость в любой конструкции считается важным параметром, особенно при шарико-винтовых передачах. К жесткости передачи можно отнести жесткость пары «винт – гайка», дорожек качения с шариками и жесткость самого винта. Считается, что жесткость дорожек качения и шариков можно объединить в общую жесткость, характеризующую гайку. Это значение представлено в таблицах как основная характеристика гаек.

Для определения коэффициента демпфирования передача «винт – гайка» рассматривается в виде спирали, которая сделана из проволоки с круговым сечением. Если рассматривать деформацию пружины как совокупность элементарных сдвигов в ее объеме под воздействием сил упругости, то коэффициент упругости можно вычислить при помощи формулы:

$$k = \frac{r^4 * G}{4 * R^3 * n}, \quad (8)$$

где R – радиус пружины, n – количество витков в пружине, r – радиус проволоки, G – модуль сдвига (постоянная, которая зависит от материала).

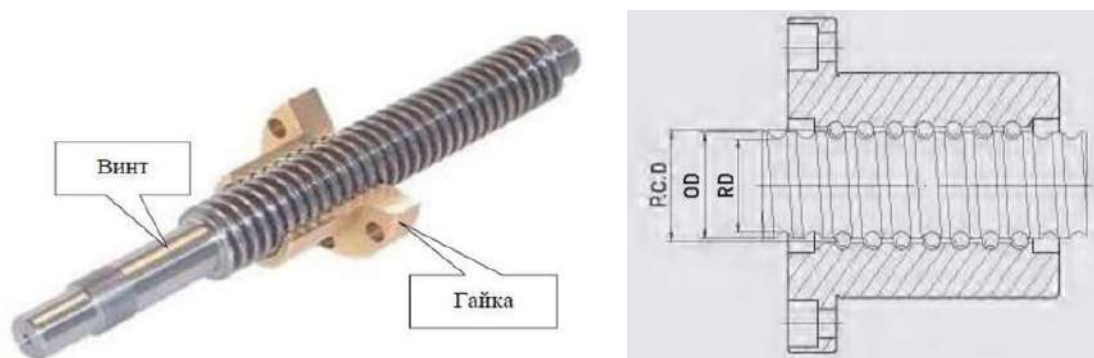


Рис. 4. Шарико-винтовая передача

Fig. 4. Ball-screw transmission

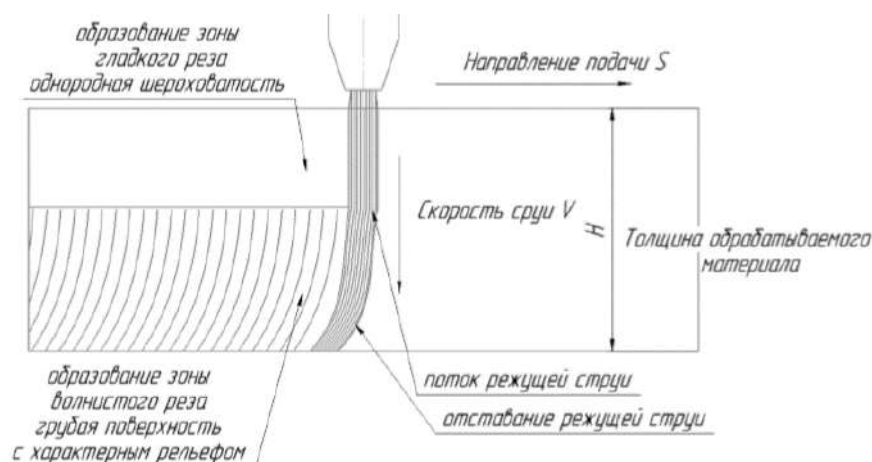


Рис. 5. Процесс обработки при гидроабразивной резки

Fig. 5. The treatment process in waterjet cutting

$$a_1 = \frac{F_p - c_1 \cdot (X_1 - X_2) - h_1 \cdot (V_1 - V_2)}{m_1}, \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{h_1 \cdot (V_1 - V_2) + c_1 \cdot (X_1 - X_2) + c \cdot (X_3 - X_2) + h_3 \cdot (V_3 - V_2) + c_4 \cdot (X_4 - X_2) + h_4 \cdot (V_4 - V_2) - h_2 \cdot V_2 - c_2 \cdot X_2}{m_2}, \quad (10)$$

$$a_3 = \frac{c_5 \cdot (X_5 - X_3) + h_5 \cdot (V_5 - V_3) - c_3 \cdot (X_3 - X_2) - h_3 \cdot (V_3 - V_2)}{m_3}, \quad (11)$$

$$a_4 = \frac{c_7 \cdot (X_5 - X_4) + h_7 \cdot (V_5 - V_4) - c_4 \cdot (X_4 - X_2) - h_4 \cdot (V_4 - V_2)}{m_4}, \quad (12)$$

$$a_5 = \frac{c_6 \cdot (X_6 - X_5) + h_6 \cdot (V_6 - V_5) - c_5 \cdot (X_5 - X_3) - h_5 \cdot (V_5 - V_3) - c_7 \cdot (X_5 - X_4) - h_7 \cdot (V_5 - V_4)}{m_5}, \quad (13)$$

$$a_6 = \frac{F_p - c_6 \cdot (X_6 - X_5) - h_6 \cdot (V_6 - V_5)}{m_6}. \quad (14)$$

Масса m_5 является направляющей, на которой установлена режущая головка. Масса m_5 включает в себя массу балки и кожух для защиты. Массы m_3 и m_4 являются стойками, на которых установлена балка, а стойки в свою очередь установлены на основании.

Для массы m_1 , которая является в данной системе заготовкой, сила резания действует как внешние воздействия. Остальные силы – силы упругости

установочной решетки с жесткостью C_1 , силы демпфирования и инерции тел m_1 будут обратной связью направлены в противоположные внешние силы. Величина силы F_{c1} будет равна произведению коэффициента жесткости C_1 и разности между перемещением тел m_1 и m_2 , так как решетка с жесткостью C_1 находится между этими телами.

Расставлены силы, действующие на системы. Составлен баланс сил каждого тела. Исходя из ба-

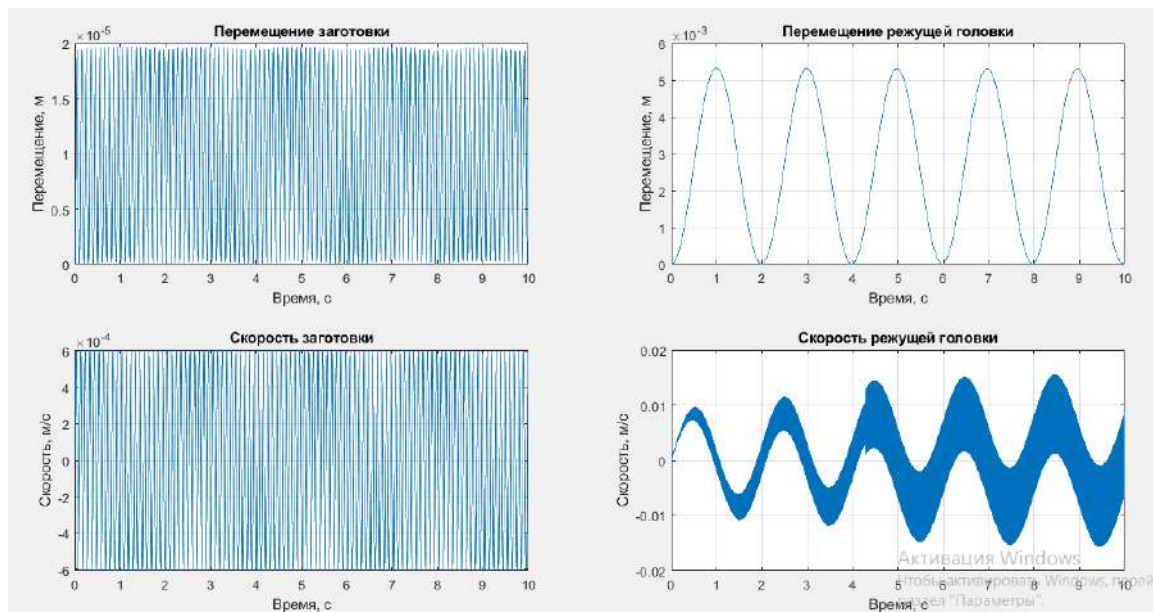


Рис. 6. Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при оптимальных вариантах параметров

Fig. 6. Graphs of the movement and speed of the workpiece and the cutting head with optimal variants of parameters

ланса каждого тела, получена математическая модель в виде следующих систем уравнений:

Полученная математическая модель задается в среде MatLab. Таким образом, решаются данные уравнения в среде MatLab с помощью, составленной в этой же среде программы.

В данной вибрационной системе рассматриваются колебания и скорости перемещения заготовки $m1$ и режущие головки $m6$. Так как именно эти параметры влияют на точность и качество обработки. Исходя из разработанной математической модели и полученных графиков можно отметить, что на колебания заготовки с массой $m1$ влияет жесткость установочной платформы $C1$, а на амплитуды и скорости перемещения режущей головки оказывает влияние жесткость передачи «винт – гайка» $C6$. Но с другой стороны в данной вибрационной системе большое влияние оказывает жесткость направляющих $C5$ и $C7$. Данные параметры влияют на поведение системы в целом. По проведенному анализу получены графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при оптимальных вариантах параметров (рис. 6).

В данной работе также были выявлены амплитудно-частотные характеристики вибрационной системы. Для определения амплитудно-фазовых частотных характеристик системы необходимо найти передаточную функцию, которая равна

$$W(p) = \frac{\text{вых.}}{\text{вход.}} = \frac{Fp}{X_1}, \quad (15)$$

$$W(p) = \frac{\text{вых.}}{\text{вход.}} = \frac{Fp}{X_6}. \quad (16)$$

В данной системе передаточная функция выражается двумя уравнениями. Это связано с тем, что сила резания как внешнее воздействие оказывает свое влияние сразу на заготовку с массой $m1$ и на режущую головку с массой $m6$. Полученные амплитудно-частотные характеристики системы показали, что она является устойчивой.

Исследование математической модели

Использование моделей и моделирования при исследованиях динамических систем дает возможность решить сложные задачи проектирования технологического оборудования [6-9]. Моделирование с помощью программного обеспечения MatLab имеет свои недостатки по сравнению Simulink. Simulink дает возможность наглядно и схематично представить математическую модель, в среде Simulink также можно получить более точные результаты.

В данной работе были определены оптимальные параметры для гидроабразивной установки, проведен спектральный анализ системы, выявлены амплитудно-частотные характеристики для заготовки и режущей головки.

Далее приведены графики перемещения заготовки и режущей головки без изменения параметров системы соответственно 50, 100 и 500 кг (рис. 7–9).

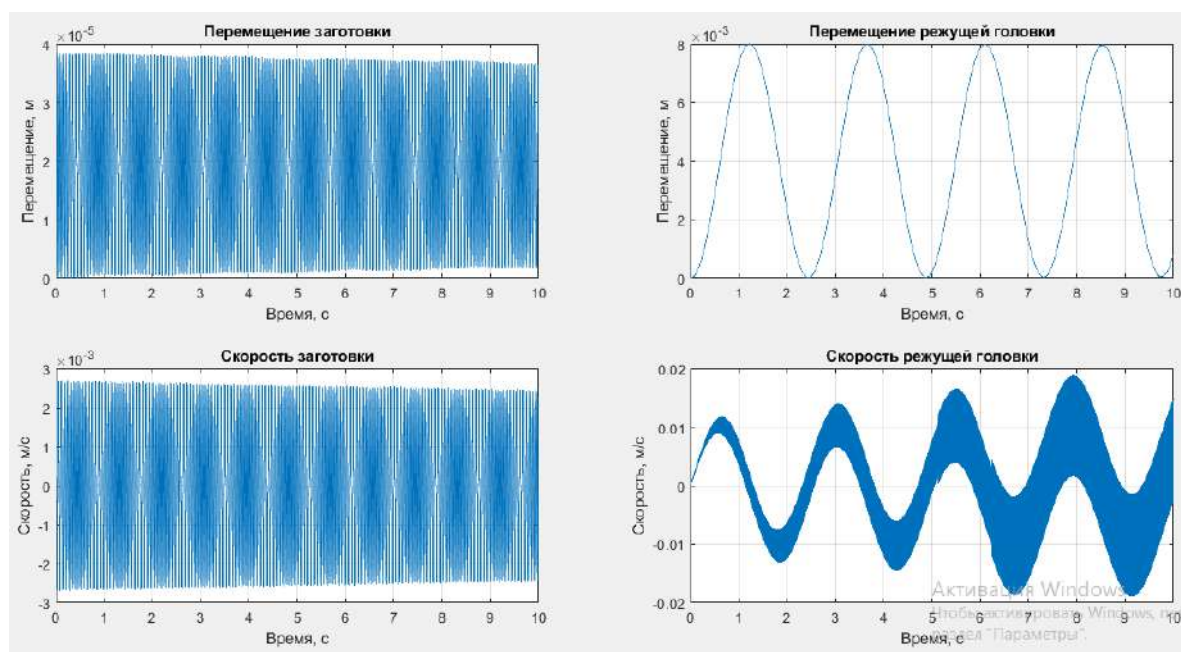


Рис. 7. Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при массе 50 кг
Fig. 7. Graphs of the movement and speed of the workpiece and the cutting head at a weight of 50 kg

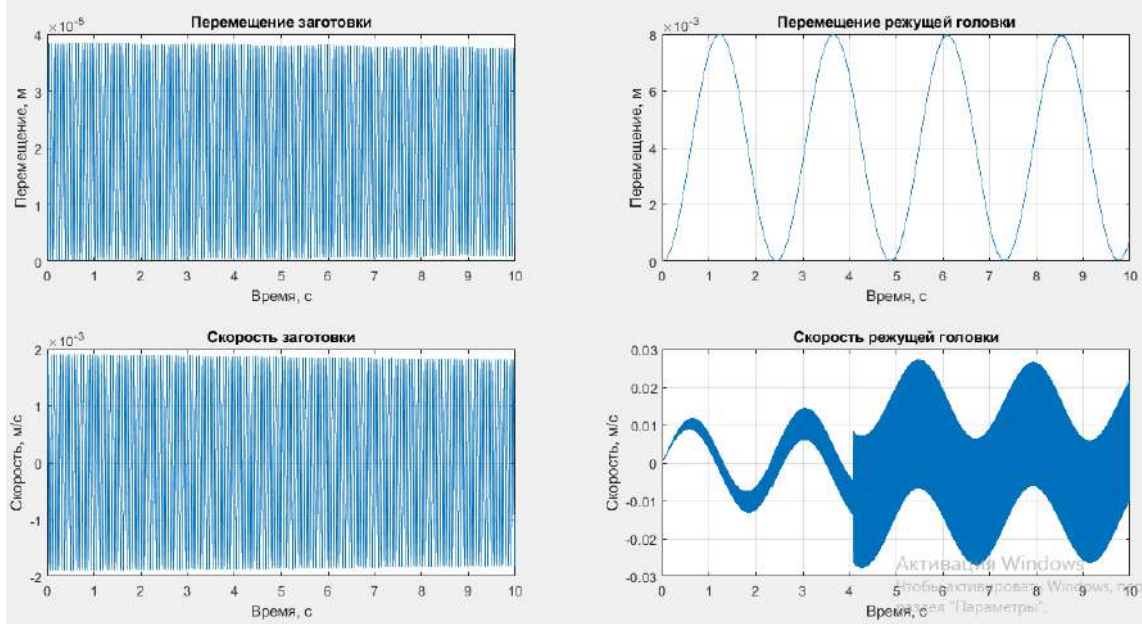


Рис. 8. Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при массе 100 кг
Fig. 8. Graphs of the movement and speed of the workpiece and the cutting head at a weight of 100 kg

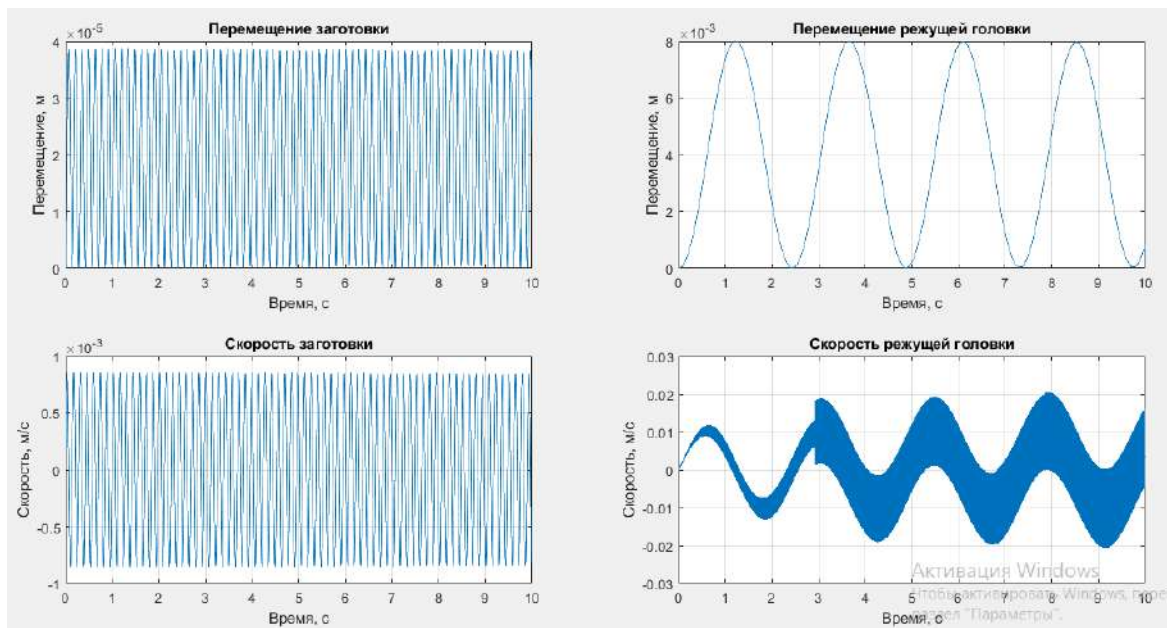


Рис. 9. Графики перемещения и скорости заготовки и режущей головки при массе 500 кг
Fig. 9. Graphs of the movement and speed of the workpiece and the cutting head at a weight of 500 kg

На амплитуду колебания заготовки и режущей головки, которая в данной системе должна быть минимальной, влияет много факторов [10-17]. Важно отслеживать колебания режущей головки в данной установке. Величина амплитуды ее колебания напрямую влияет на точность обработки. При анализе параметров были рассмотрены жесткости: передачи «винт – гайка», направляющей и установочной платформы. Сила резания рассматривается как величина постоянная, она зависит от скорости выле-

та струи, давления и плотности смеси воды с абразивом. Изменяя данные параметры, сила резания может меняться в пределах малых значений.

Масса самой заготовки в данной системе также играет очень важную роль. Некоторые заготовки на установочной платформе при гидроабразивной обработке не закрепляются, т. е. в таком случае жесткость установочной платформы остается неизменной. Однако если масса заготовки недостаточная и вызывает большие колебания в системе, то необходимо закреп-

пить заготовку на установочной платформе. В данной ситуации жесткость установочной платформы в разы увеличивается. С целью изучения влияния массы заготовки на колебания самой заготовки в данной системе были рассмотрены разные заготовки на устано-

вочной платформе. Далее приведены графики перемещения и скорости первого и четвертого тела при оптимальных вариантах параметров при массе заготовки соответственно 50, 100 и 500 кг (рис. 10–12).

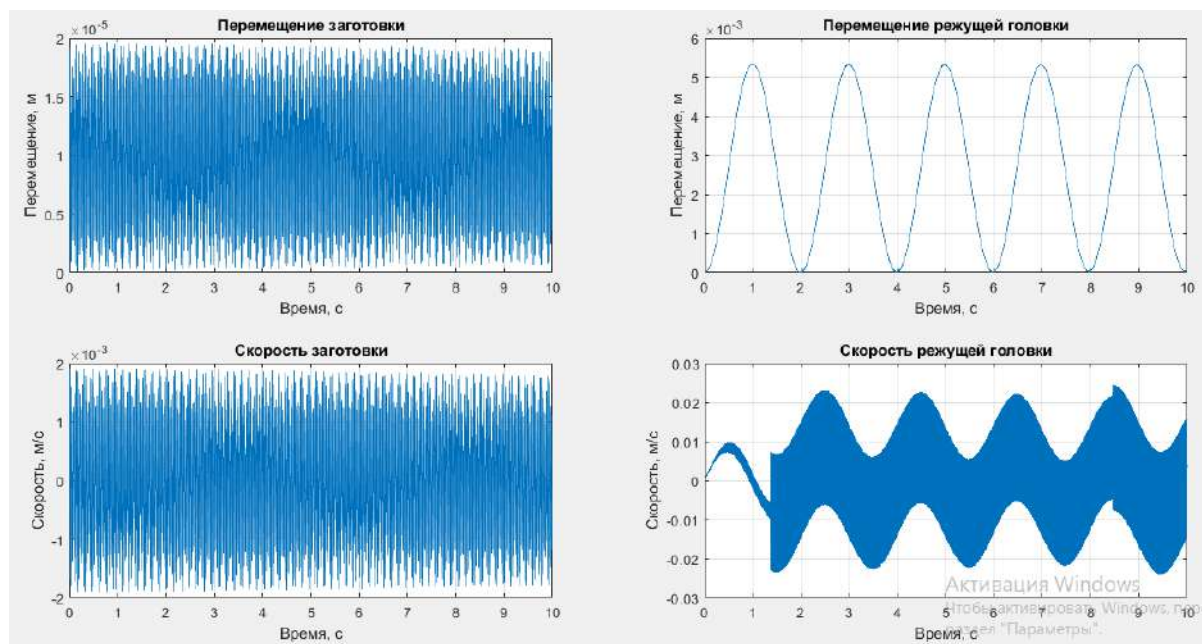


Рис. 10. Графики перемещения и скорости заготовки режущей головки при оптимальных вариантах параметров при массе 50 кг

Fig. 10. Graphs of the movement and speed of the cutting head workpiece with optimal variants of parameters at a weight of 50 kg

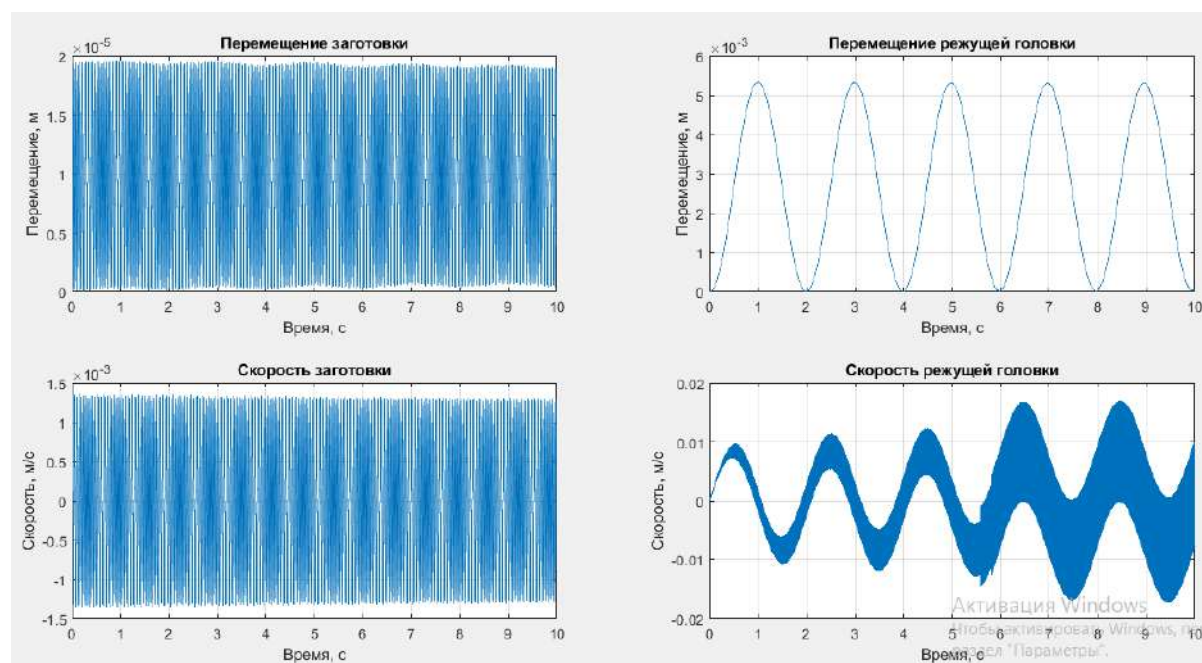


Рис. 11. Графики перемещения и скорости заготовки, режущей головки при оптимальных вариантах параметров и массе 100 кг

Fig. 11. Graphs of the movement and speed of the workpiece, the cutting head with optimal variants of parameters and a weight of 100 kg

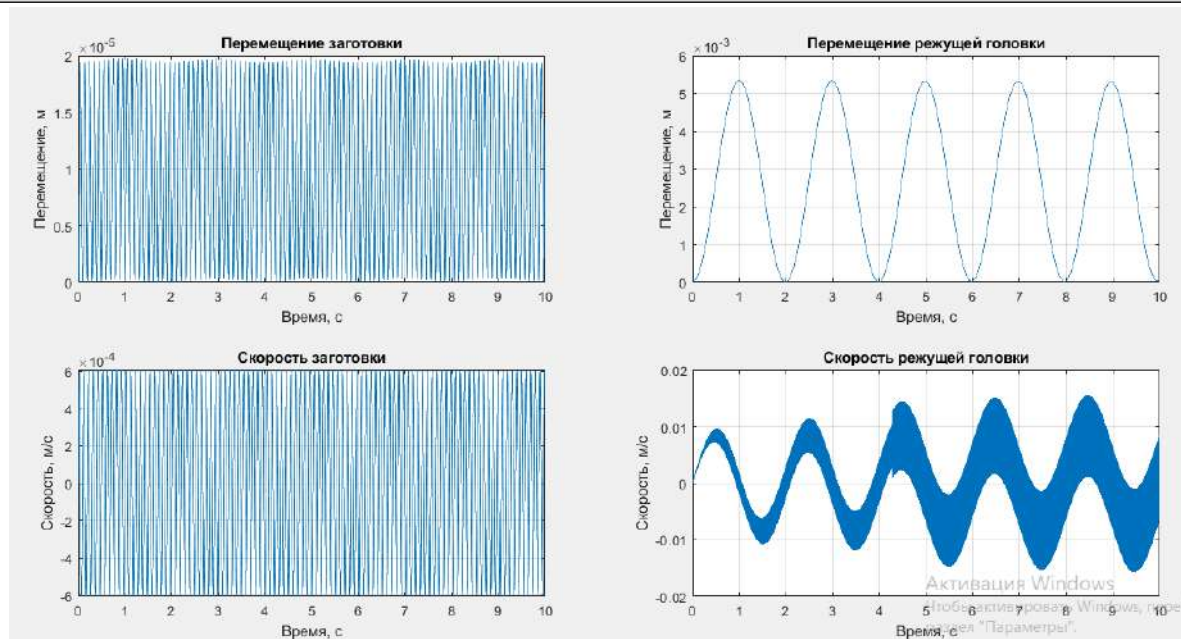


Рис. 12. Графики перемещения и скорости заготовки, режущей головки при оптимальных вариантах параметров при массе 500 кг

Fig. 12. Graphs of the movement and speed of the workpiece, the cutting head with optimal variants of parameters at a weight of 500 kg

Заключение

Таким образом, увеличение жесткости направляющей, установочной решетки и изменение конструкции режущей головки приведет к уменьшению колебания заготовки на установочной платформе и режущей головке. Именно оптимизация параметров данных элементов в конструкции гидроабразивной установки приведет к повышению точности и качества обработки.

Одним из важнейших параметров обработки при гидроабразивной резке является давление струи, от которого зависят многие другие параметры, например, средняя скорость струи. Исходя из основы гидродинамики, можно отметить, что чем выше давление струи, тем больше будет скорость струи, в результате чего создается кинетическая энергия и обрабатывается слой материала, но когда струя разре-

зает слой материала, кинетическая энергия потихоньку уменьшается, и в результате этого происходит отклонение и изменяется качество обработки.

Рассматривая процесс формирования поверхности заготовки и качество обработки в разных зонах резания при разных режимах обработки, можно отметить, что на качество поверхности заготовки при гидроабразивной резке влияет давление струи, скорость подачи струи и местоположение заготовки на установочной платформе. Увеличение скорости подачи струи в зависимости от зоны резания на установочной платформе приводит к улучшению качества обработки. Также можно отметить, что изменение этих параметров существенно влияет на ресурс режущей головки.

Список литературы

1. Моргунов Ю.А., Федотов А.А., Швычков Д.В. Применение гидроабразивной резки при обработке сложнопольных поверхностей деталей // Главный механик. 2010. № 7. С. 24–27.
2. Гидростатическая передача винт-гайка // helpiks.org : сайт. URL: <https://helpiks.org/5-97348.html> (дата обращения: 24.09.2020).
3. Гидроабразивная резка материалов // Технологии Точного Моделирования : сайт. URL: <https://ttm66.ru/news/istoriya-gidroabrazivnoj-rezki> (дата обращения: 24.04.2019).
4. Голиков В.А., Анфиногентов В.В. Расчетная схема определения геометрических и гидродинамических характеристик водяных струй моечных машинок танкеров // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. Одесса : ОН-МА, 2011. Вып. 28. 162 с.
5. Старцев В.А. Физико-механическое обоснование параметров гидромониторной разработки россыпей направленным бурением скважин : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2018. 119 с.
6. Барсуков Г.В. Повышение эффективности гидроабразивного резания на основе дискретного регулирования состояний технологической системы : дис. ... д-ра техн. наук. Орел, 2006. 411 с.
7. Барсуков Г.В. Исследование погрешности формы при резании листовых материалов гидроабразивной струей //

Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. 2003. С. 449–455.

8. Шпилев В.В. Повышение эффективности процесса гидроабразивной резки листовых деталей путем оптимизации режимов обработки и параметров струи рабочей жидкости : дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2012. 147 с.

9. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения : учебник для вузов / В.В. Кузьмин и др. М. : Высшая школа, 2008. 279 с.

10. Керамглас : офиц. сайт. URL: <https://www.garnet-abrasive.ru/> (дата обращения: 25.09.2020).

11. Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Головин К.А. Прогрессивные технологии гидроструйного резания материалов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 318 с.

12. Harris I. D. Abrasive Water Jet Cutting and its Applications at the Welding Institute // *Welding Institute Research Bulletin*. 1988. Vol. 19. P. 42–49.

13. Бреннер В.А., Пушкарев А.Е., Головин К.А. Исследование гидроабразивного разрушения горных пород // *Экология и безопасность жизнедеятельности*. Изв. Тул. гос. ун-та. 1997. Вып. 3. С. 94–97.

14. Гидрорезание судостроительных материалов / Р.А. Тихомиров, В.Ф. Бабнин, Е.Н. Петухов и др. Л. : Судостроение, 1987. 164 с.

15. Кишко А.А., Верченко А.В. Возможности уменьшения брака при гидроабразивной резке фасонных деталей // *Высокие технологии в машиностроении : материалы Всерос. науч.-техн. интернет-конф. / отв. редактор А.Ф. Денисенко*. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2016. С. 30–32.

16. Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Михеев А.В. Повышение качества гидроабразивного резания деталей из стекло-текстолита на основе предварительного диагностирования состояния обрабатываемого материала // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2014. № 5 (307). С. 65–71.

17. Разработка технологических рекомендаций по гидроабразивному резанию стеклотекстолита / Т.А. Журавлева, Г.В. Барсуков, О.А. Короткий и др. // *Радиопромышленность*. 2014. № 4. С. 153–165.

References

1. Morgunov Yu.A., Fedotov A.A., Shvychkov D.V. Primeneniye gidroabrazivnoi rezki pri obrabotke slozhnoprofil'nykh poverkhnostei detalei [Application of waterjet cutting in the processing of complex-profile surfaces of parts]. MSTU "MAMI" Publ.

2. Org Kh. Gidrostatischeckaya peredacha vint-gaika [Hydrostatic screw-nut transmission] [Electronic media]. URL: <https://helpiks.org/5-97348.html> (Accessed: September 24, 2020).

3. Tekhnologii tochnogo modelirovaniya. Gidroabrazivnaya rezka. Istoriya gidroabrazivnoi rezki. [Technologies of precise modeling. Hydroabrasive cutting. History of hydroabrasive cutting] [Electronic media]. URL: <https://ttm66.ru/news/istoriya-gidroabrazivnoj-rezki> (Accessed April 24, 2019).

4. Golikov V.A., Anfinogentov V.V. Raschyotnaya skhema opredeleniya geometricheskikh i gidrodinamicheskikh kharakteristik vodyanykh strui moechnykh mashinok tankerov [Design scheme for determining the geometric and hydrodynamic characteristics of water jets of tanker washing machines]. *Sudovye energeticheskie ustanovki: nauchno-tekhnicheskii sbornik*. [Ship power plants: scientific and technical collection], Issue 28. Odessa: ONMA Publ., 2011. 162 p.

5. Startsev V.A. Fiziko-mekhanicheskoe obosnovanie parametrov gidromonitornoj razrabotki rossypei napravlenym bureniem skvazhin. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Physical and mechanical justification of parameters of hydromonitor development of placers by directional drilling of wells. The Ph.D. (Engineering) diss.]. Ekaterinburg, 2018. 119 p.

6. Barsukov G.V. Povysheniye effektivnosti gidroabrazivnogo rezaniya na osnove diskretnogo regulirovaniya sostoyanii tekhnologicheskoi sistemy. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Improving the efficiency of waterjet cutting on the basis of discrete control of the technological system states. D. Sc. (Engineering) diss.]. Orel, 2006, 411 p.

7. Barsukov G.V. Issledovaniye pogreshnosti formy pri rezanii listovykh materialov gidroabrazivnoi struyoi «Tekhnologiya –2003» [Investigation of the shape error when cutting sheet materials with a hydroabrasive jet]. *Sb. tr. Mezhdunar. nauch.- tekhn. konf. «Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhnologii mashinostroeniya» [Proc. of the International sci. and tech. conf. "Fundamental and applied problems of mechanical engineering technology". "Technology –2003"]*, 2003. Pp. 449–455.

8. Shpilev V.V. Povysheniye effektivnosti protsessa gidroabrazivnoi rezki listovykh detalei putem optimizatsii rezhimov obrabotki i parametrov strui rabochei zhidkosti: dis. kand. tekhn. nauk: 05.02.08 [Improving the efficiency of the process of waterjet cutting of sheet parts by optimizing the processing modes and parameters of the working fluid jet: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.02.08]. Saratov, 2012. 147 p.

9. Kuzmin V.V. et al. Matematicheskoye modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov sborki i mekhanicheskoi obrabotki izdelii mashinostroeniya: uchebnik dlya vuzov [Mathematical modeling of technological processes of assembly and mechanical processing of mechanical engineering products: textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2008. 279 p.

10. Ofitsial'nyi sait kompanii OOO «Keramglas» [The official website of the company "Keramglas" OOO] [Electronic media]. URL: <https://www.garnet-abrasive.ru/> (Accessed September 25, 2020).

11. Stepanov Yu.S., Burnashov M.A., Golovin K.A. [Progressive technologies of hydrojet cutting of materials]. Tula: TuSU Publishing House, 2009. 318 p.

12. Harris I.D. Abrasive Water Jet Cutting and its Applications at the Welding Institute. *Welding Institute Research Bulletin*, Vol. 19, February, 1988. Pp. 42–49.

13. Brenner V.A., Pushkarev A.E., Golovin K.A. Issledovaniye gidroabrazivnogo razrusheniya gornykh porod [Investigation of hydroabrasive destruction of rocks. Ecology and life safety]. *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta], Iss. 3. Tula, 1997. Pp. 94–97.

14. Tikhomirov R.A., Banin V.F., Petukhov E.N., Starikov I.D. et al. Gidrorezanie sudostroitel'nykh materialov [Hydraulic cutting of shipbuilding materials]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1987. 164 p.

15. Kishko A.A., Marchenko A.V. Vozmozhnosti umen'sheniya braka pri gidroabrazivnoi rezke fasonnykh detalei [Possibilities of reduction of defects in abrasive waterjet cutting of formed parts]. *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii [High technologies in mechanical engineering: materials of the all-Russian scientific and technical Internet conference]*. In Denisenko A. F. (exec. ed.) Samara: Samara State Technical University Publ., 2016. Pp. 30–32.

16. Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Mikheev A.V. Povyshenie kachestva gidroabrazivnogo rezaniya detalei iz steklotekstolita na osnove predvaritel'nogo diagnostirovaniya sostoyaniya obrabatyvaemogo materiala [Improving the quality of waterjet cutting of parts made of glass fiber based on preliminary diagnostics of the state of the processed material] // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii [Fundamental and applied problems of engineering and technology]*, 2014. No. 5 (307). Pp. 65–71.

17. Zhuravleva T.A., Barsukov G.V., Korotkii O.A., Sidorov V.B. Razrabotka tekhnologicheskikh rekomendatsii po gidroabrazivnomu rezaniyu steklotekstolita [Development of technological recommendations for hydroabrasive cutting of glass fiber] // *Radiopromyshlennost' [Radio industry (Russia)]*, 2014. No. 4. Pp. 153–165.

Информация об авторах

Нозирзода Шодмон Салохидин – аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, e-mail: shoni_1997@mail.ru

Information about the authors

Shodmon S. Nozirzoda – Ph.D. student of the Subdepartment of Industrial Technologies, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, e-mail: shoni_1997@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).43-50

УДК 621.83.06

Экспериментальная оценка тепловых и шумовых характеристик редуктора со сферической роликовой передачей

Е. С. Лустенкова✉

Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь

✉ fittsova@gmail.com

Резюме

Передачи с промежуточными телами качения являются инновационной разработкой в области механических приводных систем. Они позволяют реализовывать широкий диапазон передаточных отношений при малых габаритах и массе. Передачи имеют компоновочные преимущества благодаря соосности валов и осевой симметрии основных деталей. Исследуемая сферическая роликовая передача содержит ведущий вал с наклонным участком (кривошипом), на который устанавливается сателлит. В процессе работы передачи сателлит совершает сферическое движение. Один ряд роликов, установленных на сателлите, обкатывается по неподвижной беговой дорожке, образованной сферическими кулачками, закрепленными в корпусе, второй ряд взаимодействует с беговой дорожкой ведомого сферического кулачка, вынуждая его и ведомый вал вращаться с уменьшенной скоростью. В статье приведена кинематическая схема сферической роликовой передачи с двухрядным сателлитом, рассмотрен принцип ее работы. Представлена конструкция экспериментального образца редуктора с передаточным отношением 44, рассмотрена конструкция лабораторного стенда, описаны аппаратные средства и методика испытаний. Приведены результаты экспериментальных исследований тепловых и шумовых характеристик редуктора в зависимости от кинематических и силовых факторов. Данные испытания позволили обнаружить, что термически наиболее нагруженным узлом передачи является ведущий вал с установленным на нем сателлитом, что требует дальнейшего совершенствования его конструкции. Выявлено, что при определенной частоте вращения сферические роликовые передачи по уровню шума сопоставимы с серийно изготавливаемыми зубчатыми мотор-редукторами.

Ключевые слова

сферическая роликовая передача, редуктор, тело качения, тепловая характеристика, шумовая характеристика, сателлит

Для цитирования

Лустенкова Е. С. Экспериментальная оценка тепловых и шумовых характеристик редуктора со сферической роликовой передачей / Е. С. Лустенкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 43–50. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).43-50

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.02.2021, поступила после рецензирования: 20.02.2021, принята к публикации: 25.02.2021

Experimental estimation of thermal and noise characteristics of a speed reducer with a spherical roller transmission

E. S. Lustenkova✉

Belarusian-Russian University, Mogilev, the Republic of Belarus

✉ fittsova@gmail.com

Abstract

Transmissions with intermediate rolling elements are an innovative development in the field of mechanical drive systems. They allow you to implement a wide range of transmission ratios with small dimensions and weight. The transmissions have layout advantages due to the alignment of the shafts and the axial symmetry of the main parts. The spherical roller transmission under study contains a drive shaft with an inclined section (crank), on which a pinion is installed. During the transmission operation, the pinion executes a spherical motion. One row of rollers mounted on the pinion is rolled along a stationary racetrack formed by spherical cams fixed in the housing, the second row interacts with the racetrack of the driven spherical cam, forcing it and the driven shaft to rotate with a reduced speed. The article presents a kinematic diagram of a spherical roller transmission with a double-row pinion and considers the principle of its operation. The design of the experimental model of a speed reducer with a transmission ratio of 44 is described, the design of the laboratory bench is considered, the hardware and test methods are described. The results of experimental studies of the thermal and noise characteristics of the speed reducer depending on the kinematic and power factors are presented. These tests allowed us to establish that the most thermally loaded transmission unit is the drive shaft with a pinion mounted on it, which requires further improvement of its design. It is established that at a certain speed of rotation, spherical roller transmissions are comparable in noise level to mass-produced gear motors.

Keywords

spherical roller transmission, reduction gear, rolling body, thermal characteristic, noise characteristic, pinion

For citation

Lustenkova E.S. Eksperimental'naya otsenka teplovykh i shumovykh kharakteristik reduktora so sfericheskoi rolikovoi peredachei [Experimental evaluation of thermal and noise characteristics of a speed reducer with spherical roller transmission]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 1 (69), pp. 43–50. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).43-50

Article Info

Received: 17.02.2021, Revised: 20.02.2021, Accepted: 25.02.2021

Введение

При проведении ремонтных работ зачастую требуется существенное увеличение усилия, передаваемого от электродвигателя на рабочий орган привода [1]. Это относится и к ручному инструменту, применяемому на производстве. Передачи с промежуточными телами качения являются инновационной разработкой, благодаря соосности валов, малым габаритам и массе они удачно вписываются в цилиндрические корпуса [2–5]. Применение шариков или роликов, перемещающихся по беговым дорожкам, вместо зацепляющихся зубьев колес, позволяет заменить скольжение качением и повысить коэффициент полезного действия (КПД) [6–8]. Эти передачи нашли применение при разработке балонных ключей, лебедок и талей [9–11]. Ключ для демонтажа и сборки резьбовых соединений, крепящих головки блока цилиндров дизельных двигателей тепловозов ЧМЭ-3 (рис. 1), был испытан на разработанном лабораторном стенде и в производственных условиях. В передаче были использованы составные ролики для уменьшения потерь на трение [12].

При производственных испытаниях в локомотивном депо «Могилев» с помощью ключа был реализован момент срыва резьбы 2 000 Н·м при диаметре корпуса 82 мм. Для повышения передаточного отношения были разработаны конструкции сферических роликовых передач (СРП) с двухрядным сателлитом [13].

КПД СРП сопоставим с потерями мощности в червячных передачах, он зависит от геометрии основных элементов, вида смазочного материала и передаточного отношения [14–15]. В связи с тем, что разрабатывались передачи с приводом от электродвигателя, потребовалось исследование дополнительных характеристик. Таким образом, целями испытаний являлись: оценка шумовых характеристик СРП и исследование нагрева редуктора от кинематических и силовых факторов.

Схема и принцип работы передачи, описание объекта испытаний

Схема СРП показана далее (рис. 2). Передача содержит ведущий вал 1 с наклонным участком (кливошипом) 2. Установка эксцентриковой втулки на ведущий вал обеспечивает этот наклон. На кливошипе установлен составной сателлит 3 с возможностью относительного вращения, который содержит наружную 4 и внутреннюю 5 поверхности с равномерно распределенными отверстиями. В эти отверстия установлены два ряда роликов 6, 7. Первый из них контактирует своими поверхностями сферической формы с замкнутой беговой дорожкой 8, которая образована двумя неподвижными сферическими кулачками, закрепленными в корпусе 9. Ряд роликов 7 контактирует с беговой дорожкой 10 ведомого сферического кулачка 11, соединенного с ведомым валом 12.

Ведущий и ведомый валы имеют общую ось вра-

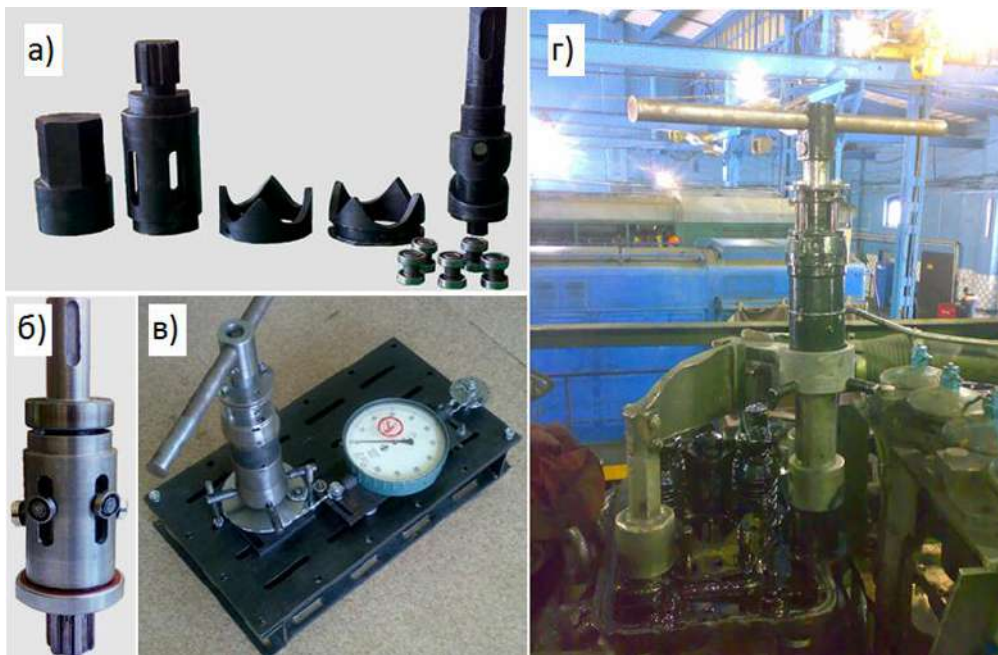


Рис. 1. Ключ для демонтажа и сборки резьбовых соединений, крепящих головки блока цилиндров дизельного двигателя тепловоза ЧМЭЗ:
a – детали передачи; *б* – передача в сборе; *в* – испытания на лабораторном стенде; *г* – производственные испытания

Fig. 1. Wrench for dismantling and assembling the threaded connections securing the cylinder heads of the diesel engine of the diesel locomotive CME3 (CSD type, T669 series):
a – transmission parts; *b* – transmission assembly; *c* – tests on a laboratory bench; *d* – field tests

щения, которая является и осью передачи.

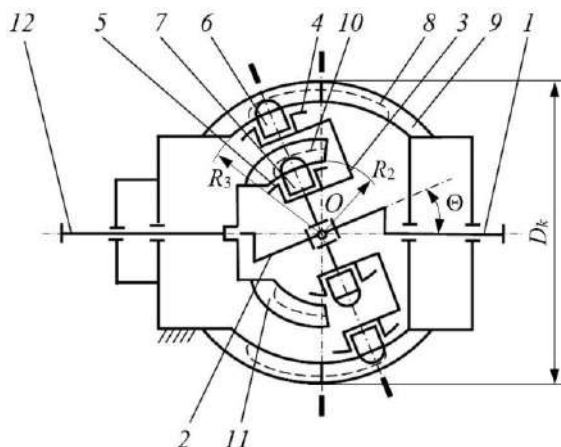


Рис. 2. Кинематическая схема сферической роликовой передачи с двухрядным сателлитом

Fig. 2. Kinematic diagram of spherical roller transmission with a double-row pinion

Оси всех роликов 6, 7 лежат в одной плоскости. Проходящая через центр сферического движения O сателлита плоскость перпендикулярна оси передачи и является экваториальной плоскостью для всех сферических кулачков.

При вращении ведущего вала наклон его криво-

шипа вынуждает совершать сферическое движение (регулярную прецессию) относительно центра O [16]. Ролики, вращаясь в отверстиях сателлита, обкатываются по неподвижной беговой дорожке и по беговой дорожке ведомого сферического кулачка, вынуждая его поворачиваться вместе с ведомым валом с измененной скоростью.

Основными параметрами сферической роликовой передачи являются радиусы сферических поверхностей R_3 и R_2 , где располагаются центры сферических концов роликов первого и второго рядов соответственно, а также угол наклона кривошипа Θ .

Передачное отношение исследуемой СРП определяется числом периодов (волн) Z_3 неподвижной беговой дорожки 8 и числом периодов Z_2 беговой дорожки (кулачкового профиля) 10 сферического ведомого кулачка. Его можно вычислить по формуле

$$i = \frac{(Z_3 + 1) \cdot Z_2}{Z_2 - Z_3}. \quad (1)$$

Исследование температурных характеристик сферической роликовой передачи

Объектом испытаний стал экспериментальный образец редуктора со сферической роликовой передачей с двухрядным сателлитом (рис. 3). В качестве смазочного материала применялась графитовая смазка для ШРУСов (Mannol), закладываемая при сборке.



Рис. 3. Экспериментальный образец редуктора со сферической роликовой передачей с двухрядным сателлитом:

a – основные узлы испытываемого редуктора (1 – ведущий вал с установленным сателлитом с двумя рядами роликов; 2 – ведомый вал с кулачком; 3 – наружные кулачки, образующие неподвижную беговую дорожку; 4 – корпус); *б* – экспериментальный образец редуктора в сборе

Fig. 3. Experimental model of a speed reducer with spherical roller transmission with a double-row pinion:
a – main parts of the speed reducer for testing (1 – drive shaft with installed satellite with two rows of rollers; 2 – driven shaft with a cam; 3 – outer cams, forming a stationary racetrack; 4 – housing);
b – assembly of the experimental model of the speed reducer

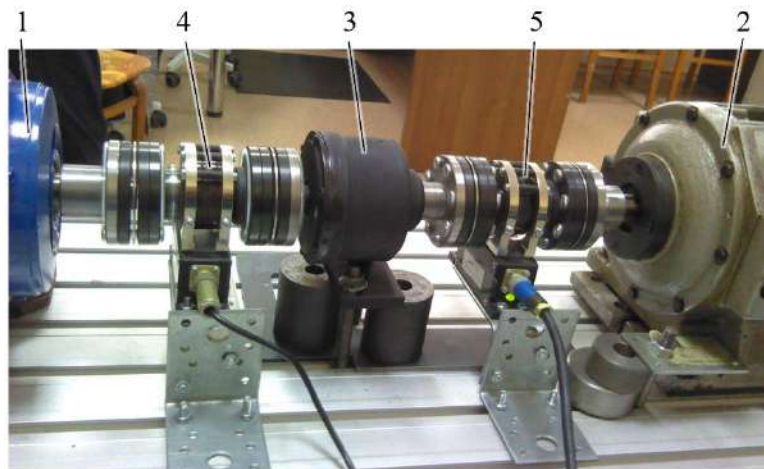


Рис. 4. Экспериментальный образец редуктора на стенде:

1 – электродвигатель; 2 – порошковый тормоз (нагрузатель); 3 – испытываемый редуктор; 4, 5 – датчики момента и частоты вращения

Fig. 4. Experimental model of the speed reducer on the testing bench:

1 – electric motor; 2 – powder brake (loader); 3 – testing speed reducer; 4, 5 – torque and speed sensors

Редуктор имеет передаточное отношение $i_{12}^{(3)} = -44$ ($Z_2 = 11$, $Z_3 = 15$), максимальный диаметр корпуса 82 мм.

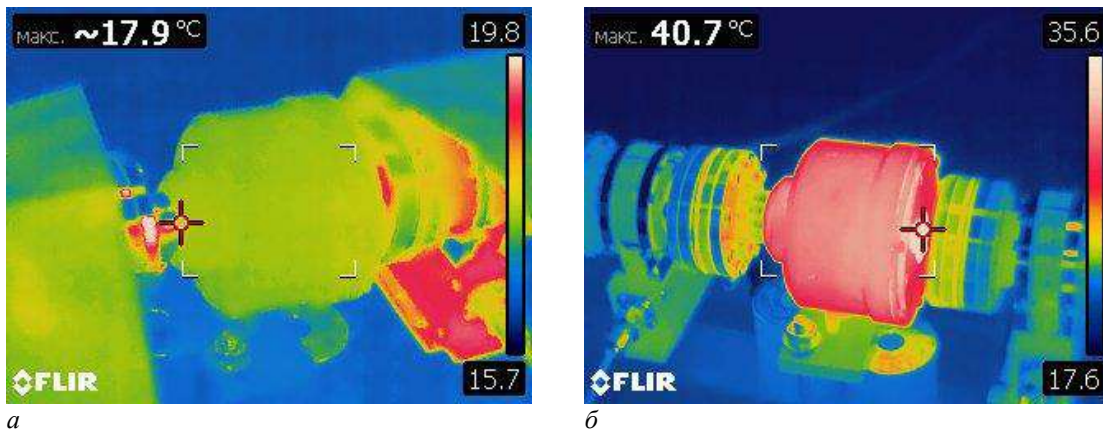
Исследование производилось на стенде, работающем по методу разомкнутого силового потока (рис. 4).

Частота вращения двигателя регулировалась частотным преобразователем, нагрузатель также имел собственную систему управления.

Измерение температуры корпуса редуктора осуществлялось посредством тепловизора (модель FLIR T440), оснащенного контактным зондом [17].

Были заданы следующие параметры: частота вращения на ведущем валу $n_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$ и момент на ведомом валу $T_2 = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (режим близкий к номинальному). Показаны начальная и конечная термограммы (рис. 5).

В начальный момент времени (время первого измерения) максимальная температура на ведущем



а

б

Рис. 5. Термограмма редуктора:

а – при пуске редуктора (время работы – 1 мин.); б – после работы в течение 20 мин.

Fig. 5. Speed reducer thermogram:

а – when starting the reducer (operating time – 1 min); б – after 20 min of operation

валу составляла 19 °С. Температура корпуса – 17 °С. В конечный момент времени максимальная температура на ведущем валу – 40 °С. Температура корпуса составляла 35 °С. Время эксперимента ограничивалось 20 мин, так как редуктор был предусмотрен для кратковременных интервалов нагружений в режиме частых пусков / остановок (в составе электромеханического привода домкрата). Для работы в постоянном режиме в течение нескольких часов (смены) необходима циркуляционная система смазки, масляная ванна. В данном образце смазка закладывалась при сборке.

Термограммы определялись через определенные временные промежутки работы редуктора, что позволило построить графики (рис. 6).

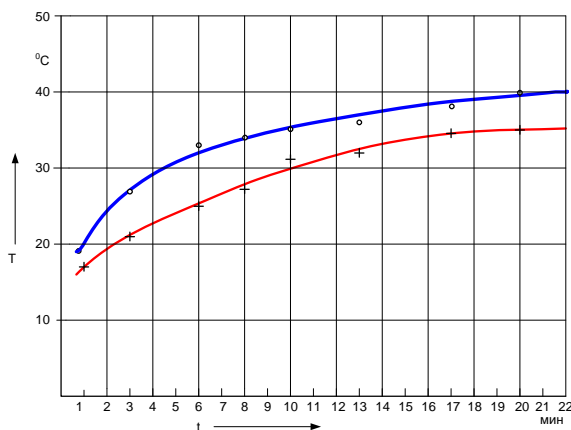


Рис. 6. Зависимость изменения температуры элементов редуктора от времени работы:

○ – температура ведущего вала;
+ – температура корпуса редуктора

Fig. 6. Dependence of the temperature variation of the speed reducer elements on the operating time:

○ – the temperature of the drive shaft;
+ – the temperature of the speed reducer housing

Из графиков (см. рис. 6) можно установить, что наибольшей тепловой нагрузке подвержен ведущий узел СРП – вал, на котором установлен сателлит. С течением времени наблюдается стабилизация температурных характеристик в связи с достижением теплового баланса.

Исследование шумовых характеристик сферических роликовых передач

Измерение уровня шума в процессе работы редуктора производилось с помощью цифрового шумомера (модель «Testo 816-1»).

Результаты экспериментов для анализа шумовых характеристик СРП (в составе мотор-редуктора) приведены далее (табл. 1). Шумомер модели «Testo 816-1» имеет класс точности 2. Уровень звука определялся в диапазоне 30–100 дБ, режим Slow. Регистрация данных осуществлялась с периодичностью 1 с на расстоянии 1 м от редуктора с двигателем, установленного на стенде для определения КПД. В таблицу заносились средние арифметические значения по пяти значениям, определяемым в интервале 5 с.

Анализ приведенных данных свидетельствует о повышении уровня шума при возрастании передаваемой мощности (частоты вращения валов и моментов).

Следует отметить, что при частотах вращения ведущего вала $n_1 = 750 \text{ мин}^{-1}$ и $n_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$ при увеличении момента на ведомом валу T_2 от 8 Н·м до 11 Н·м (достижения номинального значения) наблюдалось некоторое снижение уровня шума, что объясняется выходом на оптимальный режим, подборкой зазоров под нагрузкой. При частоте $n_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$ также наблюдался максимум уровня шума при увеличении момента и его последующее снижение.

Показано распределение данных L_p в плоскости $n_1 T_2$, позволяющее оценить степень влияния указанных параметров (рис. 7).

Табл. 1. Результаты экспериментов по исследованию уровня шума
Table 1. Results of the noise level experimental analysis

T_2 , Н·м	Уровень шума L_p , дБ					
	$n_1 =$ $= 500 \text{ мин}^{-1}$	$n_1 =$ $= 750 \text{ мин}^{-1}$	$n_1 =$ $= 1\,000 \text{ мин}^{-1}$	$n_1 =$ $= 1\,250 \text{ мин}^{-1}$	$n_1 =$ $= 1\,500 \text{ мин}^{-1}$	$n_1 =$ $= 1\,750 \text{ мин}^{-1}$
0,4	61,4	68,0	71,7	75,3	77,7	79,5
3	66,6	73,3	77,9	82,5	84,1	86,0
5	67,0	74,0	78,2	83,4	85,0	86,8
8	67,5	74,3	78,4	82,5	85,9	87,0
11	67,6	73,4	77,8	82,9	86,0	87,7

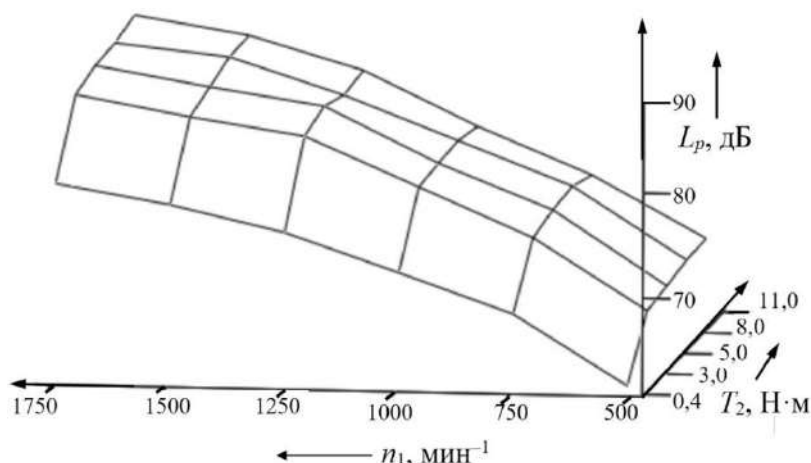


Рис. 7. Результаты испытаний мотор-редуктора со сферической роликовой передачей по определению его шумовых характеристик

Fig. 7. Results of motor-reducer with spherical roller transmission testing for its noise characteristics estimation

Передаваемая мощность изменялась от 0,5 Вт до 46 Вт. В табл. приведены значения звукового давления $L_p(1)$. Для перевода этих значений в звуковую мощность L_w использовалась формула

$$L_w = L_p(L_u) + \lg(4 \cdot \pi \cdot L_u^2), \quad (2)$$

где L_u – расстояние от редуктора до микрофона шумомера, м.

В справочнике [18] указано, что у мотор-редукторов с передаваемой мощностью до 1,5 кВт и частотой вращения ведущего вала $n_1 = 1\,500 \text{ мин}^{-1}$ звуковая мощность не должна превышать диапазон 70–84 дБ(А) в зависимости от средних геометрических частот октавных полос. Корректированный уровень звуковой мощности не должен превышать 86 дБА.

Таким образом эксперименты показали, что испытываемый образец редуктора в составе электро-механического привода с асинхронным электродвигателем при определенных частотах вращения и передаваемых моментах соответствует требованиям

по уровню шума, предъявляемым к промышленным образцам мотор-редукторов.

Заключение

Экспериментальный анализ тепловых характеристик СРП позволил установить, что наибольшее температурное нагружение испытывает узел ведущего вала СРП, включающий сам вал, эксцентрик и сборный двухрядный сателлит, установленный на подшипниках качения.

Результаты экспериментов по оценке уровня шума показали, что для испытываемого редуктора при частоте вращения ведущего вала $n_1 = 1\,500 \text{ мин}^{-1}$ и передаваемом моменте, не превышающем 11 Н·м, уровень шума находится в диапазоне 78–86 дБ, что по значениям корректированного уровня звуковой мощности соответствует требованиям, предъявляемым к серийно изготавливаемым мотор-редукторам с зубчатыми передачами, детали которых изготовлены согласно 8 и 9 степеням точности, мощность двигателя которых не превышает 1,5 кВт.

Список литературы

1. Коробко Г.И., Лебедев В.В. Автоматизированные электроприводы объектов водного транспорта. Нижний Новгород : Изд-во ВГУВТ, 2016. 32 с.
2. Становской В.В., Ремнева Т.А., Казакивичус С.М. Передачи со свободными телами качения, обзор патентной литературы // Прогрессивные зубчатые передачи : сб. науч. тр. Новоуральск : Новоурал. гос. технолог. ин-т, 2003. С. 61–94.
3. Игнатищев Р.М. Синусошариковые редукторы. Минск : Вышэйшая школа, 1983. 107 с.

4. Terada H., Masuda T., Yoshida S. Motion Analysis of a Reciprocating Motion Type Ball Reducer // Proc. 12th IFToMM World Congress, Besançon, 2007. P. 414–418.
5. Bara M. Designing Aspects Of Cylindrical Transmission // ASME Conf. Proc. Chicago, 2006. P. 75–81.
6. Лустенков М.Е. Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности. Могилев : Изд-во Белорус.-Рос. ун-т, 2010. 274 с.
7. Лустенков М.Е. Определение КПД передач с составными промежуточными телами качения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 6. С. 13–19.
8. Nam W.K., Shin J.W., Oh S.H. Design of thin plate-type speed reducers using balls for robots // Journal of Mechanical Science and Technology. 2013. № 27. P. 519–524.
9. Лустенков М.Е. Ключ для демонтажа ведущих колес грузовых автомобилей ЗИЛ и ГАЗ // Автомобильная промышленность. 2003. № 5. С. 24–25.
10. Борисенко Л.А. Малогабаритные передаточные механизмы для мехатронных устройств. Могилев : Изд-во Белорус.-Рос. ун-т, 2013. 187 с.
11. Панкратов Э.Н., Шумский В.В., Лушников С.В. Волновые редукторы с промежуточными звеньями // Бурение и нефть. 2003. № 2. С. 26–27.
12. Сазонов И.С., Лустенков М.Е., Прудников А.П., Фитцова Е.С. Методология расчета и проектирования передач с составными промежуточными телами качения // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. 2014. № 2 (43). С. 60–70.
13. Лустенков М.Е., Лустенкова Е.С. Оценка кинематических возможностей и КПД сферической и роликовой передач // Вестник машиностроения. 2019. № 3. С. 25–28.
14. Лустенков М.Е., Лустенкова Е.С. Сферическая роликовая передача с двухрядным сателлитом: силовые расчеты и определение КПД // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2019. № 5. С. 32–43.
15. Efremenko E.A., Bonnard E. Power Parameters Automated Calculation for Transmission with Intermediate Rolling Bodies and Free Cage // IOP Conf. Series : materials Science and Engineering. 2020. Vol. 795. 6 p.
16. Molyneux W.G. The internal bevel gear and its applications // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 1997. № 211 (1). P. 39–61.
17. Prudnikov A.P. Thermal analysis of transmission with intermediate rolling bodies // AER-Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 158. P. 338–342.
18. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя. М. : Машиностроение, 2001. Т. 3. 864 с.

References

1. Korobko G.I., Lebedev V.V. Avtomatizirovannye elektroprivody ob"ektov vodnogo transporta [Automated electric drives of water transport facilities], Nizhnii Novgorod, 2016, 32 p.
2. Stanovskoi V.V., Remneva T.A., Kazakyavichus S.M. Peredachi so svobodnymi telami kacheniya, obzor patentnoi literatury [Free rolling body gears, a patent literature review]. *Progressivnye zubchatye peredachi [Progressive gears]*, Novoural'sk, 2003. Pp. 61–94.
3. Ignatichiev R.M. Sinusosharikovye reduktory [Sinus ball reducers], Minsk, 1983, 107 p.
4. Terada H., Masuda T., Yoshida S. Motion Analysis of a Reciprocating Motion Type Ball Reducer. Proc. 12th IFToMM World Congress, Besançon, 18–21 June 2007, Besançon, 2007. Pp. 414–418.
5. Bara M. Designing Aspects Of Cylindrical Transmission. *ASME Conf. Proc., 5–10 Nov 2006*, Chicago, Illinois, 2006. Pp. 75–81.
6. Lustenkov M.E. Peredachi s promezhutochnymi telami kacheniya: opredeleniye i minimizatsiya poter' moshchnosti [Transmission with intermediate rolling elements: determining and minimizing power losses], Mogilev, 2010, 274 p.
7. Lustenkov M.E. Opredeleniye KPD peredach s sostavnymi promezhutochnymi telami kacheniya [Determination of the efficiency of gears with composite intermediate rolling bodies]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie [Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering]*, 2014. No. 6. Pp. 13–19.
8. Nam W.K., Shin J.W., Oh S.H. Design of thin plate-type speed reducers using balls for robots // *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013. No. 27. Pp. 519–524.
9. Lustenkov M.E. Klyuch dlya demontazha vedushchikh kolyos gruzovykh avtomobiley ZIL i GAZ [Key for disassembling the driving wheels of ZIL and GAZ trucks]. *Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry]*, 2003. No. 5. Pp. 24–25.
10. Borisenko L.A. Malogabaritnye peredatochnye mekhanizmy dlya mekhatronnykh ustroystv [Compact gears for mechatronic devices]. Mogilev, 2013. Pp. 187.
11. Pankratov E.N., Shumskiy V.V., Lushnikov S.V. Volnovye reduktory s promezhutochnymi zven'yami [Wave reducers with intermediate links]. *Burenije i nef't' [Drilling and oil]*, 2003. No. 2. Pp. 26–27.
12. Sazonov I.S., Lustenkov M.E., Prudnikov A.P., Lustenkova E.S. Metodologiya rascheta i proektirovaniya peredach s sostavnymi promezhutochnymi telami kacheniya [Methodology for calculating and designing gears with composite intermediate rolling bodies]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian-Russian University]*, 2014. No. 2(43). Pp. 60–70.
13. Lustenkov M.E., Lustenkova E.S. Otsenka kinemacheskikh vozmozhnostey i KPD sfericheskoi i rolikovoi peredach [Evaluation of kinematic capabilities and efficiency of spherical and roller gears]. *Vestnik mashinostroi eniya [Mechanical Engineering Bulletin]*, 2019. No. 3. Pp. 25–28.
14. Lustenkov M.E., Lustenkova E.S. Sfericheskaya rolikovaya peredacha s dvukhryadnym satellitom: silovye raschety i opredeleniye KPD [Spherical Roller Transmission with a Double-Row Pinion: power calculations and determination of efficien-

cy]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Bryansk State Technical University]*, 2019. No. 5. Pp. 32–43.

15. Efremenkov E.A., Bonnard E. Power Parameters Automated Calculation for Transmission with Intermediate Rolling Bodies and Free Cage. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 795. 6 p.

16. Molyneux W.G. The internal bevel gear and its applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 1997. No. 211(1). Pp. 39–61.

17. Prudnikov A.P. Thermal analysis of transmission with intermediate rolling bodies. *AER-Advances in Engineering Research*, 2018. Vol. 158. Pp. 338–342.

18. Anur'ev V.I. *Spravochnik konstruktora mashinostroitel'ya [Mechanical Engineer Designer Handbook]*, Moscow, 2001. Vol. 3. Pp. 671.

Информация об авторах

Лустенкова Екатерина Сергеевна – старший преподаватель кафедры основ проектирования машин, Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь, e-mail: fittsova@gmail.com

Information about the authors

Ekaterina S. Lustenkova – Senior Lecturer of the Subdepartment of Fundamentals of Machine Design, Belarusian-Russian University, Mogilev, the Republic of Belarus, e-mail: fittsova@gmail.com

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).50-57

УДК 621.331

Определение технического состояния трансформаторов собственных нужд при построении системы мониторинга цифровой тяговой подстанции

О. А. Сидоров✉, В. Л. Незевак, В. М. Филиппов

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

✉ egt@omgups.ru

Резюме

В статье рассматриваются аспекты определения технического состояния трансформаторов собственных нужд при создании системы мониторинга технического состояния оборудования цифровой тяговой подстанции. На техническое состояние силового оборудования оказывают влияние климатические, эксплуатационные и технологические факторы. Современные системы мониторинга технического состояния силового оборудования на основании измерений на работающем оборудовании обеспечивают его устойчивую работу, сигнализируют о критических отклонениях показателей работы и оценивают прогнозный ресурс работы. При диагностических измерениях трансформаторов собственных нужд предложено проводить измерения следующих показателей работы и параметров: нагрузка и уровень напряжения (со стороны ВН); температура верхних слоев масла; уровень масла; шум и вибрации бака; влагосодержание масла; внешний вид основных узлов (проверка целостности). Анализ данных измерений при определении технического состояния трансформаторов собственных нужд включает в себя ретроспективный анализ изменения данных испытаний при техническом обслуживании, данных измерений в рабочем режиме, уровня и скорости изменения диагностических данных. Оценка и прогноз технического состояния трансформаторов осуществляются в рамках предлагаемой экспертной системы, учитывающей данные испытаний и измерений диагностических параметров и электрических величин. Рассмотренная система мониторинга технического состояния трансформаторов собственных нужд тяговых подстанций входит в единую систему мониторинга состояния оборудования, построение которой связано с проектом цифровой тяговой подстанции. Предлагаемые решения соответствуют концепции перехода к системе технического обслуживания по текущему состоянию, повышению надежности работы оборудования и предотвращению аварийных событий.

Ключевые слова

тяговая подстанция, трансформатор собственных нужд, техническое состояние трансформатора, прогнозный ресурс работы, диагностические параметры, нормативные требования, цифровая тяговая подстанция

Для цитирования

Сидоров О.А. Определение технического состояния трансформаторов собственных нужд при построении системы мониторинга цифровой тяговой подстанции / О. А. Сидоров, В. Л. Незевак, В. М. Филиппов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2021. – № 1 (69). – С. 50–57. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).50-57

Информация о статье

поступила в редакцию: 11.02.2021, поступила после рецензирования: 23.02.2021, принята к публикации: 26.02.2021

Determination of the technical condition of auxiliary transformers when building a monitoring system for a digital traction substation

O. A. Sidorov✉, **V. L. Nezevak**, **V. M. Filippov**

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉ egt@omgups.ru

Abstract

The article discusses aspects of determining the technical condition of auxiliary transformers when creating a system of monitoring the technical condition of digital traction substation equipment. The technical condition of power equipment is influenced by climatic, operational and technological factors. Modern systems for monitoring the technical condition of power equipment based on measurements on operating equipment ensure its stable operation, signal critical deviations in performance indicators, and evaluate the predicted service life. While making diagnostic measurements of auxiliary transformers, it is proposed to measure the following performance indicators and parameters: load and voltage level (on the HV side); temperature of the upper oil layers; oil level; tank noise and vibration; oil moisture content; the appearance of the main components (integrity check). Analysis of measurement data in determining the technical condition of auxiliary transformers includes a retrospective analysis of changes in test data during maintenance, measurement data in operating mode, analysis of the level and speed of changes of diagnostic data. Technical condition of transformers is assessed and forecasted within the framework of the proposed expert system, which takes into account the data of tests and measurements of diagnostic data and electrical quantities. The considered system of monitoring the technical condition of auxiliary transformers of traction substations is a part of a single equipment condition monitoring system, the construction of which is associated with the project of a digital traction substation. The proposed solutions correspond to the concept of switching to a maintenance system based on the current state, improving the reliability of equipment operation and preventing emergency events.

Keywords

Traction substation, auxiliary transformer, technical condition of the transformer, estimated operational life, diagnostic parameters, regulatory requirements, digital traction substation

For citation

Sidorov O. A., Nezevak V. L., Filippov V. M. Opredelenie tekhnicheskogo sostoyaniya transformatorov sobstvennykh nuzhd pri postroenii sistemy monitoringa tsifrovoy tyagovoi podstantsii [Determination of the technical condition of auxiliary transformers when building a monitoring system for a digital traction substation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 50–57. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).50-57

Article Info

Received: 11.02.2021, Revised: 23.02.2021, Accepted: 26.02.2021

Введение

Доля повреждений оборудования на тяговых и трансформаторных подстанциях, входящих в энергетическое хозяйство ОАО «РЖД», за 2010–2020 гг. находится в диапазоне 10–15 % от общего количества повреждений оборудования, подсчет которого ведется в соответствии с учетной политикой по отказам I и II категории. В указанной доле повреждений, связанных с нарушениями безопасности движения поездов, наблюдаются случаи, связанные с повреждениями силовых трансформаторов собственных нужд. В этой связи разработка мероприятий по своевременной диагностике указанного силового оборудования, направленная на повышение безопасности движения поездов, является актуальной.

Построение системы мониторинга силовых трансформаторов выполняется на основе обработки диагностических данных, в число которых входят данные измерений: частичных разрядов, анализа растворенных в масле газов, измерений влажности твердой изоляции, влагосодержания масла, расчета температуры наиболее нагретой точки активной части, вибрации и др. [1–6].

Современные технологии данных позволяют проводить анализ на удаленной основе с использо-

ванием GSM-каналов или так называемого интернета вещей [7–10].

Существующие системы мониторинга технического состояния силового оборудования измеряют диагностические параметры, которые обрабатываются в режиме реального времени: нагрузка, температура, концентрация газов, частичные разряды, вибрация и акустические сигналы и др. Развитие проекта цифровой подстанции обусловило интерес к обработке диагностических данных силового оборудования с помощью экспертных систем с искусственным интеллектом [11]. Одним из направлений получения прогноза состояния силового оборудования является разработка вероятностных моделей, основанных на измерениях нагрузки и температуры оборудования [12]. Общей тенденцией развития систем мониторинга состояния является все более широкое применение и анализ диагностических данных оборудования, которые можно получить в онлайн-режиме [13, 14]. Одними из перспективных методов являются акустический метод диагностики состояния, метод определения частичных разрядов [15–17]. Активная часть является не единственным узлом, состояние которого нужно диагностировать, поскольку силовое оборудование содержит вспомогательные системы, состояние которых тоже воз-

можно определять онлайн-режиме [18]. Различие систем мониторинга породило задачу выбора сложности систем, которые соответствуют стоимости силового оборудования, выбора методов диагностирования [19, 20].

Постановка задачи

Трансформаторы собственных нужд (ТСН) тяговых и трансформаторных подстанций, распределительных пунктов в настоящее время подлежат техническому обслуживанию в соответствии с нормативной периодичностью. В энергетическом хозяйстве ОАО «РЖД» на тяговых и трансформаторных подстанциях нашли применение трансформаторы собственных нужд с номинальными мощностями до 630 кВ·А. Наибольшее распространение получили трансформаторы мощностью 250–400 кВ·А и классом напряжения 10–35 кВ.

При выполнении технического обслуживания ТСН выполняется контроль и измерение следующих параметров: режим работы и уровень нагрузки, уровень масла, состояние основных узлов, отсутствие повышенного шума и вибрации и др. (осмотр); сопротивление изоляции обмоток (текущий ремонт); проверка сопротивления обмоток постоянному току, анализ масла (межремонтные испытания).

Состояние силовых трансформаторов определяется с помощью системы диагностируемых параметров,

зависящих от влияющих факторов. Контроль над изменением последних позволяет прогнозировать состояние трансформаторов (рис. 1).

В зависимости от вариантов исполнения системы мониторинга позволяют измерять и анализировать данные с помощью следующих датчиков: вибрации, давления, тока, напряжения, влажности, температуры, газоанализатор и др.

Влияние факторов на диагностируемые параметры позволяет при организации систем мониторинга состояния силового оборудования с искусственным интеллектом рассматривать наборы параметров и скорости их изменения для определения и прогнозирования состояния.

Настройка алгоритма выявления развивающихся дефектов основана на контроле скорости изменения диагностируемых параметров и соответствия их влияющим факторам. В качестве примера можно привести изменение температуры, виброперемещения и концентрации газов при совместном рассмотрении с изменением нагрузки силового трансформатора.

Рассмотрение результатов измерений в координатах «нагрузка – концентрация – время» позволяет определить несоответствие роста концентрации падению уровня нагрузки, что может свидетельствовать о возникновении частичных разрядов, межвитковых замыканий и увеличению сопротивления контактных соединений (рис. 2, а).



Рис. 1. Факторы, оказывающие влияние на состояние силового трансформатора

Fig. 1. Factors affecting the state of the power transformer

Аналогичное рассмотрение в координатах «ток – виброперемещение – время» позволяет выявить момент роста вибрации при спаде нагрузки (рис. 2, б). Увеличение температуры при падении нагрузки может свидетельствовать о возникновении неисправности в системе охлаждения, нагретой точки или появлении разрядов (рис. 2, в), а рост концентрации газов при увеличении температуры – о разрядах или перегреве (рис. 2, з).

Переход от ремонта с нормативной периодичностью к ремонту по техническому состоянию обуславливает необходимость подготовки перечня контролируемых параметров для построения систем мониторинга технического состояния силовых трансформаторов тяговых и трансформаторных подстанций, в том числе ТСН.

В данном случае оценивается уровень диагностических параметров в i -й момент времени $P_{тек i}$, превышение или снижение которого ниже порогового (P_{max} и P_{min} соответственно) свидетельствует о необходимости вывода трансформатора из эксплуатации:

$$P_{тек i} > P_{min} \text{ или } P_{тек i} < P_{max}, \quad (1)$$

где $P_{тек i}$ – значения диагностического параметра, полученные в ходе измерений или испытаний в текущем периоде.

Скорость изменения диагностических параметров (%) определяется по формуле:

$$V_i = \frac{P_{тек i} - P_{пред i}}{P_{тек i} \cdot \Delta t} \cdot 100, \quad (2)$$

где $P_{пред i}$ – значения диагностического параметра, полученные в ходе измерений или испытаний в предыдущем периоде; Δt – период времени, разделяющий текущий и предыдущий периоды.

Ограниченный объем различных силовых ТСН тяговых и трансформаторных подстанций позволяют на основе классификации определить допустимые диапазоны изменения диагностических параметров для каждой группы трансформаторов.

В качестве классификационных признаков предлагается использовать следующие:

- класс напряжения (6–35 кВ);
- номинальная мощность;

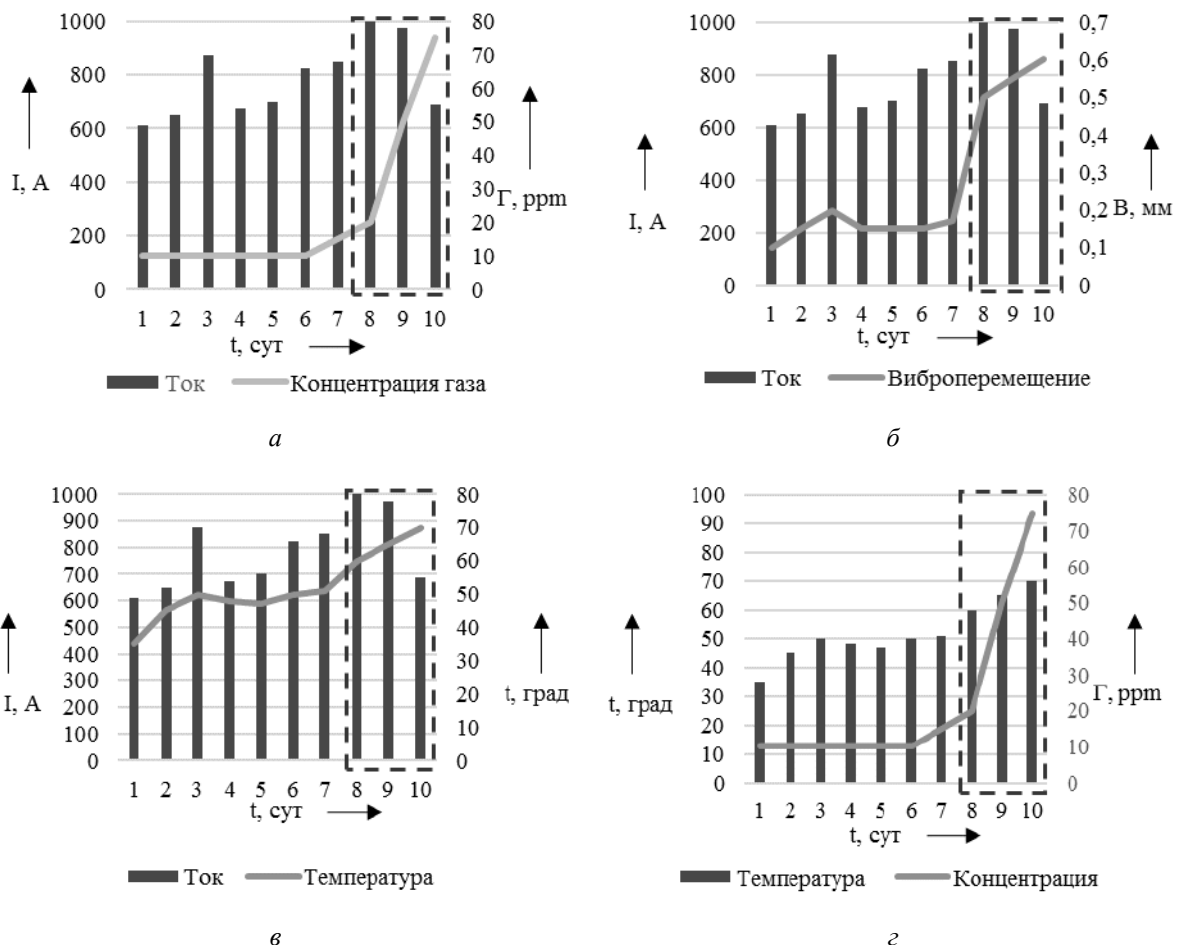


Рис. 2. Характерные изменения диагностируемых параметров
Fig. 2. Typical changes in diagnosed parameters

- среда охлаждения (с масляным или воздушным охлаждением);
- марка масла (для трансформаторов с масляным охлаждением);
- тип высоковольтных вводов;
- наличие расширительного бака;
- срок эксплуатации;
- условия эксплуатации (на открытой или закрытой части подстанции).

Обработка данных диагностики по указанным группам позволяет провести анализ изменения параметров в зависимости от влияющих факторов и множеств допустимых значений.

На основе обработки больших данных с учетом подтвержденных дефектов перейти к построению системы мониторинга технического состояния ТСН.

При выборе факторов, влияющих на техническое состояние ТСН необходимо ориентироваться на следующие группы:

- климатические (температура окружающего воздуха, скорость ветра, осадки, влажность, давление и солнечная радиация);
- эксплуатационные (режим работы, уровень напряжения, качество ремонта, состояние элементов и узлов, масла и вспомогательных систем);
- технологические (качество сборки, эффективность системы охлаждения, устойчивость к динамическим воздействиям, перегрузкам и перенапряжениям, термическая стойкость).

Требуется выполнить обработку данных измерений, на основе разрабатываемых алгоритмов искусственного интеллекта и предиктивных математиче-

ских моделей, с целью определения технического состояния силовых трансформаторов ТСН и прогнозирования ресурса его на работы на заданную перспективу.

Построение системы мониторинга

Функционал системы мониторинга технического состояния трансформаторов собственных нужд не должен уступать существующей системе диагностирования трансформаторов. Исходя из этого, формируется перечень диагностируемых в эксплуатации параметров:

- нагрузка и уровень напряжения (со стороны ВН);
- температура верхних слоев масла;
- уровень масла;
- шум и вибрация;
- влагосодержание масла;
- внешний вид основных узлов (проверка целостности).

Не охваченными системой мониторинга диагностическими параметрами являются: сопротивление изоляции обмоток, сопротивление обмоток постоянному току и анализ масла, измерение которых связано с выводом трансформаторов в ремонт и проведением сокращенного или хроматографического анализа масла.

Указанные данные дополняют базу данных измерений системы мониторинга технического состояния силового оборудования.

Структуру системы мониторинга ТСН можно представить в следующем виде (рис. 3).



Рис. 3. Структурная схема системы мониторинга технического состояния трансформатора собственных нужд

Fig. 3. Structural diagram of the technical condition of the auxiliary transformer monitoring system

Данные работы датчиков и средств измерений поступают в блок сбора и регистрации, который обеспечивает работу блока анализа данных на основе заданных алгоритмов обработки.

Результаты анализа полученной информации поступают в блок оценки и прогноза технического состояния, который на основе данных испытаний и измерений, выполненных в ходе технического обслуживания, и нормативных данных о предельно допустимых значениях диагностируемых параметров и динамике их изменения, позволяет оценить текущее и перспективное техническое состояние трансформатора ТСН.

Измерение текущих значений нагрузки и уровня напряжения реализуется на основе данных аналоговых или цифровых трансформаторов тока и напряжения, установленных на стороне высшего или низшего напряжения, с заданным интервалом усреднения (рис. 4).

Данные измерения токов пофазно передаются в цифровом или аналоговом виде от трансформаторов тока ТА1 – ТА3 к измерителям А1 – А3 и далее в модуль интеграции Mod A для передачи информации. Аналогично выполняется передача данных о фазных напряжениях от трансформаторов собственных нужд (со стороны высшего напряжения от измерительных трансформаторов TV) или измерителей напряжения (со стороны низшего напряжения от измерителей V1 – V3) с помощью блока Mod V к блоку сбора и регистрации данных измерений.

Измерения температуры и уровня масла, вибрации, влагосодержания масла и температуры окружающей среды выполняются с помощью соответствующих датчиков, устанавливаемых на ТСН и вблизи от него для последующей передачи на блок сбора и регистрации данных измерений.

Блок анализа данных позволяет выполнить обработку данных на предмет выявления ошибок и промахов, на первоначальном этапе выявить критические изменения диагностируемых параметров.

В блоке оценки и прогноза технического состояния ТСН на основе данных измерений и испытаний, выполняемых в ходе технического обслуживания, и нормативных данных на основе математической модели, описывающей работу ТСН, выполняется расчет текущего ресурса работы и прогнозируется техническое состояние ТСН на заданную перспективу.

Заключение

Построение системы мониторинга технического состояния ТСН основано на измерении предложенных диагностических параметров, перечень которых в случае необходимости подлежит расширению, например, в части анализа растворенных в масле газов.

Предлагаемая система предусматривает измерение тока, напряжения, уровня и температуры масла, вибрации, влагосодержания масла и температуры окружающей среды. Набор указанных параметров охватывает большую часть из перечня определяемых в си-

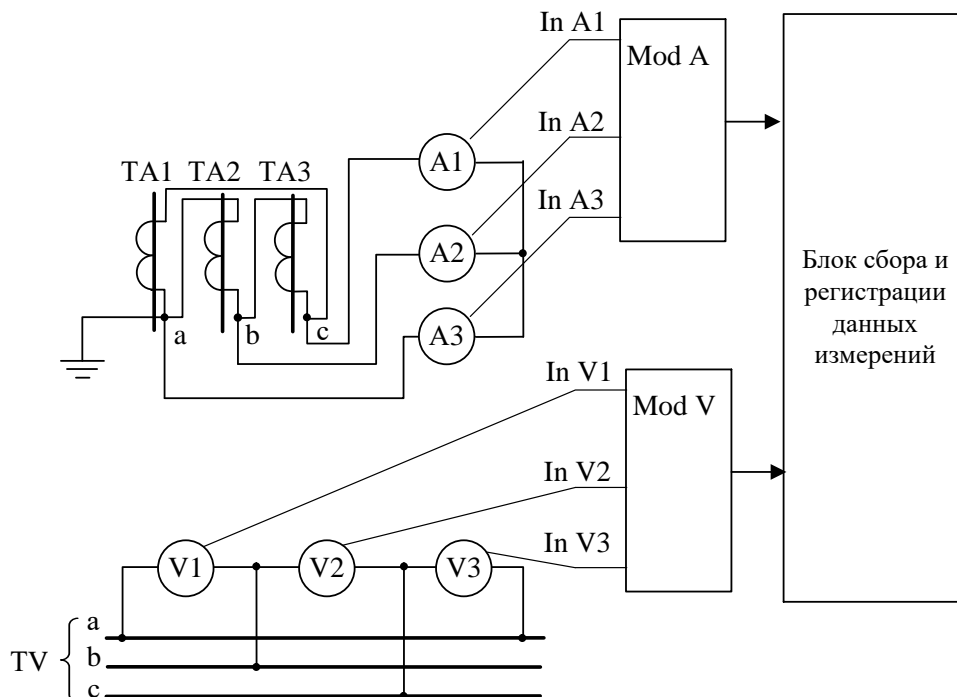


Рис. 4. Схема передачи данных измерений на трансформатор собственных нужд в систему мониторинга технического состояния

Fig. 4. Scheme of transferring measurement data to the auxiliary transformer into the technical condition monitoring system

стеме технического обслуживания.

Прогноз технического состояния осуществляется на основе предиктивных математических моделей, учитывающих ретроспективное изменение данных измерений, выполненных в рабочем режиме и в ходе технического обслуживания трансформатора.

Рассмотренная система мониторинга технического состояния ТСН является составной частью

системы мониторинга, охватывающей силовое, коммутационное и вспомогательное оборудование тяговой подстанции, планируемой к включению в проект цифровой тяговой подстанции с целью реализации перехода к техническому обслуживанию по текущему состоянию, повышению надежности работы оборудования и предотвращению аварийных событий.

Список литературы

1. Коробко Г.И., Лебедев В.В. Автоматизированные электроприводы объектов водного транспорта. Нижний 1. Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment / F. Álvarez, F. Garnacho, J. Ortego et al. // *Sensors*. 2015. 15(4), 7360–7387. DOI:10.3390/s150407360.
2. Bakar N., Abu-Siada A., Islam S. A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2014. 30(3). P. 39–49. DOI:10.1109/mei.2014.6804740.
3. Experience with capacitive on-line sensors for moisture evaluation in transformer insulation / I. Atanasova-Höhlein, M. Končan-Gradnik, T. Gradnik et al. // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2019. 35(2). P. 18–26. DOI:10.1109/mei.2019.8636102.
4. Fundamental concepts of using water activity probes to assess transformer insulation water content / D. Martin, T. Saha, C. Perkasa // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2016. 32(3). P. 9–16. DOI: 10.1109/mei.2016.7527120.
5. Modeling of the Winding Hot-Spot Temperature in Power Transformers / M. Kunicki, S. Borucki, A. Cichoń et al. // *Case Study of the Low-Loaded Fleet. Energies*. 2019. 12(18). 3561. DOI: 10.3390/en12183561.
6. Vibration characteristic investigation on distribution transformer influenced by DC magnetic bias based on motion transmission model / X. Liu, Y. Yang, Y. Huang et al. // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018. № 98. 389–398. DOI:10.1016/j.ijepes.2017.12.032.
7. Design and implementation of the monitoring and control systems for distribution transformer by using GSM network / M. Jalilian, H. Sariri, F. Parandin et al. // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2016. № 74. 36–41. DOI:10.1016/j.ijepes.2015.07.022.
8. Transformer fault diagnosis method using IoT based monitoring system and ensemble machine learning / C. Zhang, Y. He, B. Du et al. // *Future Generation Computer Systems*. 2020. DOI:10.1016/j.future.2020.03.008.
9. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things / Y.-P. Wang E., X. Lin, A. Adhikary et al. // *IEEE Communications Magazine*. 2017. 55(3). 117–123. DOI:10.1109/mcom.2017.1600510cm.
10. A Smart IoT Based System for Monitoring and Controlling the Sub-Station Equipment / M.S. Hossain, M. Rahman, M.T. Sarker et al. // *Internet of Things*. 2019. 100085. DOI:10.1016/j.iot.2019.100085.
11. Al Mhdawi A.K., Al-Raweshidy H.S. A Smart Optimization of Fault Diagnosis in Electrical Grid Using Distributed Software-Defined IoT System // *IEEE Systems Journal*. 2019. 1–11. DOI:10.1109/jsyst.2019.2921867.
12. A Probabilistic Approach for Forecasting the Allowable Current of Oil-Immersed Transformers / A. Bracale, G. Carpinelli, M. Pagano et al. // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. 33(4). 1825–1834. DOI:10.1109/tpwr.2018.2791181.
13. Sun C., Ohodnicki P.R., Stewart E.M. Chemical Sensing Strategies for Real-Time Monitoring of Transformer Oil : a Review // *IEEE Sensors Journal*. 2017. 17(18). 5786–5806. DOI:10.1109/jsen.2017.2735193.
14. Stating Diagnosis of Current State of Electric Furnace Transformer on the Basis of Analysis of Partial Discharges / O.I. Karandaeva, I.A. Yakimov, A.A. Filimonova et al. // *Machines*. 2019. 7(4). 77. DOI:10.3390/machines7040077.
15. Hekmati A., Hekmati R. Optimum acoustic sensor placement for partial discharge allocation in transformers // *IET Science, Measurement & Technology*. 2017. 11(5). 581–589. DOI:10.1049/iet-smt.2016.0417.
16. Diagnostic Measurements for Power Transformers / S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali // *Energies*. 2016. 9(5). 347. DOI:10.3390/en9050347.
17. Rahman M. S. A., Lewin P.L., Rapisarda P. Autonomous localization of partial discharge sources within large transformer windings // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016. 23(2), 1088–1098. DOI:10.1109/tdel.2015.005070.
18. Djamali M., Tenbohlen S. A validated online algorithm for detection of fan failures in oil-immersed power transformers. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017. 116. 224–233. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2017.02.012.
19. Hernandez M.P.C., Labib A. Selecting a condition monitoring system for enhancing effectiveness of power transformer maintenance // *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2017. 23(4). 400–414. DOI:10.1108/jqme-07-2015-0027.
20. Increased operation reliability of HV apparatus through PD monitoring / W. Koltunowicz, L.-V. Badicu, U. Broniecki et al. // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016. 23(3). 1347–1354. DOI:10.1109/tdel.2015.005579.

References

1. Álvarez F., Garnacho F., Ortego J., Sánchez-Urán M. Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment. *Sensors*, 2015. Vol. 15(4), pp. 7360–7387. DOI:10.3390/s150407360.

2. Bakar N., Abu-Siada A., Islam S. A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2014. Vol. 30(3), pp. 39–49. DOI:10.1109/mei.2014.6804740.
3. Atanasova-Höhlein I., Končan-Gradnik M., Gradnik T., Čuček B., Przybylek P., Siodla K., Liu Q. Experience with capacitive on-line sensors for moisture evaluation in transformer insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2019. Vol. 35(2), pp. 18–26. DOI:10.1109/mei.2019.8636102.
4. Martin D., Saha T., Perkasa C., Lelekakis N., Gradnik T. (2016). Fundamental concepts of using water activity probes to assess transformer insulation water content. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2016. Vol. 32(3), pp. 9–16. DOI:10.1109/mei.2016.7527120.
5. Kunicki, Borucki, Cichoń, Frymus. Modeling of the Winding Hot-Spot Temperature in Power Transformers: Case Study of the Low-Loaded Fleet. *Energies*, 2019. Vol. 12(18), 3561. DOI:10.3390/en12183561.
6. Liu X., Yang Y., Huang Y., Jadoon A. Vibration characteristic investigation on distribution transformer influenced by DC magnetic bias based on motion transmission model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018. 98, pp. 389–398. DOI:10.1016/j.ijepes.2017.12.032.
7. Jalilian M., Sariri H., Parandin F., Karkhanehchi M.M., Hookari M., Jirdehi M. A., Hemmati R. Design and implementation of the monitoring and control systems for distribution transformer by using GSM network. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016. Iss. 74, pp. 36–41. DOI:10.1016/j.ijepes.2015.07.022.
8. Zhang C., He Y., Du B., Yuan L., Li B., Jiang S. Transformer fault diagnosis method using IoT based monitoring system and ensemble machine learning. *Future Generation Computer Systems*, 2020. DOI:10.1016/j.future.2020.03.008.
9. Wang Y.-P. E., Lin X., Adhikary A., Grovlen A., Sui Y., Blankenship Y., Razaghi H.S. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 2017. Vol. 55(3), pp. 117–123. DOI: 10.1109/mcom.2017.1600510cm.
10. Hossain M.S., Rahman M., Sarker M.T., Haque M.E., Jahid A. A Smart IoT Based System for Monitoring and Controlling the Sub-Station Equipment. *Internet of Things*, 2019, 100085. DOI:10.1016/j.iot.2019.100085.
11. Al Mhdawi A.K., Al-Raweshidy H.S. A Smart Optimization of Fault Diagnosis in Electrical Grid Using Distributed Software-Defined IoT System. *IEEE Systems Journal*, 2019, pp. 1–11. DOI:10.1109/jsyst.2019.2921867.
12. Bracale A., Carpinelli G., Pagano M., De Falco P. A Probabilistic Approach for Forecasting the Allowable Current of Oil-Immersed Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018. Vol. 33(4), pp. 1825–1834. DOI:10.1109/tpwr.2018.2791181.
13. Sun C., Ohodnicki P.R., Stewart E.M. Chemical Sensing Strategies for Real-Time Monitoring of Transformer Oil: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 2017. Vol. 17(18), pp. 5786–5806. DOI:10.1109/jsen.2017.2735193.
14. Karandaeva O.I., Yakimov I.A., Filimonova A.A., Gartlib E.A., Yachikov I.M. Stating Diagnosis of Current State of Electric Furnace Transformer on the Basis of Analysis of Partial Discharges. *Machines*, 2019. Vol. 7(4), p. 77. DOI:10.3390/machines7040077.
15. Hekmati A., Hekmati R. Optimum acoustic sensor placement for partial discharge allocation in transformers. *IET Science, Measurement & Technology*, 2017. Vol. 11(5), pp. 581–589. DOI:10.1049/iet-smt.2016.0417.
16. Tenbohlen S., Coenen S., Djamali M., Müller A., Samimi M., Siegel M. Diagnostic Measurements for Power Transformers. *Energies*, 2016. Vol. 9(5), p. 347. DOI:10.3390/en9050347.
17. Rahman M. S. A., Lewin P.L., Rapisarda P. Autonomous localization of partial discharge sources within large transformer windings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016. Vol. 23(2), pp. 1088–1098. DOI:10.1109/tdel.2015.005070.
18. Djamali M., Tenbohlen S. A validated online algorithm for detection of fan failures in oil-immersed power transformers. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017. Iss. 116, pp. 224–233. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2017.02.012.
19. Hernandez M. D. P. C., Labib A. Selecting a condition monitoring system for enhancing effectiveness of power transformer maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2017. Vol. 23(4), pp. 400–414. DOI:10.1108/jqme-07-2015-0027.
20. Koltunowicz W., Badicu L.-V., Broniecki U., Belkov A. Increased operation reliability of HV apparatus through PD monitoring. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016. Vol. 23(3), pp. 1347–1354. DOI:10.1109/tdel.2015.005579.

Информация об авторах

Сидоров Олег Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения железнодорожного транспорта, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: egt@omgups.ru

Незевак Владислав Леонидович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: nezevakwl@mail.ru

Филиппов Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта, заместитель начальника УМУ, начальник отдела по НОЛАД, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: fvm-omgups@mail.ru

Information about the authors

Oleg A. Sidorov – Doctor of Engineering Science, Professor, head of the Subdepartment of Railway Transport Power Supply, Omsk State University of Railway Transport, Omsk, e-mail: egt@omgups.ru

Vladislav L. Nezevak – Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Railway Transport Power Supply, Omsk State University of Railway Transport, Omsk, e-mail: nezevakwl@mail.ru

Viktor M. Filippov – Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Railway Transport Power Supply, Deputy head UМУ, head of NOLAD, Omsk State University of Railway Transport, Omsk, e-mail: fvm-omgups@mail.ru

Силовые характеристики потока при подаче его в радиально–щелевой зазор в поперечном направлении

А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин✉

Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

✉ lpk62@mail.ru

Резюме

В статье рассмотрена гипотеза определения силовых и энергетических характеристик потока между стенками при поперечной подаче в зазор, который образован этими стенками, с подачей потока сжимаемой жидкости через центральное отверстие в одной из стенок. Исследуются силовые параметры при безотрывном течении сжимаемой жидкости в этом зазоре и чередующихся концентричных кольцевых зон (каверн) пониженного (разрежения) и повышенного (выше атмосферного) давления в них. Несмотря на то, что течение в щелевых зазорах достаточно изучено, образование чередующихся кольцевых зон разрежения и давления не находит достаточного применения. Появление кольцевых зон разрежения и давления меняет представление о характере распределения потока в радиальном направлении зазора и требует уточнения условий их появления и определения силовых характеристик, что особенно интересно с точки зрения перераспределения энергии движущегося потока в этом зазоре. Удалось установить, что кольцевая зона образуется не только при развороте потока сжимаемой жидкости в зазор за кромкой отверстия в одной из стенок, но и самом зазоре за первой зоной появляется регулярное чередование последующих кольцевых зон. При этом первая кольцевая зона разрежения появляется на стенке с отверстием, а вторая на противоположной стенке и т. д. Если хотя бы одна из стенок сделана из упругого материала, то возможны ее колебания под воздействием усилий, вызванных чередованием разрежения с повышенным давлением. Амплитуда колебаний зависит от силы давления сжимаемой жидкости, подаваемой в зазор, и от упругости материала стенки. Показана взаимосвязь давления потока с его силовыми характеристиками при его безотрывном течении в зазоре, вызывающими прогиб упругой стенки и условия ее автоколебаний. Определение регулярных кольцевых зон разрежения и давления по мере удаления их от центрального отверстия проведено с помощью упрощенной модели безотрывного течения потока в зазоре. Модель позволила определить также силовые характеристики потока в зазоре с помощью рецепторов, содержащих дискретные струйные логические элементы, чувствительность которых несколько выше, чем, например, у манометров и вакуумметров. Установлено, что образование кольцевых зон прежде всего зависит от давления и расхода сжимаемой жидкости, подаваемой через центральное отверстие в зазор, а также от скорости расходящегося в зазоре потока и количества регулярных зон разрежения и давления в зазоре. Показаны некоторые возможности полезного применения регулярного чередования зон разрежения с повышенным давлением между близко расположенными стенками в различных устройствах и технологиях с образованием автоколебаний, когда одна из стенок выполнена упругой по отношению к другой (жесткой). На данное время разработаны устройства для испытания образцов материала на восприятие циклических нагрузок, устройства для распознавания положения, ориентации и захвата пластинчатых деталей при автоматической сборке. Разработано устройство для осуществления эжектирования и многокомпонентного смешивания газовых, паровых и других текучих сред. Найдено применение в пульсационных устройствах получение газожидкостных смесей в тепло и массообменных процессах при абсорбции, ректификации, диспергировании, эмульгировании, а также для вибрационной очистки от отложений, например, стенок циклонов и др.

Ключевые слова

силовые и энергетические характеристики потока, поперечная подача потока, концентричная кольцевая зона, давление, дроссель, пристенный пограничный слой, разрежение, радиально–щелевой зазор, сектор потока, многокомпонентное смешивание, эжектирование

Для цитирования

Черепанов А. П. Силовые характеристики потока при подаче его в радиально–щелевой зазор в поперечном направлении / А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 58–67. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).58-67

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.02.2021, поступила после рецензирования: 20.02.2021, принята к публикации: 22.02.2021

Force characteristics of the flow when it is fed into a radial–slotted gap in the transverse direction

A. P. Cherepanov, P. K. Lyapustin✉

Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉ lpk62@mail.ru

Abstract

The article considers a hypothesis of determining the force and energy characteristics of the flow between the walls at the transverse feed into the gap formed by these walls, with the flow of compressible fluid through the central hole in one of these walls. The force parameters for the continuous flow of the compressible fluid in this gap and the alternating concentric annular zones (caverns) of low (rarefaction) and high (above atmospheric) pressure in them are studied. Despite the fact that the flow in the slot gaps is sufficiently studied, the formation of alternating annular zones of rarefaction and pressure is not applied to an adequate degree. The emergence of annular rarefaction and pressure zones changes the representation about the flow distribution in the radial direction of the gap and requires clarifying the conditions of their emergence and determining the force characteristics. This is especially interesting from the point of view of the energy redistribution of the moving flow in this gap. It was found that the annular zone is formed not only when the flow of compressible fluid turns back into the gap behind the edge of the hole in one of the walls, but also in the gap itself, a regular alternation of subsequent annular zones appears behind the first zone. In this case the first annular rarefaction zone appears on the wall with the hole, and the second - on the opposite wall, and so on. If at least one of the walls is made of an elastic material, then its vibrations are possible under the influence of forces caused by alternating rarefaction with increased pressure. The amplitude of the oscillations depends on the pressure force of the compressible fluid supplied to the gap and on the elasticity of the wall material. The relationship between the flow pressure and its force characteristics during its continuous flow in the gap, causing deflection of the elastic wall and the conditions of its self-oscillations, is shown. The regular annular rarefaction and pressure zones, as they move away from the central hole, are determined using a simplified model of the continuous flow stream in the gap. The model also made it possible to determine the force characteristics of the flow in the gap using receptors containing discrete fluid logic elements, the sensitivity of which is slightly higher than, for example, in manometers and vacuum meters. It is established that the formation of annular zones primarily depends on the pressure and flow rate of the compressible fluid fed through the central hole into the gap, as well as on the velocity of the flow diverging in the gap and the number of regular rarefaction zones and pressure in the gap. Some possibilities of useful application of regular alternation of rarefaction zones with increased pressure between closely spaced walls are shown in various devices and technologies with the formation of self-oscillations, when one of the walls is made elastic in relation to the other (rigid). At this time, devices for testing material samples for the perception of cyclic loads, devices for recognizing the position, orientation and capture of plate parts during automatic assembly have been developed. A device for ejecting and multicomponent mixing of gas, steam and other fluids has been developed. Applications have been found in pulsating devices for the production of gas-liquid mixtures in heat and mass transfer processes, in absorption, rectification, dispersion, emulsification, as well as for vibration cleaning of deposits, for example, cyclone walls, etc.

Keywords

force and energy characteristics of the flow, transverse feed of the flow, concentric annular zone, pressure, throttle, wall boundary layer, rarefaction, radial-slotted gap, flow sector, multicomponent mixing, ejection

For citation

Cherepanov A. P., Lyapustin P. K. Silovye kharakteristiki potoka pri podache ego v radial'no-shchelevoi zazor v poperechnom napravlenii [Force characteristics of the flow when it is fed into a radial-slotted gap in the transverse direction]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 58–67. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).58-67

Article info

Received: 10.02.2021, Revised: 20.02.2021, Accepted: 22.02.2021

Введение

Применение процессов массообмена, смесей, состоящих из нескольких компонентов, и других технологий, требует использования струйных насосов, эжекторов и смесителей потоков. Их работа основана на различных способах подачи струй в зону смешения [1–3]. Один из способов может осуществляться подачей потока в радиально-щелевой зазор в поперечном направлении относительно плоскостей двух стенок (пластин), когда поток в рабочее пространство подается через сопло в одной из стенок [4]. При этом течение потока может происходить как в отрывном, так и безотрывном режиме [5]. Попадая в радиально-щелевой зазор поток отрывается от кромки сопла и расходится в зазоре с образованием за его кромкой чередующихся концентрических кольцевых зон (каверн) пониженного (разрежения) и повышенного (выше атмосферного) давления в них [6].

Распределение потока в зазоре

В работах [5, 6] рассмотрены четыре характерных участка распределения потока в радиально-щелевом зазоре, но о его силовых характеристиках имеются лишь отрывочные сведения, поэтому целостное их представление требует более подробного рассмотрения. Далее показана схема поперечного сечения потока между близко расположенными пластинами и эпюра распределения сил потока в зазоре: поперечное сечение радиально-щелевого зазора и линии тока сжимаемой среды между стенками 2 и 4 (рис. 1, а); эпюра распределения давления и сил потока в этом сечении (рис. 1, б). Поток сжимаемой среды из сопла 1 подается в радиально-щелевой зазор между стенками 2 и 4, разворачивается относительно кромки б и симметрично расходится в зазоре 5. Разобьем сечение потока в зазоре на отдельные участки:

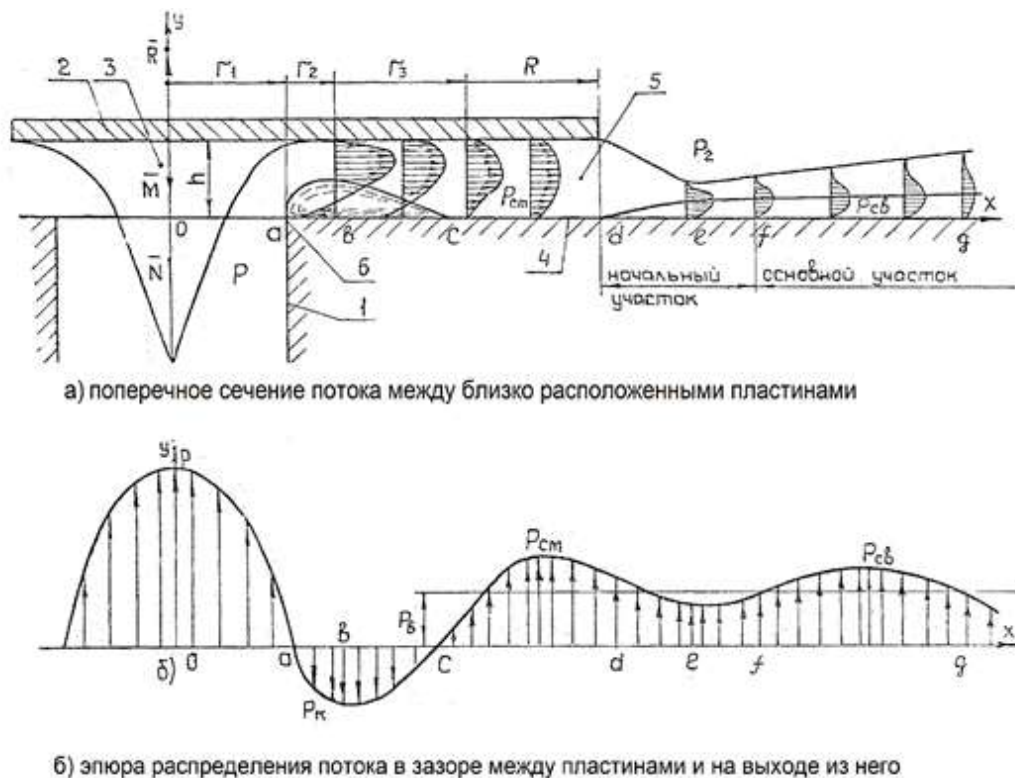


Рис. 1. Схема поперечного сечения потока между близко расположенными пластинами (а) и эпюра распределения сил потока в зазоре (б)

Fig. 1. Flow cross-section diagram between closely spaced plates (a) and flow force distribution diagram in the gap (b)

– $o - a$ (участок воздействия струи, выходящей из сопла 1 на плоскость стенки 2);

– $a - b$ (участок максимального сужения основного потока при повороте его в зазор 5, и максимального расширения вихревой зоны);

– $b - c$ (участок расширения потока в зазоре и сужения вихревой зоны);

– $c - d$ (участок установившегося движения);

– $d - e - f$ (начальный участок полузатопленной струи за кромкой б);

– $f - g$ (основной участок полузатопленной струи).

Поток на выходе из сопла 1 на участке между точками $o - a$ ударяется о стенку 2, сжимается в поперечном сечении и образует конус 3, в котором из-за возрастания скорости струи при развороте в зазор создается разрежение. За его счет на осевой линии сопла 1 образуется присасывающая сила, направленная навстречу потоку из сопла 1.

Присасывающая сила от разрежения, образующаяся на площади поверхности конуса 3 радиусом $r_1 = d_k/2$ определена формулой:

$$M_k = P_k \frac{\pi \cdot d_k^2}{4},$$

где P_k – разрежение в конусе 3; d_k – диаметр конуса.

При развороте в зазор 5 часть кинетической энергии потока теряется, а поток в радиальном

направлении стремится в зону наименьшего давления за стенкой 2. На участке между точками $a - b$ поток сужается и его скорость увеличивается согласно закону Бернулли [7].

Второе по диаметру кольцо находилось на пластине с центральным каналом, третье кольцо снова было на сплошной пластине, а следующее кольцо – на пластине с центральным каналом. Из этого можно сделать вывод, что поток, прижимаясь поочередно то к одной, то к другой пластине, совершает в зазоре волнообразное движение и кольцевые зоны разрежения регулярно чередуются с зонами давления. При этом можно рассматривать установившееся течение, при котором скорости и гидродинамические давления в каждой точке потока не изменяются во времени, а являются лишь функциями координат.

Рассмотрим, как происходит течение потока, если радиус r_3 увеличить в несколько раз за счет увеличения диаметра пластины 2. Наблюдениями после длительного испытания установки с постоянным зазором были обнаружены следы воздействия потока на поверхности пластин, которые выглядели как концентрические кольца, образовавшиеся в местах наибольшего давления потока, соприкасающегося с поверхностями пластин. При этом диаметры концентрических колец на верхней (сплошной) пла-

стине и нижней пластине с соплом 1 оказались различными.

Наименьший диаметр первого кольца обнаружен на сплошной пластине, которое было больше диаметра центрального канала.

В зоне наибольшего сужения на плоскости стенки 4 появляется кольцевая зона радиусом r_2 между точками $a - b$, которая на радиусе r_3 между точками $b - c$ представляет собой полутор с вершиной в центре радиуса r_2 и вытянутый в направлении движения потока в зазоре 5.

За счет наибольшего сужения потока на участке между точками $a - b$ скорость потока в зазоре между полутором и стенкой 2 также увеличивается, а напор потока в этом сечении уменьшается на величину потерь напора (энергии), вызванных гидравлическими сопротивлениями участка между точками $a - b$, при этом в полуторе создается кольцевая зона пониженного давления (разрежения). В месте наибольшего сужения потока на участке $a - b$ возникает сверхзвуковое течение, аналогичное течению в расширяющейся части сопла Лаваля [3], вследствие чего происходит не уменьшение скорости как при несжимаемой жидкости, а наоборот, скорость потока на данном участке увеличивается.

На участке между точками $b - c$ сила присасывания со стороны стенки 4 уменьшается, так как увеличивается площадь сечения потока. Участок между точками $a - b - c$ ограничен текущим радиусом r_x и характеризуется наличием скачка уплотнения, вызываемого сужением потока при повороте его в зазор 5.

На участке между точками $c - d$ за счет увеличения радиуса скорость потока снижается по мере удаления от центрального канала.

Участок между точками $c - d$ характеризуется установившимся движением потока в зазоре. По мере удаления от центрального канала поток выравнивается по всему поперечному сечению [4]. Участок между точками $d - e - f$ располагается за кромкой пластины. С течением времени за счет подсоса воздуха по контуру стенки из атмосферы давление в зазоре возрастает, струя при этом становится полуограниченной [5], распределяющейся со стороны стенки 4 вдоль ее плоскости, а с противоположной стороны свободно соединяется с атмосферой.

На стенках 2 и 4, как известно, струя преодолевает большее сопротивление из-за трения, что способствует образованию пристенного пограничного слоя [3]. В зависимости от режима течения пристенный пограничный слой может иметь как ламинарный, так и турбулентный режим, при этом по мере движения вдоль стенки толщина пограничного слоя возрастает. Пока она мала, течение в пограничном слое будет ламинарным, затем переходит в турбулентный [9].

Площадь кольца вихревой зоны является функцией изменения скорости потока:

$$S_{a-b-c} = f(v_{a-b-c}, h), \quad (1)$$

где v_{a-b-c} – скорость потока в зазоре на участках между точками $a - b - c$; h – зазор между пластинами.

Неоднородность потока в поперечном сечении и в зазоре между стенками 2 и 4 на данном этапе достоверно возможно определить только экспериментально.

Предположим, что стенка 2 может смещаться вдоль оси y , будет изменяться зазор h , а вместе с ним и величина сопротивления потоку. В частности, зазор можно изменять в пределах $0 < h < r_1/2$, поскольку, при $h = r_1/2$ площадь боковой поверхности зазора становится равной площади сопла 1, а далее наступает так называемое отрывное течение [5], при котором разрежение в кольцевой зоне создаваться не будет. В вихревой зоне при безотрывном течении ($h < r/2$) образуется разрежение, однако при весьма малом зазоре h происходит уменьшение ее сечения. Второе по диаметру кольцо находилось на пластине с центральным каналом, третье кольцо снова было на сплошной пластине, а следующее кольцо было на пластине с центральным каналом. Из этого можно сделать вывод, что поток, прижимаясь поочередно то к одной пластине, то к другой, совершает в зазоре волнообразное движение и кольцевые зоны разрежения регулярно чередуются с зонами давления. При этом можно рассматривать установившееся течение, при котором скорости и гидродинамические давления в каждой точке потока не изменяются во времени, а являются лишь функциями координат.

Исследование силовых параметров потока в зазоре

Изучение взаимосвязи между величиной зазора h и параметрами потока в нем в работе [6] было предложено с помощью дискретных единичных сигналов. В качестве среды для исследования применен сжатый воздух, который под избыточным давлением P подается через сопло 5. В зазоре h между стенками 2 и 4 образуется расходящийся поток. На различных расстояниях X_c от сопла 5 наблюдаются чередующиеся концентричные кольцевые волны повышенного или пониженного давления P_c в зазоре h . Причем непосредственно за каналом питания образуется зона пониженного давления (разрежения) на поверхности пластины 2, а на поверхности пластины 1 создается зона повышенного давления. Функциональные свойства потока выражено условием:

$$y = f(P_b \cdot K_x), \quad (2)$$

где P_b – входное давление; K_x – функция образования кольцевых зон разрежения или давления в зазоре.

Давление P_e и расход G_e на выходе приемного канала рецептора выразим условиями вида:

$$P_B = f(P, X_{c1}, r_m, h, d_1, \omega_i, \xi); \quad (3)$$

$$G_B = f(G, X_{c1}, r_m, h, d_1, \omega_i, \xi), \quad (4)$$

где P, G – давление и массовый расход в приемном канале питания; X_{c1} – расстояние от центрального канала питания, которое соответствует длине волны, находящейся в зоне приемного канала рецептора; r_m – расстояние между центральным каналом питания и приемным каналом рецептора; h – зазор между пластинами; d_1 – диаметр приемного канала рецептора; ω_i – площадь сечения i -го сектора распределения расходящегося потока в зазоре; ξ – сопротивление потоку в зазоре.

Давление P_B и расход G_B на выходе приемного канала рецептора возможно определить экспериментально [6], в связи с тем, что не определено суммарное сопротивление потоку. Для этого разобьем условно расходящийся поток на сектора, ограниченные углом β , приняв условие неперетекания воздуха из одного сектора в другой за счет равного бокового давления в соседних секторах на искомый сектор, а каждый из них можно принять как расходящийся насадок, ограниченный со стороны стенок 2, 4 и с боков соседними секторами. Примем два симметричных сектора относительно центрального канала питания, тогда получится тройное разветвление (рис. 2).

Далее при прохождении потока в секторе над приемным отверстием получается еще одно тройное разветвление. В классическом тройном разветвлении рассматривается жесткая система трубопроводов заданного сечения и поток в ней рассматривается как для отдельных трубопроводов при формировании граничных условий в местах разветвлений, а параметры потока усредняются по всему разветвлению [10].

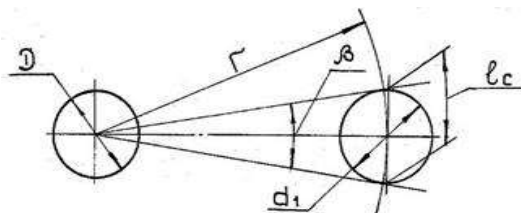


Рис. 2. Сектор, ограниченный приемным каналом рецептора

Fig. 2. Sector bounded by the receptor receiving channel

Однако в отличие от классической схемы тройного разветвления в случае ограничения потока с двух сторон одна из пластин может перемещаться относительно приемного канала, а изменяющаяся площадь сектора будет вызывать перераспределение потока в приемном канале рецептора. С термодинамической точки зрения течение в зазоре можно принять адиабатическим, поскольку при большой скорости на коротком участке теплообмен между дви-

жущимся потоком и внешним пространством имеет ничтожно малую величину, тогда массовый расход через кольцевую полость можно определить согласно [11] по формуле:

$$G = \pi \cdot R \cdot S \cdot \rho_1 \cdot v_1, \quad (5)$$

где $S = h \cdot r_m$ – площадь боковой поверхности зазора между плоскостью и деталью; ρ_1 – плотность воздуха в центральном канале питания; v_1 – средняя скорость течения потока в зазоре.

Течение потока в зазоре принимается изэнтропным, при котором с учетом движения без трения плотность воздуха в центральном канале питания можно определить как

$$\rho_1 = \rho_2 \cdot \left(\frac{P}{P_C}\right)^{\frac{1}{k}}, \quad (6)$$

где k – показатель изэнтропии (для воздуха $k = 1,4$ [12]); ρ_2 – плотность воздуха в зазоре; P – давление питания на входе в зазор; P_C – давление на выходе из зазора.

Закон распределения статического давления в зазоре примем как условие распределения параметров потока:

$$P_C = f(P, G, h, R),$$

где R – радиус пластины 2.

Теоретически статическое давление в зазоре при отсутствии чередующихся волн давления и разрежения согласно [11] можно определить формулой:

$$P_C = \sqrt{A \cdot \ln \frac{R}{r_m} + P_2^2}, \quad A = \frac{12\mu \cdot G \cdot P_2}{\pi \cdot h^3 \cdot \rho_2}, \quad (7)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости.

Среднюю скорость потока, веерообразно расходящегося в зазоре h , можно определить по формуле:

$$v_1 = \frac{A \cdot h^2}{25\mu \cdot r_m \cdot \sqrt{A \cdot \ln \frac{R}{r_m} + P_2^2}}. \quad (8)$$

Разобьем длину окружности l_0 радиусом r_m на участки длиной l_c , близкой к величине диаметра d_1 приемного канала рецептора и получим сектор, ограниченный углом β касательными, выходящими из центра сопла питания, к приемному каналу рецептора, по которому поток движется в зазоре. Покажем сектор с углом β , ограниченный приемным каналом рецептора (см. рис. 2).

Из отношения: $\frac{l_0}{l_c} = \frac{\beta}{360}$ получим:

$$\frac{l_0}{l_c} = 2r \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (9)$$

Площадь сечения секторного щелевого зазора на текущем радиусе r определим, как

$$\omega_1 = 2r_m \cdot h \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (10)$$

Подстановкой в формулу (5) выражений (6) и (10) получим расход воздуха в секторе, ограниченном углом β :

$$G_c = v_1 \cdot \rho_2 \cdot \left(\frac{P}{P_2}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot 2r_m \cdot h \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (11)$$

Подставив в выражение (11) формулу (7) и проведя преобразования, окончательно получим урав-

нение расхода воздуха в секторе, ограниченном приемным каналом рецептора:

$$G_c = \left(\frac{P}{P_2}\right)^{\frac{1}{k}} 2r_m \frac{0,96 \cdot G \cdot P_2}{\pi \cdot P_c} \sin\left(\frac{d_1}{2r_m}\right). \quad (12)$$

Схема распределения параметров потока на входе в зазор, в зазоре и на выходе приемного канала рецептора показана (рис. 3).

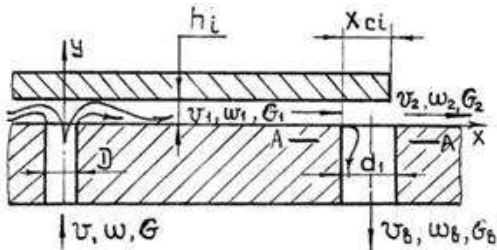


Рис. 3. Распределение параметров потока в зазоре и на выходе рецептора
Fig. 3. Distribution of flow parameters in the gap and at the output of the receptor

Составляющие скорости v_1 , площади сечения секторного щелевого зазора ω_1 , массового расхода G_c определяют статические и динамические характеристики потока в процессе перемещения его в зазоре между пластинами и перетекании части потока в приемный канал рецептора. В свою очередь эта часть потока имеет параметры v_B и ω_B в зоне приемного канала и вызывает изменение давления P_b и расхода G_b на управляющем входе струйного логического элемента [12].

Местные потери напора в ответвлении, которое в данном случае является приемным каналом рецептора, появляются при развороте транзитной струи из зазора в приемный канал (аналогично вихревой зоне b (см. рис. 1)) и ее сжатию в сечении А–А (см. рис. 5). При этом потеря напора сосредотачивается только на участке струи за сжатым сечением А–А. В соответствии с формулой Борда [12] потеря напора составит:

$$h = \zeta \frac{v^2}{2g}. \quad (13)$$

Площадь ω_{A-A} неизвестна, так как аналитически не определена величина зазора h . Это означает, что практически определить геометрическую форму узла сопряжения для разветвления с жесткой фиксацией трубопроводов постоянного сечения в общем случае затруднительно. Тем более, весьма проблематично определение аналитическим путем местного сопротивления ζ для тройного разветвления с перекрытием приемного канала рецептора поверхностью пластины.

Учитывая приведенные соображения, Вейсбах предложил любую местную потерю напора вычислять по формуле (13), а коэффициент местного со-

противления ζ , входящий в эту формулу, определять экспериментальным путем.

Далее показана схема распределения потока в зоне приемного канала рецептора (рис. 4).

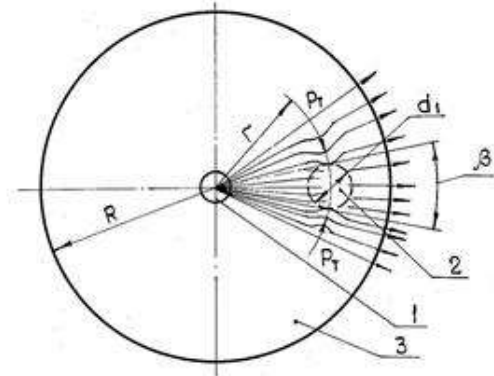


Рис. 4. Схема распределения потока в зоне приемного канала рецептора
Fig. 4. Flow distribution scheme in the area of the receiving channel of the receptor

Подсасывание воздуха происходит тангенциально по направлению стрелок и вызывает повышение давления в ответвлениях на величину ΔP_r , тогда давление на выходе из ответвления будет составлять:

$$P_{отв} = P_c + \Delta P_r, \quad (14)$$

где P_c – давление потока в рассматриваемом секторе до разветвления; ΔP_r – повышение давления в ответвлении.

Коэффициент подсоса воздуха в приемный канал из соседних секторов можно определить из отношения:

$$k_n = \frac{P_B}{P_c}, \quad (15)$$

где P_b – давление в приемном канале рецептора.

Указанное повышение давления в данной работе учитывается при определении давления P_b в приемном канале рецептора экспериментальным путем.

Необходимо учесть, что при втекании воздуха в приемный канал, в зазоре образуется падение давления, вызывающее подсос воздуха из соседних секторов в этот канал (рис. 6), что возможно определить экспериментально, но в большинстве случаев перетекание из соседних секторов не столь существенно и может не учитываться.

В зависимости от режима течения пристенный пограничный слой может иметь как ламинарный, так и турбулентный режим течения. По мере движения вдоль стенки толщина пограничного слоя возрастает [6]. Пока она мала, течение в пограничном слое будет ламинарным. Затем происходит переход в турбулентный режим течения при числах Рейнольдса $Re = (3+5)10^5$ [9]. При безотрывном режиме течения, когда $h < h_{кр}$, деталь, свободно располо-

женная на поверхности рецептора, находится в состоянии равновесия:

$$\bar{R} = \bar{M} + \Sigma \bar{N}, \quad (17)$$

где: \bar{M} – сила от веса детали, $\bar{M} = 9,8m$; \bar{R} – реактивная сила, возникающая при попадании потока на поверхность детали на участке $0 - a - b$; $\Sigma \bar{N}$ – суммарная сила, действующая на деталь со стороны потока в зазоре между плоскостью рецептора и деталью.

С учетом взаимодействий [9, 13, 14] суммарная сила определяется как сумма сил, образующихся на различных участках зазора в зависимости от характера потока:

$$\bar{N} = \bar{N}_{0-a} + \bar{N}_t + \bar{N}_{c-d}, \quad (18)$$

где \bar{N}_{0-a} – сила от действия статического давления на участке $0 - a$ напротив центрального канала питания; \bar{N}_t – сила трения о поверхность рецептора; \bar{N}_{c-d} – сила от действия статического давления на участке $c - d$.

Реактивная сила струи:

$$\bar{R} = \frac{\bar{G}^2 \cdot \bar{F}_k}{\pi^2 r_1^4 [1,25 + 0,004(273 - T_2)] \left(\frac{P}{P_2}\right)^{0,714}}, \quad (19)$$

где \bar{F}_k – площадь струи в месте соударения с плоскостью детали.

Силами трения на данном участке можно пренебречь [14].

Если статическое давление на поверхности детали напротив центрального канала питания на участке, ограниченном радиусом r_2 принять постоянными равным $P_0 = f(P; r_1; h)$, то сила статического давления на плоскость детали при выходе струи из центрального канала питания определяется уравнением:

$$\bar{N}_{0-a} = 0,5 \cdot \pi \cdot r_1^2 (P - P_2) [K_c^2 (1 - K_p) + K_p + 1], \quad (20)$$

где K_c и K_p – коэффициенты пропорциональности, зависящие от величины зазора h . Значения данных коэффициентов рекомендуется определять экспериментально [12].

Особенность централизованного питания струйных датчиков ячеек рецептора состоит в следующем.

Наличие вихревой зоны на участке между точками $a - c - d$ (см. рис. 1) характеризуется переходом из области положительных значений давления в область отрицательных значений.

Установка ячеек рецептора в кольцевой зоне, ограниченной радиусом r_3 , весьма проблематична. Радиус r_3 зависит от нескольких параметров: массы детали, расхода, суммарной силы, действующей на деталь со стороны потока.

Статическое давление в зазоре, в зоне установившегося течения на участке между точками $c - d$, убывает при увеличении радиуса R . Закон распределения статического давления в зоне приемного канала ячейки от параметров потока определяется функцией:

$$P_c = \Phi(P, G, h, R). \quad (21)$$

Закон распределения статического давления в зазоре между деталью и плоскостью рецептора:

$$P_c = \sqrt{\frac{12 \cdot \mu \cdot G \cdot P_2}{\pi h^3 \rho_2} \ln \frac{R}{r} + P_2^2}, \quad (22)$$

где R – радиус окружности, вписанной в контур детали. Для прямоугольной детали $R = \frac{L}{2}$; r – радиус, на котором измеряется статическое давление; P_2 и ρ_2 – давление и плотность атмосферного воздуха.

Параметры потока могут быть приняты в пределах: $P_2 = 1,013 \cdot 10^5$ Па; $\rho_2 = 1,207$ кг/м³ при $t = 20$ °C [11]; μ – коэффициент расхода.

Параметры потока находятся в зависимости от числа Рейнольдса Re и отношения давлений P/P_2 на входе в зазор и на выходе из него.

Для практических расчетов, когда истечение воздуха происходит в атмосферу и $T = -293$ °K, пользуются экспериментальными графиками [11], показывающими зависимость коэффициента расхода от расстояния h между центральным каналом питания и деталью. На схеме (см. рис. 1) видно, что ширина зазора h определяется силой N .

При свободном расположении детали, воздействие ее массы влияет на величину зазора h . В общем виде зазор h является функцией нескольких переменных факторов:

$$h = \Phi(P, G, D, R, M, \alpha). \quad (23)$$

Однако наличие второстепенных факторов, усложняет математическую модель, которая не позволяет четко определить влияние основных факторов на величину зазора h . В частности, предварительно проведенные эксперименты в работах [6, 16] подтверждают, что для плоских деталей равной толщины при совмещении центра тяжести с центральным каналом питания увеличение угла наклона рецептора до $\alpha = 45^\circ$ практически не изменяет величину зазора h . Поэтому, для определения основных факторов необходимо рассмотреть модель с равномерно распределенным зазором:

$$h = \Phi(P, G, R, M) \quad (23)$$

Величина зазора h определяется аналитически [11] с учетом коэффициента пропорциональности, учитывающего влияние массы детали на величину зазора:

$$h = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \mu \cdot G \cdot P_2 \cdot v}{\pi (P^2 - P_2^2) \rho_2} \ln \frac{R}{r}}, \quad (24)$$

где v – коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние массы детали на величину зазора.

В области капиллярных течений незначительное изменение зазора h приводит к изменению статического давления на различных участках зазора [12], что сказывается на процессе считывания информации распознающими ячейками.

Учитывая прикладной характер данной работы, следует отметить, что зазор h с достаточной точностью определяется путем проведения эксперимента.

Результаты исследования разрежения при эжектировании потока

Величина разрежения при безотрывном течении потока в радиально-щелевом зазоре экспериментально была определена только в первой кольцевой зоне разрежения многофакторным экспериментом и представлена в виде линейного уравнения: $P_B = 0,236 + 0,083 \cdot P - 0,207 \cdot h$.

График зависимости разрежения от величины зазора h в первой кольцевой зоне от центрального сопла при давлении питания $P = 1$ кгс/см² и $P = 3$ кгс/см² показан (рис. 5).

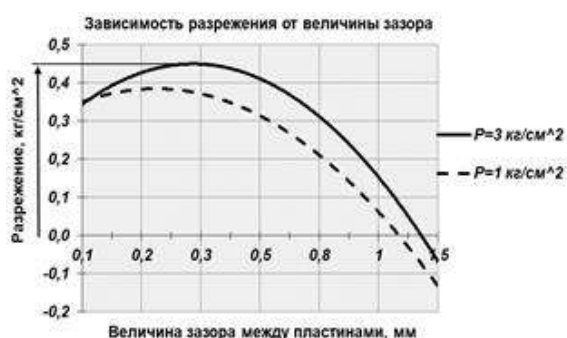


Рис. 5. График зависимости разрежения в первой кольцевой зоне от центрального сопла

Fig. 5. Graph of the dependence of the rarefaction in the first annular zone on the central nozzle

График показывает, что при давлении воздуха, подаваемого в зазор между двумя пластинами $P = 1$ кгс/см², разрежение составит $P_B = 0,38$ кгс/см² при величине зазора между пластинами $h = 0,2$ мм. При давлении $P = 4$ кгс/см² разрежение составляет $P_B = 0,45$ кгс/см² при величине зазора между пластинами $h = 0,3$ мм (96 %).

Обсуждение результатов применения безотрывного течения потока в зазоре

Исследованиями установлено что, несмотря на малую величину зазора между стенками, течение потока в зазоре происходит волнообразно [6].

Рассмотрим применение результатов исследования потока между близко расположенными пластинами на конкретном примере клапанного устройства [16] (рис. 6) с образованием чередующихся концентрических кольцевых зон пониженного (разрежения) и повышенного (выше атмосферного) давления потока в зазоре.

Клапанное устройство содержит пластину 1, установленную на более жестком основании 2, сопло 3 с фаской 4, зазор 5 и крепеж 6 в нескольких точках. Поток 7, подаваемый через сопло 3 под давлением P , проходя через отверстие, срывается с его кромки 4, образует разрежение в концентричном кольце 10, а затем в концентричном кольце 11. Ана-

логично образуются зоны 12, 13 до выхода образовавшейся газожидкостной смеси 15 за клапан 1.

Разрежение в концентричных кольцах 10–13 и в зоне 14 создает присасывающую силу Q , зазор 5 уменьшается, при этом снижается расход смеси 7 в зонах 8 и 9, после чего давление в концентричных кольцах 10–13 снова снижает силу Q , а давление P потока вновь увеличивает зазор 5, за счет этого создаются автоколебания пластины 1 и пульсация газожидкостной смеси 7 в зазоре 5 и в пространстве 15 [16]. На этом же принципе создан эжектор [17], преимущество которого состоит в том, что эжектируемый поток подает в область чередующихся кольцевых зон разрежения то на одной, то на другой стенках, а кольцевые каналы располагают в шахматном порядке.

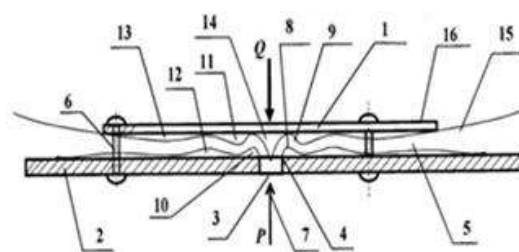


Рис. 6. Устройство образования пульсаций газожидкостной смеси

Fig. 6. Device for the formation of pulsations of a gas-liquid mixture

Некоторые возможности использования безотрывного течения потока в узком зазоре между пластинами показаны в работе [18]. Пневматический резонатор упругих колебаний пластин приведен в работе [19]. Системы очистки внутренних стен циклона от отложений мелкодисперсной древесной пыли разработаны с применением упругих колебаний пластинчатых резонаторов, приводимых в действие безотрывным течением потока или пара [20].

Заключение

1. Исследование расходящегося в щелевом зазоре между двумя близко расположенными стенками с поперечной подачей потока в зазор через центральное отверстие в одной из стенок показало возможности практического его использования в различных технологических процессах.

2. Способ эжектирования и устройство повышают разрежение смешиваемых потоков при более низких потерях кинетической энергии и увеличивают производительность. Например, при равных диаметрах эжектирующих сопел и с одной кольцевой зоной он создает разрежение в 4 раза выше, чем сопло Лавалы [17].

3. Пульсацией контактирующих фаз интенсифицируются массообменные процессы различных компонентов [16, 18].

4. Новые возможности открываются в области отложений и льда, а также в других полезных многокомпонентного смешивания разнородных устройствах. сред, очистки поверхностей бункеров и циклонов от

Список литературы

1. Лагуткин М.Г. Влияние конструктивных и режимных параметров работы вихревого аппарата на величину коэффициента эжекции / М.Г. Лагуткин, А.Н. Михальченкова, М.М. Бутрин // Энергосбережение и водоподготовка. М.: «Сам Полиграфист», 2017. № 3 (107). С. 48–53.
2. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш.А. Пиралишвили. М.: Энергомаш, 2000. 412 с.
3. Соколов Е.Я. Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
4. Черепанов А.П. Струйно-логические устройства автоматической ориентации плоских деталей при сборке. Автореферат кандидатской диссертации. ИПИ. Иркутск, 1993. 20 с.
5. Чупраков Ю.И. Гидропривод и средства гидроавтоматики: учебное пособие для вузов по специальности «Гидропривод гидроавтоматики». М. Машиностроение, 1979. 232 с.
6. Черепанов А.П., Ляпустин П.К., Быргазов П.Н. Упрощенная математическая модель исследования потока в зазоре между пластинами: сб. науч. тр. Ангарского государственного технического университета. Ангарск: Изд-во АНГТУ, 2019. Т. 1 № 16 2019. С. 137–142.
7. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости): учеб. пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1975. 327 с.
8. Цегельский В.Г. К теории газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смещения / В.Г. Цегельский // Известия высших учебных заведений, 2012, № 2. С. 46–71.
9. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. Ч. 2. Методы аэродинамического расчета. М.: Высшая школа, 1980. 416 с.
10. Гогричиани Г.В. Пневматический струйно-тензометрический датчик положения // Механизация и автоматизация производства, 1988, № 12. С. 15–16.
11. Пикнер М.Я. Исследование аэродинамического эффекта для струйных захватных питателей / Известия вузов № 10. М.: Машиностроение. 1968. С. 16–169.
12. Пневматические устройства и системы машиностроения: справочник / Е.В. Герц. М.: Машиностроение, 1981. 218 с.
13. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика. М.: Наука, 1964. 816 с.
14. Погорелов В.И. Элементы и системы гидроавтоматики. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1979. 184 с.
15. Черепанов А.П., Земченко А.В. Исследование рабочего процесса взаимодействия элементарной поверхности детали с распознающей ячейкой рецептора струйно-логического ориентирующего устройства (СЛОУ) // Вестник Читинского политехнического института. Вып. 3. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 1996. С. 317–328.
16. Патент Российской Федерации № 2657301, МПК В01D 3/14. Способ образования пульсаций газожидкостной смеси и устройство для его осуществления // А.П. Черепанов. Заявитель: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет». Оpubл.: 19.06.2018 Бюл. № 17.
17. Патент Российской Федерации № 2705695, МПК F04F 5/44. Способ эжектирования потока и устройство для его осуществления // А.П. Черепанов. Заявитель: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет». Оpubл.: 11.11.2019 Бюл. № 32.
18. Черепанов А.П. Новые возможности использования безотрывного течения потока жидкости в узком зазоре между пластинами. Современные технологии и научно-технический прогресс: тезисы докладов научно-технической конференции. Ангарск, 1994. С. 30.
19. Черепанов А.П. Пневматический резонатор упругих колебаний пластин // Современные технологии и научно-технический прогресс. Тезисы докладов научно-технической конференции. Ангарск, 1995. С. 17.
20. Черепанов А.П., Ляпустин П.К., Быргазов П.Н. Устройство очистки внутренних стенок циклона от отложений // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2020. Т. 1. № 7. С. 85–86. DOI: 10.36629/2686-9896-2020-1-85-86.

References

1. Lagutkin M.G., Mikhali'chenkova A.N., Butrin M.M. Vliyaniye konstruktivnykh i rezhimnykh parametrov raboty vikhrevoego apparata na velichinu koeffitsienta ezheksii [The influence of constructive and operational parameters of the vortex apparatus on the value of the ejection coefficient]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy Saving and Water Treatment], 2017. No. 3 (107). Pp. 48–53.
2. Piralishvili Sh.A. Vikhrevoi effekt. Eksperiment, teoriya, tekhnicheskie resheniya [Vortex effect. Experiment, theory, technical solutions]. Moscow: Energomash, 2000. 412 p.
3. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Struinye apparaty [Jet apparatuses]. 3rd ed., revised. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 352 p.
4. Cherepanov A.P. Struino-logicheskie ustroystva avtomaticheskoi orientatsii ploskikh detalei pri sborke. Avtoreferat kandidatskoi dissertatsii [Fluid logic devices for automatic orientation of flat plates during assembly. Author's abstract of the Ph.D. (Engineering) diss.]. IPI Publ., Irkutsk, 1993. 20 p.
5. Chuprakov Yu.I. Gidroprivod i sredstva gidroavtomatiki: uchebnoe posobie dlya vuzov po spetsial'nosti «Gidroprivod gidroavtomatiki». [Hydraulic drive and means of hydraulic automation: a textbook for universities in the specialty "Hydraulic drive and hydraulic automation"]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 232 p.

6. Cherepanov A.P., Lyapustin P.K., Byrgazov P.N. Uproshchennaya matematicheskaya model' issledovaniya potoka v zazore mezhdru plastinami [Simplified mathematical study model of the flow in the gap between plates] // *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proc. of Angarsk State Technical University]. Angarsk: AnGTU Publ., 2019. Vol. 1. No. 16. Pp. 137–142.
7. Al'tshul' A.D. Kiselev P.G. Gidravlika i aerodinamika (Osnovy mekhaniki zhidkosti): ucheb. posobie. Izd. 2-e, pererab. i dop. [Hydraulics and Aerodynamics (Fundamentals of fluid mechanics): a textbook. 2nd ed., revised and enlarged]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1975. 327 p.
8. Tsegel'skii V.G. K teorii gazovykh ezhektorov s tsilindricheskoi i konicheskoi kamerami smesheniya [On the theory of gas ejectors with cylindrical and conical mixing chambers] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*, 2012. No. 2. Pp. 46–71.
9. Krasnov N.F. Aerodynamika. Ch. 2. Metody aerodynamicheskogo rascheta [Aerodynamics. P. 2. Methods of aerodynamic calculation]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1980. 416 p.
10. Gogrichiani G.V. Pnevmaticheskii struino-tenzometricheskii datchik polozheniya [Pneumatic jet-strain gauge position sensor] // *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva* [Mechanization and automation of production], 1988. No. 12. Pp. 15–16.
11. Pikner M.Ya. Issledovanie aerodinamicheskogo effekta dlya struinykh zakhvatnykh pitatelei [Investigation of the aerodynamic effect for jet gripper feeding mechanisms]. *Izvestiya vuzov* [Proceedings of Universities], No. 10. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. Pp. 16–169.
12. Gerts E.V. Pnevmaticheskie ustroystva i sistemy mashinostroeniya: spravochnik [Pneumatic devices and systems of mechanical engineering: a handbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 218 p.
13. Fabrikant N.Ya. Aerodinamika [Aerodynamics]. Moscow: Nauka Publ., 1964. 816 p.
14. Pogorelov V.I. Elementy i sistemy gidroavtomatiki. [Elements and systems of hydroautomatics]. Leningrad: Leningrad University Publ., 1979. 184 p.
15. Cherepanov A.P., Zemchenko A.V. Issledovanie rabocheho protsessa vzaimodeistviya elementarnoi poverkhnosti detali s razpoznayushchei yacheikoi retseptora struino-logicheskogo orientiruyushchego ustroystva (SLOU) [Investigation of the working process of interaction of the elementary surface of the part with the recognition cell of the receptor of the fluid-logic orienting device (FLOD)] // *Vestnik Chitinskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the Chita Polytechnic Institute], Iss. 3. Moscow: Publishing House of the Moscow State Mining University, 1996. Pp. 317–328.
16. Cherepanov A. P. *Sposob obrazovaniya pul'satsii gazozhidkostnoi smesi i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method of the formation of pulsations of a gas-liquid mixture and a device for its implementation]. Patent of the Russian Federation No. 2657301, IPC B01D 3/14. Applicant is Angarsk State Technical University. Publ.: June 19, 2018. Bull. No. 17.
17. Cherepanov A.P. *Sposob ezhektirovaniya potoka i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A flow ejection method and device for its implementation]. Patent of the Russian Federation no. 2705695, IPC F04F 5/44. // Applicant is Angarsk State Technical University. Publ.: November 11, 2019. Bull. No. 32.
18. Cherepanov A.P. Novye vozmozhnosti ispol'zovaniya bezotryvnoho techeniya potoka zhidkosti v uzkom zazore mezhdru plastinami [New possibilities of using the continuous flow of the liquid flow in a narrow gap between the plates]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress: tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Modern technologies and scientific and technological progress. Abstracts of scientific and technical conference reports]. Angarsk, 1994. Pp. 30.
19. Cherepanov A.P. Pnevmaticheskii rezonator uprugikh kolebaniy plastin [Pneumatic resonator of elastic vibrations of plates] // *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress. Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Modern technologies and scientific and technical progress. Abstracts of scientific and technical conference reports]. Angarsk, 1995. Pp. 17.
20. Cherepanov A.P., Lyapustin P.K., Byrgazov P.N. Ustroystvo ochistki vnutrennikh stenok tsyklona ot otlozhenii [A device for cleaning the inner walls of the cyclone from deposits] // *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2020. Vol. 1. No. 7. Pp. 85–86. DOI: 10.36629/2686-9896-2020-1-85-86.

Информация об авторах

Черепанов Анатолий Петрович – д-р техн. наук, профессор кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: boning89@mail.ru
Ляпустин Павел Константинович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: lpk62@mail.ru

Information about the authors

Anatolii P. Cherepanov – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Road Transport Management, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: boning89@mail.ru
Pavel K. Lyapustin – Ph.D. of Engineering Sciences, head of the Subdepartment of Road Transport Management, Federal Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: lpk62@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).67-76

УДК 658.5

Оптимизация инфраструктуры промышленного предприятия с учетом статистического веса объектов

А. В. Бальчугов¹, В. Е. Гозбенко^{1,2}✉

¹Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ vgozbenko@yandex.ru

Резюме

В статье выполнен анализ оптимизации промышленного производства на основе метода наименьших квадратов с учетом статистического веса каждого производственного объекта. С использованием данного метода рассмотрена оптимизация системы энергоснабжения и водоотведения, вентиляционной системы и транспортной системы промышленного предприятия. Показано, что при определении статистического веса целесообразно использовать наиболее значимые характеристики объектов. Так, оптимизация системы энергоснабжения промышленного предприятия, использующего в качестве энергоносителя водяной пар, позволила на 18 % снизить потери давления на трение в паропроводе и повысить технико-экономические показатели процесса. Данный результат обусловлен тем, что при расчете статистического веса объекта (аппарата) обоснованно использовалось значение расхода водяного пара в данном аппарате. При этом, чем больше расход пара, тем выше статистический вес объекта. Как показали расчеты, в результате оптимизации системы водоотведения предприятия гидравлическое сопротивление водостока из-за трения снижается на 10 % и, как следствие, повышается его пропускная способность. Оптимизация системы приточной вентиляции на основе метода наименьших квадратов привела к снижению гидравлического сопротивления воздухопровода из-за трения на 13 % и снижению затрат мощности на подачу воздуха, при этом статистический вес объекта был поставлен в зависимость от расхода воздуха в конкретном помещении. Метод наименьших квадратов с учетом статистического веса объектов позволил также определить оптимальное расположение пропускных пунктов для персонала промышленного предприятия с целью снижения времени пребывания персонала в опасной зоне. При определении статистического веса каждого объекта в данном случае использовалась численность обслуживающего персонала на объекте: чем выше численность персонала, тем выше статистический вес объекта (цеха). Таким образом, показано, что метод наименьших квадратов с учетом статистического веса объектов является универсальным методом, позволяющим оптимизировать различные аспекты работы промышленного производства.

Ключевые слова

оптимизация промышленного производства, статистический вес объекта, метод наименьших квадратов, оптимизация системы энергоснабжения, система водоотведения, промышленная безопасность

Для цитирования

Бальчугов А.В. Оптимизация инфраструктуры промышленного предприятия с учетом статистического веса объектов / А. В. Бальчугов, Е. В. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 67–76. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).67-76

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.01.2021, поступила после рецензирования: 17.01.2021, принята к публикации: 20.01.2021

Optimization of the industrial enterprise infrastructure taking into account the statistical weight of objects

A. V. Bal'chugov¹, V. E. Gozbenko^{1,2}✉

¹Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ vgozbenko@yandex.ru

Abstract

This article analyzes the optimization of industrial production, carried out based on the least squares method, taking into account the statistical weight of each production facility. Using this method, the optimization of the power supply and wastewater disposal system, the ventilation system and the transport system of an industrial enterprise is considered. It is shown that when determining the statistical weight, it is advisable to use the most significant characteristics of objects. Thus, the optimization of the power supply system of an industrial enterprise, using water vapor as an energy carrier, made it possible to reduce friction pressure losses in the steam line by 18% and increase the technical and economic indicators of the process. This result is due to the fact that when calculating the statistical weight of the object (apparatus), the value of the water vapor consumption in this apparatus was reasonably used. The higher the steam consumption, the higher the statistical weight of the object. Calculations have shown that as a result of optimization of the drainage system of the enterprise, the hydraulic resistance of the drain due to friction is reduced by 10% and, as a result, its throughput increases. Optimization of the supply ventilation system based on the least squares method led to a 13% decrease in the hydraulic resistance of the air duct due to friction and to a decrease in power consumption for air supply, while the statistical weight of the object was set depending on the air flow rate in a particular room. The method of least squares, taking into account the statistical weight of objects, also made it possible to determine the optimal location of checkpoints for the personnel of an industrial enterprise in order to reduce the time spent by personnel in the danger zone. In determining the statistical weight of each facility, in this case, the number of maintenance personnel at the facility was used. The higher the number of personnel, the higher the statistical weight of the object (workshop). Thus, it is shown that the least squares method, taking into account the statistical weight of objects, is a universal method that allows you to optimize various aspects of industrial production.

Keywords

optimization of industrial production, statistical weight of the object, the least squares method, optimization of the energy supply system, water disposal system, industrial safety

For citation

Bal'chugov A. V., Gozbenko E. V. Optimizatsiya infrastruktury promyshlennogo predpriyatiya s uchetom statisticheskogo vesa ob'ektov [Optimization of the industrial enterprise infrastructure taking into account the statistical weight of objects]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 67–76. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).67-76

Article Info

Received: 10.01.2021, Revised: 17.01.2021, Accepted: 20.01.2021

Введение

Оптимальная организация инфраструктуры промышленного производства с целью экономии энергетических и сырьевых ресурсов, повышения безопасности эксплуатации и снижения экологического ущерба является актуальной задачей [1]. При анализе инфраструктуры производства необходимо учитывать уровень функциональной значимости объектов, из которых состоит производство [2–6]. Значимость промышленного объекта определяется различными факторами, такими как численность персонала, обслуживающего объект, производительность объекта, энергопотребление, особенности расположения на территории промышленной площадки и т. д. Значимость объекта важно учитывать при разработке оптимальной инфраструктуры производства: его энергетической, водопроводной и вентиляционной систем.

Метод оптимизации

Значимость промышленного объекта с точки зрения математической статистики является аналогом статистического веса объекта [7]. Поэтому при решении ряда задач по оптимальной организации производства плодотворным является использование метода наименьших квадратов с учетом статистического веса каждого объекта, составляющего производство. Так, если точке (объекту) с координатами (x_i, y_i) соответствует статистический вес ω_i , то необходимо минимизировать сумму:

$$S = \sum_{i=1}^n \omega_i (ax_i + b - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где n – число точек (объектов).

После преобразований уравнения (1) получаем:

$$a \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i x_i = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i \cdot y_i. \quad (2)$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot y_i. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) образуют систему уравнений с двумя неизвестными a и b . Коэффициенты a и b определяются по формулам Крамера [8–11]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot y_i / \sum_{i=1}^n \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \omega_i x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i}}, \quad (4)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} - \frac{a \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}. \quad (5)$$

Результаты оптимизации

Применим метод наименьших квадратов с учетом статистического веса каждого объекта для оптимизации системы энергоснабжения промышленного предприятия в случае, когда теплоносителем является водяной пар. Далее приведен схематичный план территории предприятия, на которой расположены аппараты ($n = 7$), потребляющие водяной пар (рис. 1). При оптимальном расположении магистрального паропровода для снабжения водяным паром этих аппаратов гидравлические потери при транспортировке водяного пара к аппаратам будут минимальными. При этом суммарные гидравлические и тепловые потери в паропроводе будут минимальными, если сумма квадратов расстояний от магистрального трубопровода до аппаратов будет минимальна.

Приведены координаты расположения каждого аппарата (табл. 2) и сведения о потреблении пара приведены в табл. 1. Начало системы координат выбирается произвольно. Принимаем, что при расходе пара $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ (аппарат № 1) статистический вес аппарата равен 1. Исходя из этого, можно рассчитать статистический вес каждого аппарата (табл. 2) по формуле:

$$\omega_i = \frac{V_i}{V_1}, \quad (6)$$

где V_i – расход пара в аппарате i , $\text{м}^3/\text{ч}$.

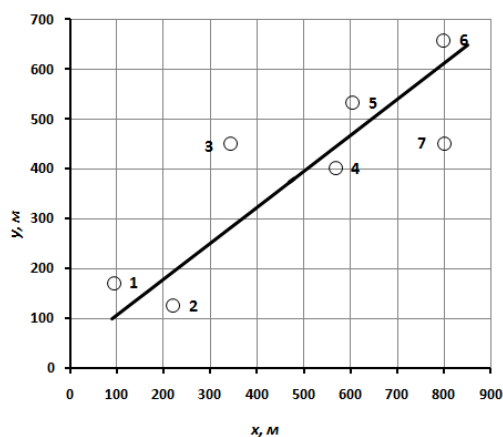


Рис. 1. План расположения аппаратов на предприятии:

○ – аппарат, потребляющий водяной пар;
линия – магистральный паропровод

Fig. 1. Layout of apparatuses at a plant:

○ – apparatus that consumes water vapor;
line – main steam pipeline

Таблица 1. Сведения о потреблении водяного пара
Table 1. Information on the consumption of water vapor

Номер аппарата	Расход пара, м ³ /ч
1	100
2	550
3	150
4	200
5	650
6	100
7	180

Таблица 2. Координаты и статистический вес объектов

Table 2. Coordinates and statistical weight of objects

Номер аппарата	$x_i, м$	$y_i, м$	Статистический вес, ω_i
1	93	171	1,0
2	220	125	5,5
3	343	354	1,5
4	567	402	2,0
5	604	532	6,5
6	799	658	1,0
7	800	450	1,8

По уравнениям (4) и (5) рассчитаем коэффициенты:
 $a = 0,7222$; $b = 35,1928$. Уравнение, описывающее положение магистрального паропровода, примет вид:

$$y = 0,7222 \cdot x + 35,1928 \quad (7)$$

На рис. 1 линией показано наилучшее расположение паропровода, соответствующее уравнению (7). Магистральный паропровод с каждым аппаратом соединяется отдельным паропроводом малого диаметра.

Выполнен расчет гидравлического сопротивления (потерь давления на трение) для двух вариантов схем паропровода: без учета статистического веса аппарата и с учетом по уравнению из работы [12, 13]:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \quad (8)$$

где λ – коэффициент трения [13]; L – длина паропровода, м; d – диаметр паропровода, м; ρ – плотность пара, кг/м³; w – скорость пара в паропровode, м/с. Диаметр основного паропровода принимался равным 0,2 м; боковых ответвлений 0,08 м. Установлено, что суммарное сопротивление трения в паропровode, рассчитанном без учета статистического веса, составит $\Delta p_1 = 5\,787$ Па, а при втором варианте $\Delta p_2 = 4\,746$ Па, т. е. гидравлическое сопротивление паропровода снизится на 18 %.

Таким образом, метод наименьших квадратов с учетом статистического веса (значимости) каждого аппарата позволил определить наилучшую схему основного паропровода, при которой гидравлические потери будут минимальны.

Анализ состояния системы объектов на основе метода наименьших квадратов с учетом статистического веса каждого объекта позволяет также определить условия, при которых производительность производства будет максимальна. На промышленном производстве имеются семь емкостей с водой на разных уровнях относительно поверхности земли (рис. 2). Из емкостей самотеком сливается вода в центральный водопровод. Необходимо определить наилучшее расположение водостока, при котором его гидравлическое сопротивление будет минимальным и, следовательно, будет максимальной пропускная способность водостока. Приведены сведения о максимально возможных значениях расхода воды, стекающей с каждой емкости (табл. 3).

Пронумерованными точками обозначим место выхода воды из каждой емкости и нанесем эти точки на систему координат. Оси расположим произвольно (рис. 3). Занесем координаты всех точек (табл. 4). В данном случае для удобства примем ось ox вертикальной, а ось oy горизонтальной. Статистический вес точки в данном случае будет связан с максимально возможным расходом воды. При расходе 100 м³/ч примем вес точки равным 1 (табл. 4).

Таблица 3. Сведения о расходе воды
Table 3. Information on water consumption

Номер емкости	Расход воды, м ³ /ч
1	10
2	100
3	100
4	1 000
5	10
6	10
7	100

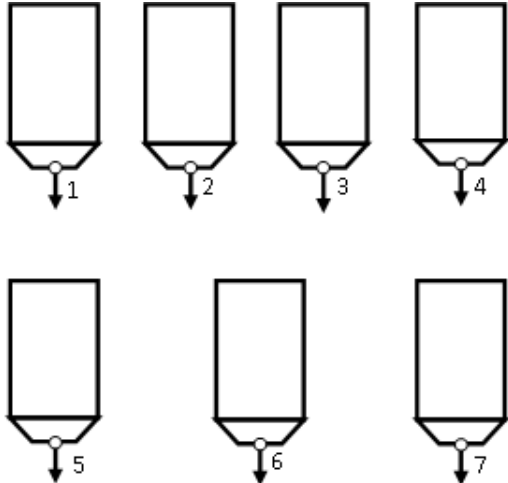


Рис. 2. Система емкостей со сливом воды
Fig. 2. System of tanks with water drain

Таблица 4. Координаты и статистический вес точек
Table 4. Coordinates and statistical weight of points

Номер точки	x_i , м	y_i , м	Статистический вес точки, ω_i
1	15	0	0,1
2	15	2	1
3	15	4	1
4	15	6	10
5	4	0	0,1
6	4	3	0,1
7	4	6	1

В указанной системе емкостей гидравлическое сопротивление будет минимальным, если минимально суммарное расстояние между главным водостоком и точками выхода воды из емкостей (с учетом значимости каждой емкости). Наилучшее положение водопровода можно найти методом наименьших квадратов.

Коэффициенты a и b рассчитаем по уравнениям (4) и (5): $a = 0,018595$; $b = 5,17562$. Уравнение, описывающее положение водостока, имеет вид:

$$y = 0,018595 \cdot x + 5,17562. \quad (9)$$

В соответствии с уравнением (9) нанесем линию на рис. 3, поменяв оси местами.

Как видно главный водопровод должен быть вертикально расположен между емкостями № 3 и 4, а также между емкостями № 6 и 7 (см. рис. 3). Водопровод расположен близко к емкости № 4, поскольку точка (т. е. емкость № 4) обладает большим статистическим весом. Это позволит увеличить пропускную способность всей системы по воде.

Выполнен расчет гидравлического сопротивления (потерь давления на трение) для двух вариантов схем водостока: без учета статистического веса аппарата и с учетом по уравнению (8). Диаметр основного водостока принимался равным 0,4 м, а боковых ответвлений 0,2 м. Установлено, что суммарное со-

противление трения в водостоке, рассчитанное без учета статистического веса, составит $\Delta p_1 = 1\,856$ Па, а во втором варианте $\Delta p_2 = 1\,668$ Па. Таким образом, гидравлическое сопротивление водостока снизится на 10 % и, как следствие, повысится его пропускная способность.

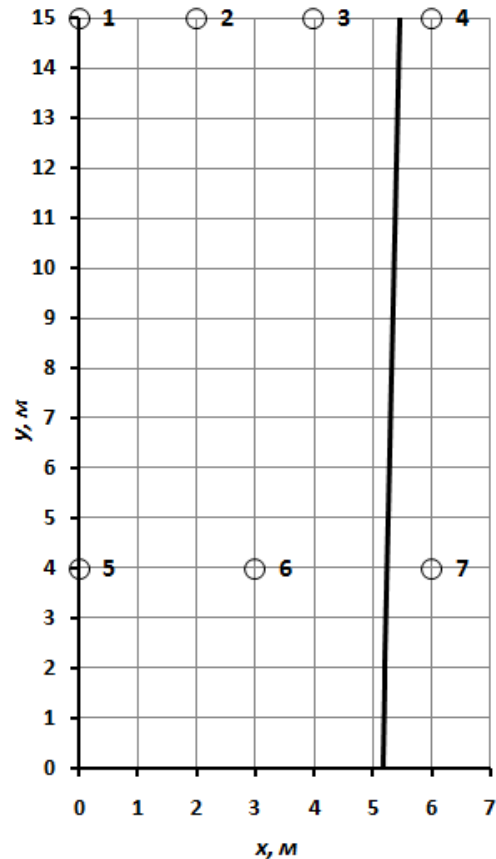


Рис. 3. К определению наилучшего расположения водопровода:

линия – водопровод; точки – место истечения воды из соответствующей емкости

Fig. 3. To determine the best location of the water supply system:

line – water supply system; points – the place where water flows out of the corresponding container

Рассмотренный метод анализа продуктивен также при разработке системы вентиляции промышленного производства. Рассмотрим промышленный цех, состоящий из семи производственных помещений (рис. 4). Система приточной вентиляции должна подавать свежий воздух в каждое помещение с разным расходом. Места подачи свежего воздуха в помещениях обозначены точками. Необходимо найти наилучшее расположение главного воздухопровода, при котором суммарная длина главного воздухопровода и боковых ответвлений минимальна. Это позволит снизить гидравлическое сопротивление воздухопровода и затраты мощности на подачу воздуха.

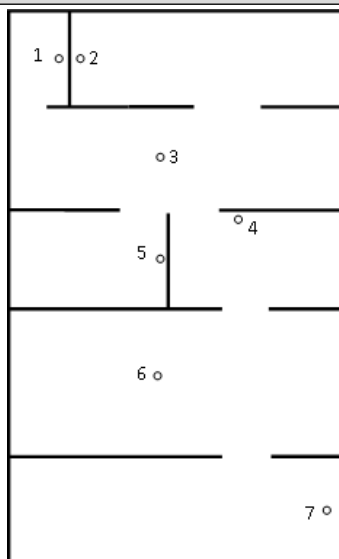


Рис. 4. План промышленного цеха (точками указаны места подачи воздуха)

Fig. 4. Plan of an industrial workshop (points indicate the places of air supply)

Далее приведены расходы вентиляционного воздуха в каждом помещении (табл. 5).

Таблица 5. Сведения о расходе воздуха
Table 5. Information on air consumption

Номер помещения	Расход воздуха, м ³ /ч
1	300
2	240
3	60
4	60
5	60
6	600
7	240

В табл. 6 сведем координаты и статистический вес всех точек. Расположение осей координат выбираем произвольно. Примем, что при расходе воздуха 60 м³/ч статистический вес точки равен 1.

Таблица 6. Координаты и статистический вес точек
Table 6. Coordinates and statistical weight of points

Номер точки	$x_i, м$	$y_i, м$	Статистический вес точки, ω_i
1	10	90	5
2	15	90	4
3	25	75	1
4	45	58	1
5	25	58	1
6	25	34	10
7	57	15	4

Коэффициенты: $a = -1,5133$; $b = 93,63783$. Уравнение, описывающее положение воздуховода, имеет вид:

$$y = -1,5133 \cdot x + 93,63783 \quad (9)$$

Показано наилучшее расположение главного воздуховода в цехе (рис. 5). От главного воздуховода к каждой точке воздух поступает по рукавам (на рисунке не показаны).

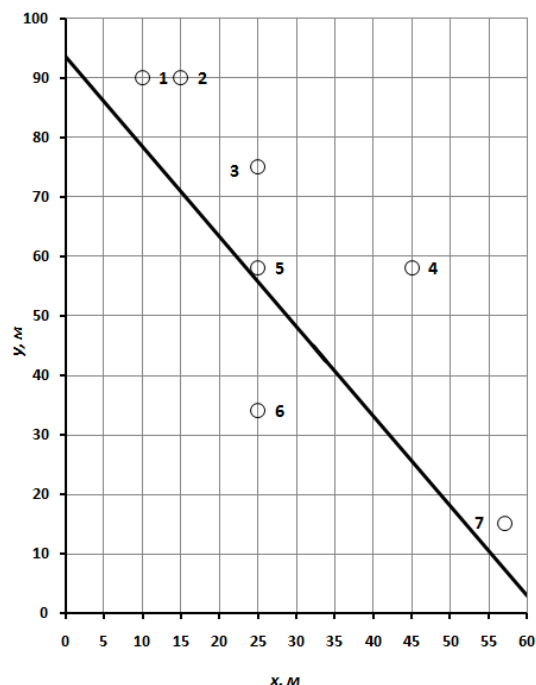


Рис. 5. Наилучшее расположение воздуховода: линия – главный воздуховод

Fig. 5. Best air duct location: line – main air duct

Выполнен расчет потерь давления на трение для двух вариантов схем воздуховода: без учета статистического веса и с его учетом по уравнению (8). Диаметр основного воздуховода принимался равным 0,3 м, а боковых ответвлений 0,2 м. Установлено, что суммарное сопротивление трения в воздуховоде, рассчитанном без учета статистического веса, составит $\Delta p_1 = 96,1$ Па, а во втором варианте $\Delta p_2 = 83,6$ Па. Таким образом, гидравлическое сопротивление воздуховода снизится на 13 % и, как следствие, повысится его пропускная способность.

В данном случае метод наименьших квадратов позволяет обеспечить подачу воздуха в промышленные помещения с минимальными затратами мощности.

Важной задачей является повышение безопасности обслуживающего персонала на производстве, снижение травматизма и числа случаев профессиональных заболеваний [14–17]. В связи с этим необходимо минимизировать время пребывания обслуживающего персонала на производстве во внеурочное время и обеспечить своевременную эвакуацию персонала в случае аварии. С данной точки зрения рассмотрим предприятие, состоящее из восьми цехов (рис. 6). Территория завода в плане представля-

ет собой квадрат 1 000×1 000 м. Координаты центральной точки каждого цеха и число работников в каждом цехе приведены (табл. 7).

Таблица 7. Координаты и статистический вес точек
Table 7. Coordinates and statistical weight of points

Номер цеха, i	$x_i, м$	$y_i, м$	Число работников, $N_i, чел.$	Статистический вес цеха, ω_i
1	93	750	100	1,00
2	150	240	459	4,59
3	343	850	210	2,10
4	467	302	623	6,23
5	604	742	327	3,27
6	799	558	550	5,50
7	800	220	122	1,22
8	900	830	1 020	10,20
Σ	4 156	4 492	3 411	34,11

С целью повышения безопасности работы на производстве необходимо с учетом статистического веса каждого цеха определить наилучшее расположение двух пропускных пунктов и пешеходной дороги для работников на территории завода.

Наилучшим расположением двух пропускных пунктов на территорию завода для работников будет такое расположение, при котором суммарный путь работников от пропускного пункта до своих цехов будет минимальным. Данную задачу решим методом наименьших квадратов с учетом статистического веса каждого цеха. Статистический вес цеха зависит от числа работников в цехе. В цехе № 1 работает 100 чел., поэтому примем статистический вес этого цеха равным $\omega_i = 1$ (см. табл. 7).

Разработаем план расположения центральных точек цехов на территории предприятия в соответствии с координатами (рис. 6). Далее по уравнениям (4) и (5), используя данные (см. табл. 7), рассчитаем коэффициенты a и b : $a = 0,51898$; $b = 260,3923$. Уравнение, описывающее координаты главной пешеходной дороги на территории завода и, соответственно, расположение двух пропускных пунктов, примет вид

$$y = 0,51898 \cdot x + 260,3923 . \quad (10)$$

По уравнению (10) нанесем линию, соответствующую наилучшему расположению дороги, на план завода (рис. 6). Координаты пропускных пунктов составят: пункт № 1 ($x = 0 м$; $y = 260 м$); пункт № 2 ($x = 1 000 м$; $y = 779 м$).

Такое расположение пропускных пунктов и пешеходной дороги позволит минимизировать время пребывания персонала на производстве после окончания смены, снизить время эвакуации в случае аварии и, как следствие, повысить безопасность производства.

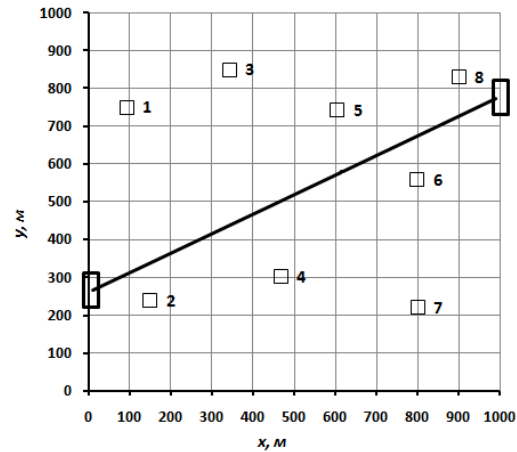


Рис. 6. Схематичный план химического завода:
□ – центр цеха; — – наилучшая автомобильная дорога;
цифры соответствуют номеру цеха

Fig. 6. Schematic plan of a chemical plant:
□ – center of the shop; — – the best automobile road;
the numbers correspond to the workshop number

Безопасность персонала на промышленном производстве может быть повышена при тщательном предварительном подборе маршрутов перемещения работников по территории объекта [18–20]. Промышленная установка состоит из двух вертикальных цилиндрических аппаратов A и B , имеющих высоту 12 и 10 м соответственно (рис. 7). Расстояние между аппаратами составляет 6 м. На каждом аппарате есть площадки для ремонтно-механического обслуживания и отбора проб сред и атмосферного воздуха. Площадки обоих аппаратов, находящиеся на одном и том же уровне, соединены горизонтальными переходами. Расположение площадок по высоте аппаратов и нумерация площадок указаны (рис. 7).

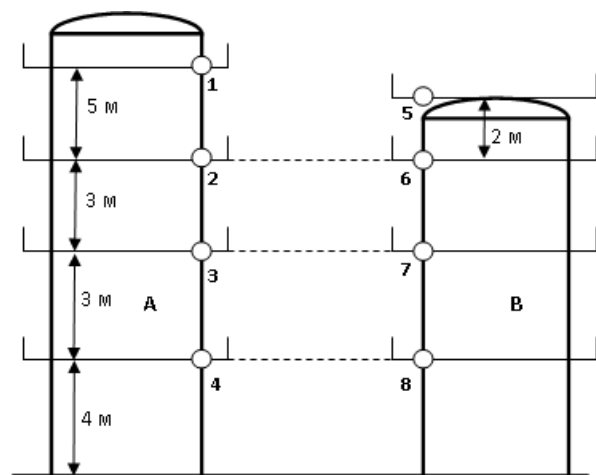


Рис. 7. Промышленные аппараты с площадками для обслуживания
Fig. 7. Industrial apparatus with service platforms

Необходимо определить наилучшее расположение единственной подъемной лестницы на площадке, если каждая площадка характеризуется своей частотой посещения обслуживающим персоналом (табл. 8).

Таблица 8. Сведения о посещаемости площадок
Table 8. Information about attendance of service platforms

Номер площадки	Число посещений в сутки
1	6
2	6
3	1
4	10
5	1
6	1
7	2
8	1

Место входа на каждую площадку (см. рис. 7) обозначим пронумерованными точками. Номер точки совпадает с номером площадки. Эти точки нанесем на систему координат. Ось ox проходит по уровню земли, а ось oy соответствует стенке аппарата A . Статистический вес каждой точки равен частоте посещений персоналом соответствующей площадки. Координаты и статистический вес каждой точки занесем в (табл. 9).

Таблица 9. Координаты и статистический вес точек
Table 9. Coordinates and statistical weight of points

Номер точки	$x_i, м$	$y_i, м$	Статистический вес точки, ω_i
1	15	0	6
2	10	0	6
3	7	0	1
4	4	0	10
5	12	6	1
6	10	6	1
7	7	6	2
8	4	6	1

Наилучшее положение подъемной лестницы будет соответствовать линии, для которой сумма расстояний до всех точек будет минимальна. Это позволит снизить время обслуживания аппаратов и время пребывания персонала в опасной зоне. Решим задачу методом наименьших квадратов с учетом статистического веса каждой точки.

По уравнениям (4) и (5), используя данные (см. табл. 9), рассчитаем коэффициенты a и b : $a = -$

$0,02726$; $b = 1,30216$. Уравнение, описывающее положение лестницы для подъема на площадке, имеет вид:

$$y = -0,02726 \cdot x + 1,30216. \quad (11)$$

В соответствии с уравнением (11) нанесем линию (рис. 8), поменяв оси местами.

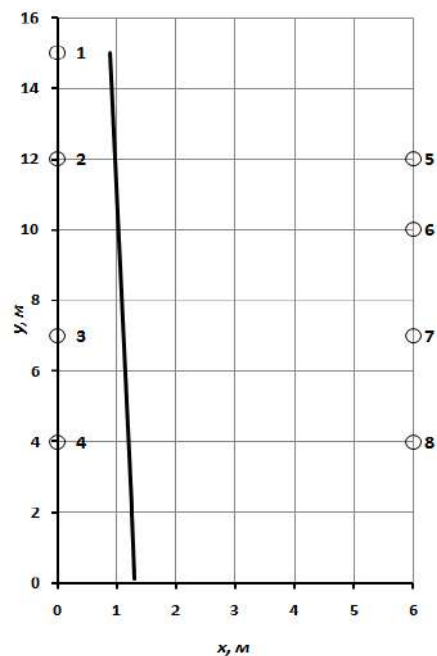


Рис. 8. Построение наилучшей линии, соответствующей положению лестницы
Fig. 8. Constructing the best line corresponding to the position of the stairs

Положение линии (см. рис. 8) соответствует наилучшему положению лестницы для подъема на площадке. Видно, что подъемную лестницу необходимо расположить приблизительно на расстоянии 1 м от аппарата A и на расстоянии 5 м от аппарата B . Такое положение лестницы объясняется большой посещаемостью площадок 1, 2 и 4. Расчеты показывают, что путь и, как следствие, время пребывания рабочего в опасной зоне в результате оптимизации сократится на 43 %.

Заключение

Таким образом, использование метода наименьших квадратов с учетом значимости (статистического веса) объектов позволяет минимизировать гидравлические и тепловые потери на производстве, увеличить производительность оборудования, а также повысить безопасность и надежность эксплуатации объектов.

Список литературы

1. Хилл П. Наука и искусство проектирования. М.: Мир, 1973, 263 с.
2. Gaochen Cui, Qing-Shan Jia, Xiaohong Guan, Qing Liuc. Data-driven computation of natural gas pipeline network hydraulics // Results in Control and Optimization. Volume 1, December 2020, 100004.

3. Eric Machorro, Jichun Li, Monika Neda, Pengtao Sun, Hongtao Yang. Recent advances in computational mathematics and applications // *Results in Applied Mathematics*. Volume 8, November 2020, 100112.
4. Jensen H.A., Jerez D.J. A stochastic framework for hydraulic performance assessment of complex water distribution networks // *Probabilistic Engineering Mechanics*. Vol. 60, April 2020, 103029.
5. Yusupbekov N.R., Adilov F.T., Ivanyan A.I. Application of Cloud Technologies for Optimization of Complex Processes of Industrial Enterprises // *13th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2018*. Pp. 852–858.
6. Strel'tsova E., Borodin A., Yakovenko I., Sokira T., Bizhanova K. Information management system of industrial enterprise in conditions of digitalization // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. Vol. 10. Iss. 01, January 2019. Pp. 559–575.
7. Сквайрс Дж. Практическая физика. М., 1971, 247 с.
8. Коломиец Л.В., Поникурова Н.Ю. Метод наименьших квадратов. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 32 с.
9. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химической технологии. М.: Высшая школа, 1978. 319 с.
10. Лебедева О.А., Гозбенко В.Е., Пыхалов А.А. Мухопад Ю.Ф. Сравнительный анализ методов решения транспортных задач при оптимальном планировании перевозочного процесса // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2020. № 3(67). С. 134–139.
11. Полтавская Ю.О. Оптимизация транспортной сети на основе минимума общих затрат на доставку грузов // *Вестник Ангарского государственного технического университета*. 2019. № 13. С. 178–183.
12. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 753 с.
13. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Альянс, 2010, 575 с.
14. Струченков В.И. Дискретная оптимизация. Модели, методы, алгоритмы решения прикладных задач. Москва: СОЛОН-Пр., 2016. 192 с.
15. Павлов В.П. Карасев Г.Н. Дорожно-строительные машины. Системное проектирование, моделирование, оптимизация. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 240 с.
16. Островский Г.М., Волин Ю.М. Методы глобальной оптимизации сложных систем. Москва: ИД МИСиС, 2005. 105 с.
17. Бабеньшев С.В., Матеров Е.Н. Методы оптимизации. Железнодорожники: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. 134 с.
18. Шиплюк А.Н. Методы оптимизации в задачах аэродинамики. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. 107 с.
19. Золотарев А.А. Методы оптимизации распределительных процессов / А.А. Золотарев. Москва: Инфра-Инженерия, 2014. 160 с.
20. Авдюнин Е.Г. Моделирование и оптимизация промышленных теплоэнергетических установок. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019.

References

1. Hill P. *Nauka i iskusstvo proektirovaniya* [Science and art of design]. Moscow: Mir Publ., 1973, 263 p.
2. Cui G., Jia Q., Guan X., Liuc Q. Data-driven computation of natural gas pipeline network hydraulics // *Results in Control and Optimization*, Volume 1, December 2020, 100004.
3. Machorro E., Li J., Neda M., Sun P., Yang H. Recent advances in computational mathematics and applications // *Results in Applied Mathematics*, Vol. 8, November 2020, 100112.
4. Jensen H.A., Jerez D.J. A stochastic framework for hydraulic performance assessment of complex water distribution networks // *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 60, April 2020, 103029.
5. Yusupbekov N.R., Adilov F.T., Ivanyan A.I. Application of Cloud Technologies for Optimization of Complex Processes of Industrial Enterprises // *13th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2018*. Pp. 852–858.
6. Strel'tsova E., Borodin A., Yakovenko I., Sokira T., Bizhanova K. Information management system of industrial enterprise in conditions of digitalization // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Vol. 10. Iss. 01, January 2019. Pp. 559–575.
7. Skvairs Dzh. *Prakticheskaya fizika* [Practical physics]. Moscow, 1971, 247 p.
8. Kolomiets L.V., Ponikarova N.Yu. *Metod naimen'shikh kvadratov* [Least square method]. Samara: Samara university Publ., 2017. 32 p.
9. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. *Optimizatsiya eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii* [Optimization of experiment in chemical technology]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1978. 319 p.
10. Lebedeva O.A., Gozbenko V.E., Pykhalov A.A. Muxopad Yu.F. *Sravnitel'nyi analiz metodov resheniya transportnykh zadach pri optimal'nom planirovaniy perevochnogo processa* [Comparative analysis of methods of solving transport problems with optimal planning of the transportation process] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2020. No. 3(67). Pp. 134–139.
11. Poltavskaya Yu.O. *Optimizatsiya transportnoi seti na osnove minimuma obshchih zatrat na dostavku грузов* [Optimization of the transport network based on the minimum total shipping costs] // *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Angarsk State Technical University Bulletin], 2019. No. 13. Pp. 178–183.
12. Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Khimiya Publ., 1973. 753 p.

13. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Primery i zadachi po kursu processov i apparatov khimicheskoi tekhnologii [Examples and problems for the course of processes and devices in chemical technology]. Al'yans, 2010, 575 p.
14. Struchenkov V.I. Diskretnaya optimizatsiya. Modeli, metody, algoritmy resheniya prikladnykh zadach [Discrete optimization. Models, methods, algorithms of solving applied problems]. Moscow: SOLON-Pr. Publ., 2016. 192 p.
15. Pavlov V.P., Karasyov G.N. Dorozhno-stroitel'nye mashiny. Sistemnoe proektirovanie, modelirovanie, optimizatsiya [Road construction machines. System design, modeling, optimization]. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-ty Publ., 2011. 240 p.
16. Ostrovskii G.M., Volin Yu.M. Metody global'noi optimizatsii slozhnykh system [Complex systems' optimization methods]. Moscow: ID MISiS Publ., 2005. 105 p.
17. Babenyshev S.V., Matyurov E.N. Metody optimizatsii [Optimization methods]. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019. 134 p.
18. Shpiyuk A.N. Metody optimizatsii v zadachakh aerogazodinamiki [Optimization methods in problems of aerogasdynamics]. Novosibirsk: NGTU Publ., 2014. 107 p.
19. Zolotarev A.A. Metody optimizatsii raspredelitel'nykh protsessov [Methods of optimizing distribution processes]. Moscow: Infra-Inzheneriya Publ., 2014. 160 p.
20. Avdyunin E.G. Modelirovanie i optimizatsiya promyshlennykh teploenergeticheskikh ustanovok [Modeling and optimization of industrial heat and power plants]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya Publ., 2019.

Информация об авторах

Бальчугов Алексей Валерьевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, e-mail: balchug@mail.ru

Гозбенко Валерий Ерофеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

Information about the authors

Aleksei V. Balchugov – Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Subdepartment of Machines and Apparatuses of Chemical Production, Angarsk State Technical University, e-mail: balchug@mail.ru

Valerii E. Gozbenko – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

ТРАНСПОРТ

TRANSPORT

Логическое управление содержанием контактной подвески в системе токосъема при интенсивном движении поездов

А. Т. Бурков, М. Ф. Мухамеджанов✉

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ mokhirbek@mail.ru

Резюме

Разработка и реализация требований по определению и подтверждению надежности, эксплуатационной готовности, ремонтнопригодности и безопасности при интенсивном движении поездов с учетом показателей качества токосъема базируется на решении задачи логического управления текущим содержанием контактной подвески. Анализ неисправностей и отказов электротяговой сети выполнен методом декомпозиции путем разделения системы передачи электроэнергии на подсистемы, включая подсистему токосъема. Физические процессы, сопровождающиеся сложными механическими, электрическими и тепловыми явлениями в скользящем контакте, использованы при разработке алгоритма прогнозирования технического состояния контактной подвески и токоприемника методом логического управления. При повышении скорости движения учтена способность системы находиться в состоянии стабильного токосъема в режимах скользящего и электродугового контакта. Изучены факторы, влияющие на нарушение стабильности токосъема. Предложен способ логического контроля элементов системы токосъема по отклонениям их характеристик в статических и динамических режимах работы контактной сети. По результатам исследований обоснована структура интегрированной интеллектуальной системы контроля и логического управления с применением средств непрерывной комплексной диагностики и мониторинга для оценки текущего состояния контактной подвески и токоприемника. Разработанная система применяется для обслуживания контактной сети по фактическому состоянию в условиях повышения технической и участковой скорости, среднесуточного пробега и среднесуточной производительности локомотива при снижении расхода электроэнергии на тягу поездов.

Ключевые слова

логическое управление, система токосъема, скользящий контакт, контактная подвеска, вставка токоприемника

Для цитирования

Бурков А. Т. Логическое управление содержанием контактной подвески в системе токосъема при интенсивном движении поездов / А. Т. Бурков, М. Ф. Мухамеджанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 78–88. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).78-88

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.01.2021, поступила после рецензирования: 22.01.2021, принята к публикации: 05.02.2021

Logical control of the catenary maintenance in the current collection system at intensive train traffic

A. T. Burkov, M. F. Mukhamedzhanov✉

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, the Russian Federation

✉ mokhirbek@mail.ru

Abstract

The development and implementation of requirements for determining and confirming reliability, operational readiness, maintainability, and safety at intensive train traffic, taking into account the quality indicators of current collection, is based on solving the problem of logical control of the current maintenance of the catenary. The analysis of faults and failures of the electric traction system is carried out by the decomposition method by means of dividing the power transmission system into subsystems, including the current collection subsystem. Physical processes accompanied by complex mechanical, electrical and thermal phenomena in the sliding contact are used in the development of an algorithm of predicting the technical condition of the contact catenary and the current collector by the method of logical control. When increasing the speed of movement, the ability of the system to be in a state of stable current collection in the sliding and electric arc contact modes is taken into account. The factors influencing the violation of the stability of the current collector are studied. A method of logical control of the elements of the current collection system by deviations of their characteristics in static and dynamic modes of operation of the catenary is proposed. Based on the results of the research, the structure of an integrated intelligent control and logic control system with the use of continuous complex diagnostics and monitoring tools to assess the current state of the catenary and current collector is justified. The developed system is used to maintain the overhead system according to the actual condition in the context of increasing

the technical and local speed, the average daily mileage and the average daily productivity of the locomotive while reducing the power consumption for train traction.

Keywords

logical control, current collection system, sliding contact, catenary, current collector strip

For citation

Burkov A.T., Mukhamedjanov M.F. Logicheskoe upravlenie sodержaniem kontaktnoi podveski v sisteme tokos"ema pri intensivnom dvizhenii poezdov [Logical control of the catenary maintenance in the current collection system at intensive train traffic]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.78–88.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).78-88

Article Info

Received: 15.01.2021, Revised: 22.01.2021, Accepted: 05.02.2021

Анализ неисправностей и отказов в электротяговой сети при скоростном движении электрического подвижного состава

Развитие высокоскоростного железнодорожного движения сопровождается решением трех важнейших проблем: «колесо – рельс», «экипаж – тяговый привод», «токоприемник – контактная подвеска» [1, 2]. При скорости движения свыше 250 км/ч достижение устойчивого токосъема возможно при совершенствовании механических и электрических элементов системы – контактная сеть, скользящий контакт, токоприемник.

Контактная сеть высокоскоростных магистралей (ВСМ), являясь распределительным звеном системы тягового электроснабжения, обеспечивает показатели перевозочного процесса в условиях повышения скоростей движения электроподвижного состава (ЭПС). Как показывает практика, при высокоскоростном движении наиболее важным фактором является стабильность токосъема, которая зависит от контактного нажатия токоприемника и параметров контактной подвески. Усиленное контактное нажатие вызывает механические повреждения как в то-

коприемнике, так и в контактной подвеске. В то же время недостаточное контактное нажатие приводит к возникновению электрической дуги, что влечет за собой электромагнитное, радио- и оптическое излучение, усиленный электрический износ контактирующих элементов (рис. 1). В результате производительность системы токосъема снижается, а затраты на обслуживание увеличиваются. Учитывая важность этих процессов, актуальной задачей является обнаружение наиболее чувствительных параметров системы токосъема для создания логического контроля с использованием современных цифровых технологий [3].

Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» за последние годы эксплуатации участков скоростного движения показывает на значительную долю отказов и неисправностей в работе контактной сети. Основная доля неисправностей в контактной сети ВСМ приходится на обрывы проводов, тросов и струн и пережоги контактного провода, т. е. на элементы контактной подвески (рис. 2) [4].

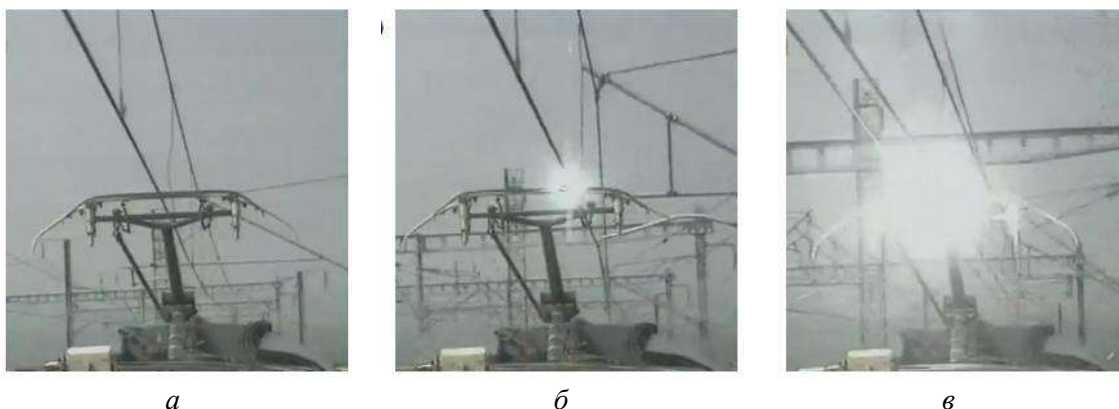


Рис. 1. Фрагменты токосъема при высокой скорости движения:
a – бездуговой токосъем; *б* – дуговой токосъем при проходе опорного узла;
в – дуговой токосъем при проходе сопряжения анкерных участков

Fig. 1. Fragments of current collection at high speed:
a – arcless current collection; *b* – arc current collection during the passage of the reference node; *c* – arc current collection during the passage of the coupling of anchor sections

Физические процессы в сильноточном скользящем контакте

Процесс передачи электрической энергии из электротяговой сети к тяговым двигателям ЭПС протекает на участке электрической цепи в зоне сильноточного скользящего контакта контактных проводов и токоведущих элементов – вставок полоза токоприемника [5]. Неподвижные контактные провода и движущиеся вставки токоприемника, электрически связанные скользящим контактом, образуют механическую систему токосъема.

Физические явления, сопровождающие сложное скользящее взаимодействие элементов системы токосъема, характеризуются электромагнитными, электрическими, механическими и тепловыми показателями, влияющими на износ контактирующих элементов, отрицательное воздействие на смежные коммуникационные системы, а главное – на снижение безотказности, эксплуатационной готовности и ремонтпригодности устройств токосъема [6].

В изучение и исследования процессов в скользящих контактах электрического транспорта внесли вклад многие ученые и специалисты. В работе [7] для уменьшения износа вставки токоприемника предложено использовать твердую смазку на основе дисульфида молибдена. Поверхность контактирующих элементов рассматривается с учетом микрошероховатости. Созданы и применяются в исследованиях экспериментальные установки для изучения токосъема в системе скользящей вставки и неподвижного контактного провода [8]. Опытными данными установлено, что при взаимодействии контактной пары «провод – вставка» с увеличением токовой нагрузки ЭПС уменьшается контактное сопротивление. Изучено явление возникновения на изношенной поверхности контактной вставки слоя ржаво-красных частиц, переносимых с контактного

провода. Установлено, что токовая нагрузка влияет на морфологию ржаво-красных слоев в более сложную микроструктуру, шероховатость которой характеризуется большим количеством изнашиваемых частиц, участвующих в режиме чистого трения. Вместе с тем при протекании тока изношенная поверхность может сформировать гораздо более плотное и гладкое состояние поверхностного слоя контактирующего элемента.

Полученные результаты исследования сильноточного скользящего контакта приводят к выводу о значительной сложности изучения физических явлений, учет влияния которых на показатели надежности представляется существенно важным.

Переходное сопротивление в контактной паре «контактный провод – вставка токоприемника»

Профиль контактирующих поверхностей оказывает существенное влияние на все контактные характеристики. Другим важным фактором, влияющим на характеристики, является образование разнообразных пленок, например, окислы, загрязняющих веществ, реактивов, образующихся на контактирующей поверхности.

Далее показана модель линий тока в контактной паре «контактный провод – вставка токоприемника» бездугового сильноточного скользящего контакта системы токосъема (рис. 3).

Линии тока в зоне контакта с неровными поверхностями контактирующих элементов стягиваются в зонах выступающих слоев шероховатого вещества. Площадь пятен, через которые замыкаются линии тока, меньше контактирующей геометрической площади соприкасающихся токоведущих элементов.

Поскольку линии протекания тока стягиваются в контактные пятна, сопротивление цепи увеличива-

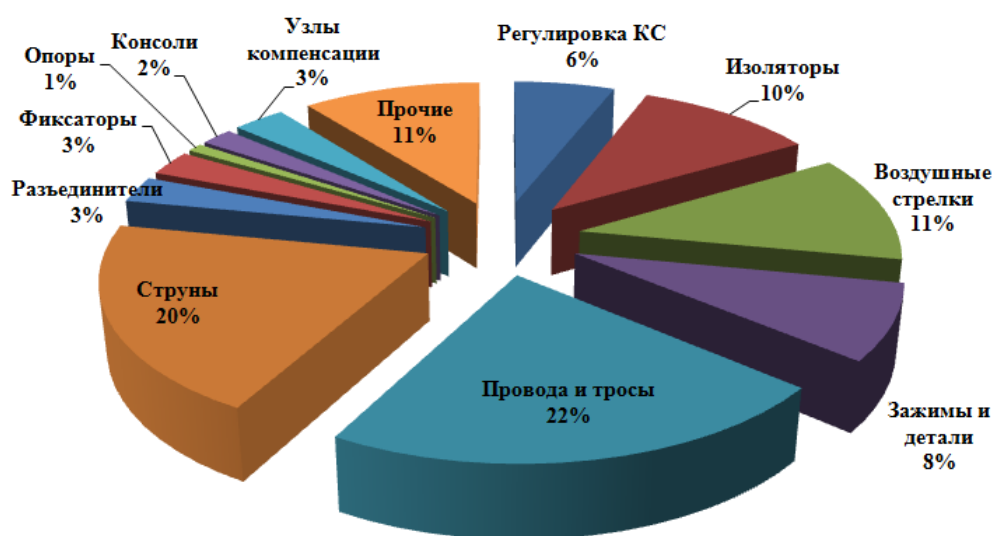


Рис. 2. Распределение неисправностей и отказов в контактной сети высокоскоростных магистралей
Fig. 2. Distribution of faults and failures in the high-speed mainline overhead system

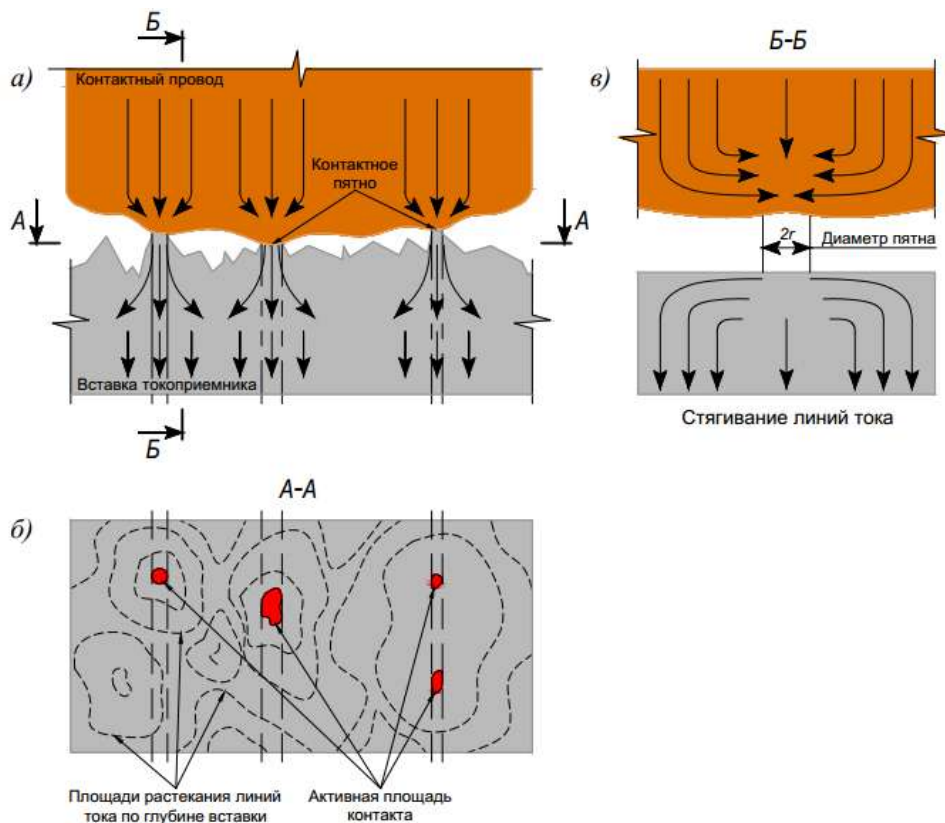


Рис. 3. Модель линий тока в контактной паре токоприемника и контактного провода:

a – продольный разрез; *б* – вид сверху; *в* – поперечный разрез

Fig. 3. Model of the current lines in the contact pair of the pantograph and contact wire:

a – longitudinal section; *b* – top view; *c* – transverse section

ется по сравнению с предполагаемым контактом, в котором линии тока проходят равномерно по всей площади. Указанное сопротивление называется сопротивлением стягивания.

Влияние оксидных, масляных, водяных пленок и пыли отражается на сопротивлении пятен переходного слоя, увеличивая его значение. Эта составляющая называется сопротивлением пленки.

Полное сопротивление, вызванное сопротивлением стягивания и сопротивлением пленки, называется контактным сопротивлением [9]. Применяется эмпирическая формула, описывающая зависимость контактного сопротивления от силы контактного нажатия:

$$R_K = \frac{k_{mx}}{F_k^n}, \quad (1)$$

где k_{mx} – коэффициент, учитывающий материал, формы и профиль поверхности контакта; F_k^n – сила контактного нажатия (в зависимости от точек соприкосновения контакта, $n = 0,5-1,0$).

Сопротивление стягивания, как основную составляющую переходного сопротивления, предлага-

ется определять, используя модель стягивания линий тока по эмпирической формуле:

$$R_c = \frac{\rho}{2rn} = \frac{\rho}{dn}, \quad (2)$$

где R_c – сопротивление стягивания; r, d – радиус и диаметр проводящего пятна; ρ – удельное сопротивление контактирующих элементов; n – число контактных пятен.

Механизм образования сопротивления пленки более сложен. Он связан с различными воздействиями окружающей среды. В сильноточном электрическом контакте из-за механического воздействия, особенно от воздействия электрической дуги, поверхностная пленка легко разрушается. Поэтому влияние пленки на общее переходное сопротивление сказывается слабо.

Нагревание сильноточного скользящего контакта

При протекании тока через скользящий контакт неизбежно возникает определенное падение напряжения на переходном сопротивлении. Это падение называется падением контактного напряжения U_K .

Джоулевы потери, создаваемые контактным сопротивлением, вызывают увеличение температуры зоны стягивания и передачу теплового потока в тепло контактирующих элементов. Это приводит к повышению температуры токоведущих частей полоза токоприемника над температурой окружающей среды.

Связь между падением контактного напряжения и температурой перегрева над окружающей средой описывается следующим образом:

$$\Delta T = \frac{U_K^2}{8\lambda\rho}, \quad (3)$$

где ΔT – температура перегрева над температурой окружающей среды от джоулевых потерь в скользящем контакте; U_K – контактное падение напряжения; $\overline{\lambda\rho}$ – среднее значение произведения теплопроводности и удельного сопротивления двух контактных материалов [9].

Структурный синтез системы токосъема

Общее воздействие на систему токосъема оказывают комбинации механических и электрических явлений.

Выделение теплоты при высокой плотности тока

скользящего контакта вызывает деформацию контактных элементов, изменяет коэффициент трения, усиливает износ и повреждает поверхность скольжения. Токовое повышение температуры – это джоулевы потери, выделяемые в зоне контакта, что является обобщенным фактором отрицательного влияния токовой нагрузки на контактное трение. Таким образом, в точках контакта образуется дополнительный источник тепловыделения из-за трения скольжения.

В случае расхождения контактирующих элементов происходит выделение тепловой энергии из-за образования столба электрической дуги между катодными и анодными областями. В данном случае выделяемая тепловая энергия распределяется по разным законам в областях развития процесса горения дуги. Тепловая энергия распределяется в соответствии с законами теплообмена посредством теплопроводности, тепловой конвекции и тепловой радиации (рис. 4).

Приведена модель структуры функционирования системы токосъема, учитывающая физические процессы тепловыделения, параметры системы токосъема, микроструктуру контактирующих поверхностей и тип контактного материала (рис. 5).

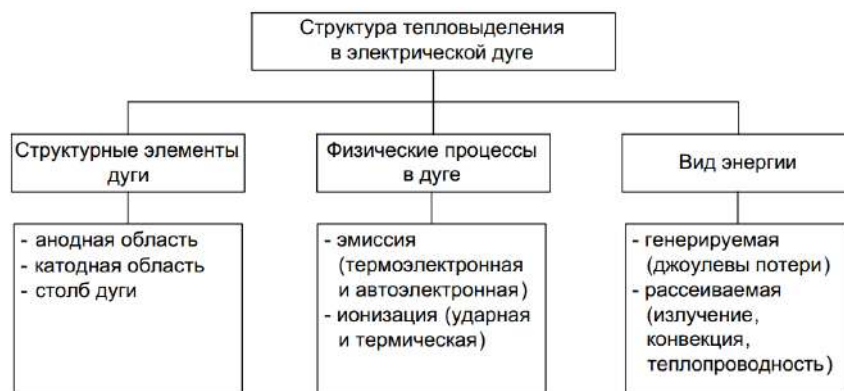


Рис. 4. Классификация тепловыделения в электрической дуге

Fig. 4. Heat release classification in an electric arc

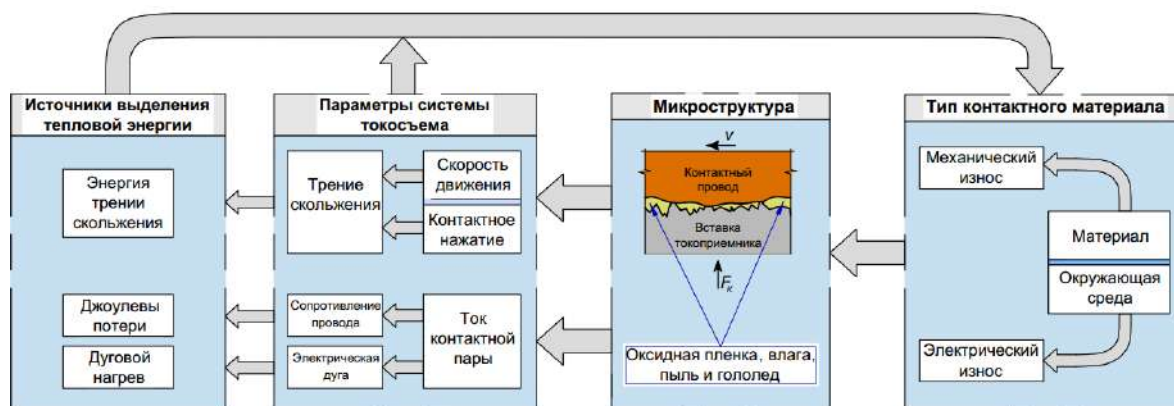


Рис. 5. Структурная модель энергетических процессов в системе токосъема

Fig. 5. Structural model of energy processes in the current collection system

В динамических системах в контактирующих элементах характерным является процесс рассеяния энергии, при котором механическая энергия обычно преобразуется в тепловую (до 90 %). В процессе трения скольжения в контактных точках образуется дополнительная тепловая энергия, а трение скольжения является основным источником тепловыделения.

Динамические характеристики высокоскоростной контактной подвески

Переходное сопротивление и трение скользящего контакта зависят от силы нажатия токоприемника и расположения проводов контактной подвески в пространстве. Положение и колебание контактного провода приводят к динамическому изменению контактного нажатия. При моделировании динамических процессов контактную подвеску рассматривают в виде системы с распределенными параметрами, в частности контактный провод представляется в виде натянутой гибкой нити.

В данном случае согласно [10] волновое уравнение натянутой нити записывается в следующей форме:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{\gamma}{\sigma} \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = 0, \quad (5)$$

где γ – плотность материала контактного провода, кг/м³; σ – механическое напряжение, Н/м².

Соответственно общее решение уравнения (5) имеет следующий вид:

$$y = f(x \pm c_p t). \quad (6)$$

При этом скорость распространения волны можно представить как

$$c_p = \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} = \sqrt{\frac{K}{m_K}}, \quad (7)$$

где K – натяжение контактного провода, кН; m_K – масса единицы длины контактного провода, кг/м.

Состояние контактного провода, нагруженного силой F_k' от токоприемника, движущегося со скоростью v , описывается уравнением

$$y(x,t) = \frac{2F_k' l}{m_K \pi^2 (c_p^2 - v^2)} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi x}{l} \left(\sin \frac{n\pi v t}{l} - \frac{v}{c_p} \sin \frac{n\pi c_p t}{l} \right), \quad (8)$$

где F_k' – постоянная сила контактного нажатия, кН; l – длина рассматриваемого участка контактной сети, в котором происходят колебания контактного провода.

Коэффициент Доплера α характеризует возможность контактной подвески при взаимодействии с токоприемником реализовать заданную наибольшую скорость движения для контактной подвески и определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{c_p - v}{c_p + v}. \quad (9)$$

Коэффициент Доплера должен быть не менее 0,2 в соответствии с нормативами [10, 11].

Наиболее важной динамической характеристикой контактной подвески является скорость распространения волны. Она накладывает принципиальное физическое ограничение на возможную скорость движения ЭПС. Фактически, по условию токосъема, превысить скорость распространения волны невозможно. Существует требование, что максимальная расчетная скорость ЭПС не должна превышать 70 % от скорости распространения волны [12].

В соответствии с международными и российскими нормами качество токосъема считается удовлетворительным при выполнении следующих условий:

- статистический минимум $F_{\min} = F_m - 3\sigma$ должен быть положительным;
- статистический максимум $F_{\max} = F_m + 3\sigma$ не превышает 300 Н для скоростей движения до 200 км/ч включительно, 350 Н – свыше 200 и до 350 км/ч (для системы тягового электроснабжения на переменном токе);
- стандартное отклонение σ не превышает $0,3 F_m$;
- процент искрений NQ не превышает 0,2;
- максимальное отжатие контактного провода токоприемником под фиксаторами без учета климатического влияния не превышает 150 мм [12–15].

При корректировке требуемых значений указанных динамических показателей контактной сети необходимо также учитывать точность регулировки таких параметров контактной подвески, как конструктивная высота контактной подвески, длина пролета между опорами, распределение эластичности в пролете. Неравномерность эластичности в пролете – значимая характеристика контактной подвески, которая выражается как

$$U = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\max} + e_{\min}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где e_{\max} и e_{\min} – максимальная и минимальная эластичности в пролете [16].

Классификация методов обслуживания контактной подвески

В настоящее время для сокращения числа нарушений в работе устройств контактной сети широкое применение находят бесконтактные методы мониторинга состояния контактной сети на базе мобильных и стационарных средств комплексной диагностики контактной сети, оснащенных датчиками и телевизионными устройствами.

Настоящие мобильные системы диагностики контактной сети (ВИКС) базируются на данных, полученных с видеорегистраторов. Имеются исследования по обнаружению отказов по дуговым нару-

шениям в системе токосъема на основе радио- и опико-электронных методов регистрации [17].

Широкое применение в определении оптимальных параметров системы токосъема находят аппараты искусственных нейронных сетей [4]. Данный метод, основанный на машинном обучении, может быть использован также для анализа рисков и прогнозирования состояния контактной сети.

На европейских ВСМ для контроля силы контактного нажатия в контактные вставки токоприемника встраиваются датчики измерения. Эти датчики регистрируют статические и динамические силы, ускорение вставок токоприемника. Для обнаружения дуговых процессов в направлении движения за токоприемником устанавливаются детекторы электрической дуги.

В КНР существует шестиуровневая система мониторинга безопасности электроснабжения высокоскоростных железных дорог «бС-система» [18]. Основной целью данной системы контроля является проведение комплексного мониторинга системы тягового электроснабжения (СТЭ), который включает в себя определение параметров высокоскоростной контактной подвески, параметров работы токоприемника, обследование контактной подвески и других показателей СТЭ. Однако увеличение интенсивности движения поездов требует также учитывать обнаружение параметров контактной сети, мониторинг состояния вставки токоприемника ЭПС и расположение элементов контактной сети в реальном времени. В связи с этим разрабатываются технологии диагностики и обследования эксплуатационных характеристик токоприемника и контактной сети ВСМ, которые в основном включают в себя три аспекта: обследование контактного провода, обследование вставки и динамических характеристик токоприемника. Исследования в этой области должны ограничиваться не только текущим состоянием и динамическим поведением токоприемника высокоскоростного поезда, но и требуется изучение процесса взаимодействия токоприемника и контактной подвески. Для того чтобы обеспечить качество конструкции высокоскоростного поезда, эксплуатационные характеристики токоприемника ЭПС и контактной сети необходимо проверять и контролировать в течение всего срока службы.

Логическое управление системой токосъема

Несвоевременное обнаружение неисправностей элементов контактной сети, неточная регулировка контактной подвески и некачественное выполнение планово-предупредительного ремонта (ППР) приводят к ухудшению показателей качества токосъема и, как следствие, к различным отказам в работе контактной сети. На повреждения в контактной сети также влияют сторонние факторы, связанные с ка-

чеством изготовления материалов, особенностью метеоусловий, погрешностями монтажа (рис. 6).

Оценка состояния контактной подвески выполняется на основе данных измерений геометрии контактной подвески и анализа показателей взаимодействия токоприемника и контактной подвески. В состоянии статики контактной подвески, без взаимодействия с токоприемником, геометрические параметры контактного провода, включая высоту, зигзагообразное расположение, толщину, а также информация о взаимном расположении проводов в пространстве являются основными данными статических измерений. При контакте с токоприемником данные динамических измерений контактной подвески в основном включают силу контактного нажатия между токоприемником и контактной подвеской, вертикальное ускорение токоприемника, вертикальное смещение (отжатие) контактного провода и токоприемника, наличие случаев возникновения дуги и т. д.

Как правило, для оценки состояния контактной подвески следует объединять оценки статического и динамического состояний. Однако, поскольку линии традиционной скорости не предъявляют высоких требований к данным динамических измерений, учет статического состояния остается доминирующим методом контроля. Для линий традиционных скоростей долгосрочная оценка состояния контактной подвески оказалась эффективной за счет элементарного замера статических данных и вычислительных приборов. Из-за технической сложности и высокой стоимости выполнения оценки динамического состояния большинство скоростных линий используют динамические данные лишь на этапе приемки, но не на этапе эксплуатации. Однако с увеличением скорости движения поездов оценка статического состояния становится недостаточной для эксплуатации и технического обслуживания высокоскоростных линий. Поскольку динамическая оценка состояния основана на данных, которые непосредственно отражают динамическое взаимодействие, она более применима для оценки состояния контактной подвески по сравнению с оценкой статического состояния.

Объектом управления (ОУ) технической системы является технологический процесс или комплекс взаимосвязанных технических устройств и подсистем. Взаимодействие ОУ и управляющего устройства организуется с помощью множества датчиков, расположенных в устройствах объекта и сигнализирующих о состоянии самого объекта и воздействии внешней среды, в которой работает объект (техническая система) или о фазе самого технологического процесса [19].

Показанные устройства управления являются логическими в том смысле, что осуществляют обработку дискретной информации (рис. 7). Сигналы

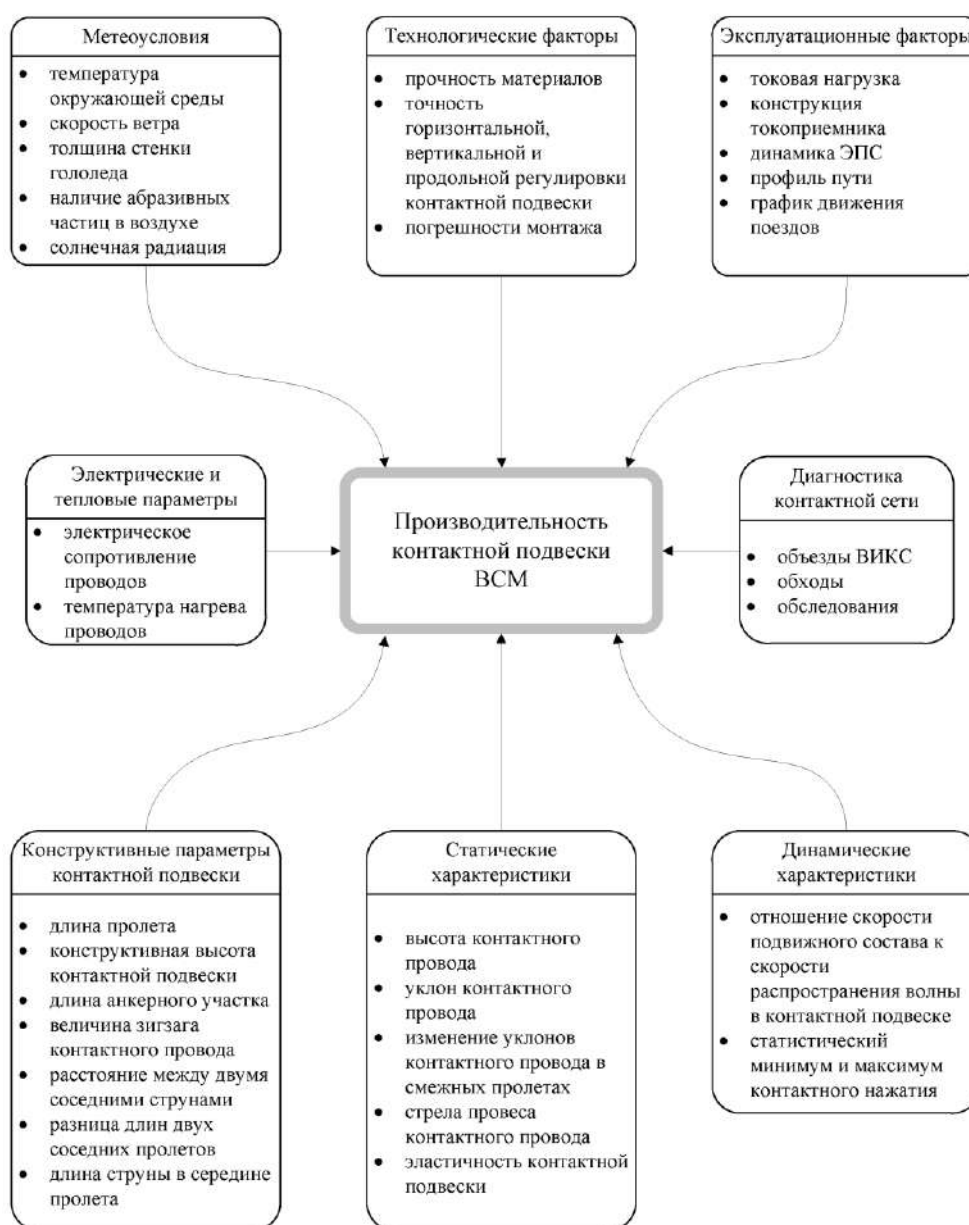


Рис. 6. Факторы, влияющие на производительность высокоскоростной контактной подвески на этапе жизненного цикла

Fig. 6. Factors affecting the performance of a high-speed catenary at the lifecycle stage

датчиков системы токосяема, как и управляющие воздействия, дискретны. Двоичные сигналы представляются некоторыми физическими величинами с двумя резко различающимися возможными значениями («бездуговой токосяем» – «дуговой токосяем»).

В случае двоичного представления сигналов управление становится логическим, а системы управления называются системами логического управления (ЛУ).

Системы ЛУ находят широкое применение в различных отраслях техники и технологий, в част-

ности, на высокоскоростном железнодорожном транспорте. Достаточность сигналов систем ЛУ обеспечивает возможность использования развитого аппарата алгебры логики для описания и реализации алгоритмов их действия.

Алгоритм управления, в том числе и логического, принципиально отличается от вычислительных алгоритмов. С помощью таких алгоритмов описывают способ гипотетической управляющей системы с некоторой средой или объектом управления. В таком устройстве теряется смысл исходного данного, так как между системой управления и объектом

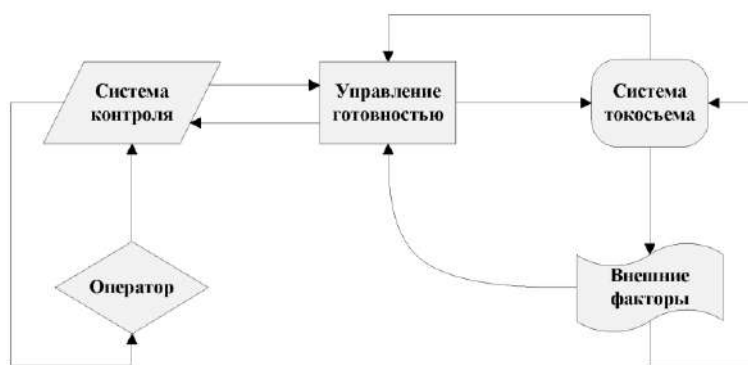


Рис. 7. Граф-схема логического управления устройствами токосъема
 Fig. 7. Graph-scheme of the logical control of current collection devices

ведется постоянный обмен информацией, данные могут поступать на вход нескончаемым потоком. Целью алгоритма является уже не получение некоторого конечного результата, а выдача ответной последовательности управляющих сигналов.

Заключение

Изучение состояния и обеспечение бездугового токосъема ВСМ должно выполняться на основе исследования физических основ формирования скользящего контакта в бездуговой области ее работы. Следует определить критериальную зависимость отклонения показателей эффективности токосъема. На основе данной зависимости необходимо создать интегрированную интеллектуальную систему кон-

троля и логического управления с применением датчиков обнаружения наиболее чувствительных параметров системы токосъема, которые в наибольшей степени влияют на формирование контакта в реальных условиях эксплуатации.

Учитывая особенности условий работы системы токосъема, при создании единой системы контроля и мониторинга необходимо принимать во внимание не только механические характеристики взаимодействия подсистемы «токоприемник – контактная подвеска» и воздействие внешней среды, но и влияние электромагнитной силы, тепловых и дуговых процессов на отклонение статических и динамических параметров контактной подвески.

Список литературы

1. Бурков А.Т., Блажко Л.С., Иванов И.А. Индустриальные технологии, мобильность и энергоэффективность электрической тяги рельсового транспорта // *Электротехника*. 2016. № 5. С. 7–13.
2. Боброва Ю.М., Пузина Е.Ю. Необходимость активизации энергосбережения в России // *Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием*. Иркутск : ИРНТУ. 2016. Т. 2. С. 142–147.
3. Хананов В.В., Бурков А.Т., Барч Д.В. Нововведения и инновационные процессы в тяговом электроснабжении // *Транспорт Российской Федерации*. 2012. № 6 (43). С. 34–39.
4. Смердин А.Н. Совершенствование системы токосъема магистральных электрических железных дорог в условиях высокоскоростного и тяжеловесного движения : дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2018. 600 с.
5. ГОСТ 32793-2014. Токосъем токоприемником железнодорожного электроподвижного состава. Номенклатура показателей качества и методы их определения. Введ. 2015–09–01. М. : Стандартинформ, 2015
6. Берент В.Я. Материалы и свойства электрического контакта в устройствах железнодорожного транспорта // М. : Интекст. 2005. 408 с.
7. Скользящий токосъем с дисульфидной смазкой в скоростных транспортных системах / К.К. Ким, А.Ю. Панычев, Л.С. Блажко и др. // *Электротехника*. 2019. № 10. С. 3–10.
8. Characteristics of the Sliding Electric Contact of Pantograph. *Contact Wire Systems in Electric Railways* / G. Wu, J. Wu, W. Wei et al. // *Energies*. 2018. №. 11 (17). P. 1–13.
9. Хольм Р. Электрические контакты. М. : Издательство иностр. лит., 1961. 464 с.
10. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A. *Contact lines for electrical railways: Planning, design, implementation, maintenance*. Berlin and Munich : Siemens, 2012. 994 p.
11. UIC 799. Characteristics of a.c. overhead contact systems for lines worked at speeds of over 200 km/h // *Translation International Union of Railways (UIC)*. 2002.
12. IEC 60913. Railway applications, fixed installations, electric traction overhead contact lines, 2013. 206 p.
13. EN 50119. Railway applications, fixed installations, electric traction overhead contact lines, 2009. 50 p.
14. Железнодорожное электроснабжение участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству // *Петербург. гос. ун-т путей сообщ. Императора Александра I : сайт*. URL: <https://www.pgups.ru/science/science-news-in-the-field-of-transport/high-speed-transport> (дата обращения 18.02.2021).

15. Тяговое электроснабжение высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства // Петербург. гос. ун-т путей сообщ. Императора Александра I : сайт. URL: <https://www.pgups.ru/science/science-news-in-the-field-of-transport/high-speed-transport/normative-documents-developed-by-fsbei-hpe-pstu/> (дата обращения 18.02.2021).
16. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железных дорог / Б.С. Григорьев, О.А. Головин, Е.Д. Викторов и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. № 4. С. 155–162.
17. Жарков Ю.И., Семенов Ю.Г. Методологические основы обнаружения опасных дефектов контактной сети и токоприемников по дуговым нарушениям токосъема автоматизированными системами контроля // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте : материалы пятого Междунар. симпозиума Eltrans-2010. ПГУПС. 2010. С. 143–151.
18. Han Z, Liu Z, Zhang G et al. Overview of non-contact image detection technology for pantograph–catenary monitoring // J China Railw Soc. 2013. № 35 (06). P. 40–47.
19. Закревский А.Д., Поттосин Ю.В., Черемисинова Л.Д. Логические основы проектирования дискретных устройств. М. : Физматлит, 2007. 592 с.

Reference

- Burkov A.T., Blazhko L.S., Ivanov I.A. Industrial'nye tekhnologii, mobil'nost' i energoeffektivnost' elektricheskoi tyagi rel'sovogo transporta [Industrial technologies, mobility and energy efficiency of electric traction of rail transport]. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2016, No. 5. Pp. 7–13.
- Bobrova Yu.M., Puzina E.Yu. Neobkhodimost' aktivizatsii energosberezheniya v Rossii [The necessity to activate energy saving in Russia]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri. Materialy Vseross. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem [Improving the efficiency of energy production and use in Siberia. Materials All-Russian scientific and practical conference with international participation]*. Irkutsk: IRNITU Publ., 2016, Vol. 2. Pp. 142–147.
- Hananov V.V., Burkov A.T., Barch D.V. Novovvedeniya i innovatsionnye protsessy v tyagovom elektrosnabzhenii [Innovations and innovative processes in traction power supply]. *Transport Rossijskoi Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2012. No. 6 (43). Pp. 34–39.
- Smerdin A.N. Sovershenstvovanie sistemy tokos"ema magistral'nykh elektricheskikh zheleznykh dorog v usloviyakh vysokoskorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk 05.22.07 [Improvement of the current collection system of main electric railways in conditions of high-speed and heavy traffic. D. Sc. (Engineering) diss. 05.22.07] Omsk, 2018. 600 p.
- GOST 32793-2014. Tokos"em tokopriemnikom zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Nomenklatura pokazatelei kachestva i metody ikh opredeleniya. [GOST 32793-2014. [Current collection using a current collector of the railway electric rolling stock. The nomenclature of quality indicators and methods of their determination].
- Berent V.Ya. Materialy i svoystva elektricheskogo kontakta v ustrojstvakh zheleznodorozhnogo transporta [Materials and properties of electric contact in railway transport devices]. Moscow: Intekst Publ., 2005, 408 p.
- Kim K.K., Panychev A.Yu., Blazhko L.S., Kolesova A.V. Skol'zyashchii tokos"em s disulfidnoi smazkoi v skorostnykh transportnykh sistemakh [Sliding current collector with a disulfide grease in high-speed transport systems]. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2019. No. 10. Pp. 3–10.
- Wu G., Wu J., Wei W., Zhou Y., Yang Z., Gao G. Characteristics of the Sliding Electric Contact of Pantograph/Contact Wire Systems in Electric Railways. *Energies*, No. 11 (17). 2018. Pp. 1–13.
- Khol'm R. Elektricheskie kontakty [Electric contacts]. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury Moscow: Publishing house of foreign literature, 1961, 464 p.
- Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A. Contact lines for electrical railways: Planning, design, implementation, maintenance. Berlin and Munich: Siemens, 2012. 994 p.
- UIC 799. Characteristics of a.c. overhead contact systems for lines worked at speeds of over 200 km/h. *Translation International Union of Railways (UIC)*, 2002.
- IEC 60913. Railway applications, fixed installations, electric traction overhead contact lines. 2013. 206 p.
- EN 50119. Railway applications, fixed installations, electric traction overhead contact lines. 2009. 50 p.
- Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya "Zheleznodorozhnoe elektrosnabzhenie uchastka Moskva – Kazan' vysokoskorostnoi zheleznodorozhnoi magistrali Moskva – Kazan' – Ekaterinburg. Tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitel'stvu" [Special technical conditions "Railway power supply of the Moscow – Kazan section of the Moscow – Kazan – Ekaterinburg high-speed railway. Technical standards and requirements for design and construction"], PGUPS Publ., 2014. 46 p.
- Proekt svoda pravil "Tyagovoe elektrosnabzhenie vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh linii. Pravila proektirovaniya i stroitel'stva" [Draft code of regulations "Traction power supply of high-speed railway lines. Rules of design and construction"]. PGUPS Publ., 2015–2017.
- Grigor'ev B.S., Golovin O.A., Viktorov E.D., Kudryashov E.V. Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskogo vzaimodeistviya tokopriemnikov i kontaktnoi podveski dlya skorostnykh elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Mathematical modeling of the mechanical interaction of pantographs and the catenary for high-speed electrified railways. Science and education]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie [Scientific and Technical Bulletin of SPbSPU. Science and education]*, 2012. No. 4. Pp. 155–162.
- Zharkov Yu.I., Semenov Yu.G. Metodologicheskie osnovy obnaruzheniya opasnykh defektov kontaktnoi seti i tokopriemnikov po dugovym narusheniyam tokos"ema avtomatizirovannyimi sistemami kontrolya [Methodological bases of detection of dangerous defects of the contact network and current collectors by arc violations of current collection by automated control sys-

tems] *Elektrifikatsiya, innovatsionnye tekhnologii, skorostnoe i vysokoskorostnoe dvizhenie na zheleznodorozhnom transporte. Materialy pyatogo Mezhdunarodnogo simpoziuma Eltrans-2010 [Electrification, innovative technologies, high-speed and high-speed rail transport. Proceedings of the Fifth International Symposium Eltrans-2010]*, 20–23 oktyabrya 2009 g., PGUPS Publ., 2010. Pp. 143–151.

18. Han Z, Liu Z, Zhang G et al. Overview of non-contact image detection technology for pantograph–catenary monitoring. *J China Railw Soc.*, 2013. No. 35 (06). Pp. 40–47.

19. Zakrevskii A.D., Pottosin Yu.V., Cheremisinova L.D. Logicheskie osnovy proektirovaniya diskretnykh ustroystv [Logical bases of designing discrete devices]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2007. 592 p.

Информация об авторах

Бурков Анатолий Трофимович – д-р техн. наук, профессор кафедры электроснабжения железных дорог, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, e-mail: atburkov@gmail.com

Мухамеджанов Мохирбек Фуркатович – аспирант кафедры электроснабжения железных дорог, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, e-mail: mokhirbek@mail.ru

Information about the authors

Anatolii T. Burkov – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Subdepartment of Power Supply of Railways, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, e-mail: atburkov@gmail.com

Mokhirbek F. Mukhamedzhanov – Ph.D. student of the Subdepartment of Power Supply of Railways, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, e-mail: mokhirbek@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).88-96

УДК 656.222

Северомуйский тоннель: развитие с учетом пропускной способности

А. В. Дмитренко, С. В. Карасёв, К. В. Королёв, А. Д. Калидова✉

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉ alexsandra_kd@bk.ru

Резюме

Северо-Муйский тоннель находится на протяженном перегоне, ограничивающем пропускную способность всей Байкало-Амурской магистрали в целом. В статье рассмотрены различные схемы пропуска поездов через однопутный элемент – тоннель. Выполнено моделирование пропуска встречных поездопотоков с целью определения возможных задержек поездов на подходе к лимитирующему однопутному элементу, в качестве которого может рассматриваться тоннель. Приведены зависимости среднего времени задержки (замедления пропуска) одного грузового поезда от продолжительности занятия однопутного элемента при различной интенсивности подхода к нему. Показаны зависимости среднего и суммарного времени задержки пропуска грузовых поездов от продолжительности занятия однопутного элемента при средней интенсивности подхода к нему шести поездов в час. В создавшихся обстоятельствах недостаточности капитальных средств для освоения возрастающих объемов перевозок, увеличения пропускной способности лимитирующего тоннельного перегона можно достичь за счет пропуска по нему пакетов поездов, организованных на вставках вторых главных путей, примыкающих к тоннелю в четном и нечетном направлениях. Предложено конструктивно-технологическое решение по увеличению пропускной способности однопутного тоннеля за счет развития смежных разъездов. На протяженных перегонах с тоннелем увеличение количества пропущенных по нему поездов обеспечивается за счет роста размеров движения, пропускаемых по ограничивающему перегону. В перспективе в случае значительного увеличения размеров движения на магистрали становится целесообразным строительство второго пути в тоннеле.

Ключевые слова

двухпутные вставки, задержка поездов, пропускная способность, разъезд, тоннель

Для цитирования

Дмитренко А. В. Северомуйский тоннель: развитие с учетом пропускной способности / А. В. Дмитренко, С. В. Карасёв, К. В. Королёв, А. Д. Калидова // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2021. – № 1 (69). – С. 88–96. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).88-96

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.01.2021, поступила после рецензирования: 12.01.2021, принята к публикации: 17.01.2021

The Severomuisk tunnel: capacity-based development

A. V. Dmitrenko, S. V. Karasev, K. V. Korolev, A. D. Kalidova✉

Siberian State University of Railways, Novosibirsk, the Russian Federation

✉ alexsandra_kd@bk.ru

Abstract

The Severomuisk Tunnel is located on an extended haul that limits the throughput capacity of the entire Baikal-Amur Highway as a whole. The article considers various schemes of handling trains through a single-track element – a tunnel. The handling of oncoming train flows was modeled in order to determine the possible delays of trains on the approach to a limiting single-track element, in the capacity of which the tunnel can be considered. Dependencies of average delay time (the delay of handling) of one freight train on duration of possession of a single-track element at different intensity of approach to single-track element are provided. Dependencies of average and total delay time of freight trains start-up on duration of occupation of single-track element with average intensity of approach to single-track element of 6 trains per hour are given. In the existing lack of capital funds, in order to absorb the increasing volume of traffic, the capacity of the limiting tunnel haul can be increased by handling through it bunches of trains organized on the inserts of the second main tracks adjacent to the tunnel in up and down directions.

A structural and technological solution for increasing the capacity of a single-track tunnel due to the development of adjacent junctions has been proposed. On extended hauls with a tunnel, the increase in the number of trains handled through it is ensured by an increase in traffic amounts handled along the limiting haul. In the future, in the event of a significant increase in the amount of traffic on the mainline, it became advisable to build a second track in the tunnel.

Keywords

double-track inserts, train delays, capacity, junction, tunnel

For citation

Dmitrenko A. V., Karasev S. V., Korolev K. V., Kalidova A. D. Severomuiskii tonnel': razvitiye s uchetom propusknoy sposobnosti [The Severomuisk tunnel: capacity-based development]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.88–96.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).88-96

Article Info

Received: 10.01.2021, Revised: 12.01.2021, Accepted: 17.01.2021

Введение

Сооружение Байкало-Амурской магистрали на Востоке страны явилось важным этапом в развитии транспортной сети железных дорог России. Ее строительство позволило создать новую дополнительную транспортную линию параллельно существующей загруженной Транссибирской магистрали. На этой дополнительной линии в период начального ее строительства еще в советские годы земляное полотно строилось под два главных пути.

На начальном этапе строительства данная линия от Усть-Кута до Тихого океана была полностью однопутной. Ввод в строй Байкало-Амурской магистрали и организация пропуска поездов на всем ее протяжении, несмотря на продолжительные их задержки в пути следования, позволил решать ряд народнохозяйственных проблем России в осуществлении перевозок грузов и пассажиров:

1. Обеспечить освоение возрастающих объемов перевозок в восточной части страны и снизить «пики расходов» от задержек грузовых поездов на особо загруженной двухпутной Транссибирской магистрали.

2. Создать возможность освоения в промышленном и хозяйственном отношении многих ранее малоосвоенных территорий России. Прежде всего, появилась большая доступность в транспортном освоении большого числа крупных предприятий, новых месторождений полезных ископаемых. Так, например, в Нерюнгри была организована в значительных объемах добыча угля.

3. Сократить пробег грузов по Байкало-Амурской магистрали через Северобайкальск на 180 км по сравнению с южным вариантом хода че-

рез Иркутск и Улан-Удэ по Транссибирской магистрали.

В то же время на Байкало-Амурской магистрали в процессе ее сооружения самым ограничивающим элементом оказался перегон, где находится Северомуйский тоннель. Его строительство осуществлялось в течение 23 лет. При этом данный тоннель оказался в неблагоприятной для строительства новой железнодорожной линии местности. В процессе его эксплуатации появилась в огромных размерах течь воды, строения пути оказались неустойчивыми.

Параллельно строительству тоннеля дополнительно по суше был проложен участок с большим руководящим подъемом через перевал. Это потребовало специальной системы организации на нем подталкивания. Весовая норма поездов оказалась ниже, чем на всей остальной протяженной магистрали. В процессе эксплуатации данного участка происходил значительный перепробег грузовых и пассажирских поездов по сравнению с кратчайшим направлением их следования через тоннель [1–4].

Увеличение эффективности Байкало-Амурской магистрали

В новых условиях в связи с ростом объемов перевозок в восточной части России, потребностями развития Восточного полигона встал вопрос об увеличении провозной способности Байкало-Амурской магистрали за счет следующих основных вариантов усиления данного технического объекта:

1. Строительство второго главного пути Северомуйского тоннеля с соответствующей его реконструкцией, в том числе с сооружением второго тоннеля.

2. Строительство дополнительного главного пути параллельно тоннелю по поверхности со значительным увеличением трассы Байкало-Амурской магистрали по сравнению со строительством второго параллельного тоннеля.

При оценке эффективности данных вариантов считается, что перегон с имеющимся однопутным тоннелем имеет ограниченную пропускную и провозную способности по сравнению с другими перегонами и не будет справляться с освоением возрастающих объемов перевозок по Байкало-Амурской магистрали. При таком подходе сложная и дорогостоящая реконструкция тоннеля представляется безальтернативной.

Существующая методика оценки пропускной способности однопутных железнодорожных линий в недостаточной степени учитывает возможность пропуска повышенных размеров движения поездов при наличии на однопутных участках в сложных условиях строительства автоблокировки на протяженных перегонах [5–8].

При этом ранее рассматривались только частные случаи вариантов организации пропуска поездопотоков, когда по всем перегонам однопутных железнодорожных линий для автоблокировки используется одинаковое количество поездов: один, полтора или два поезда в пакете для перегонов, имеющих различную протяженность. На практике оказалось, что реальное количество пропущенных грузовых поездов на однопутной линии ограничивается также наличием на разъездах разного количества приемо-отправочных путей.

В технико-экономических расчетах рассматривались преимущественно варианты, когда протяженность блок-участков на всех перегонах имеет одинаковое значение, а скорость движения грузовых поездов как по перегонам, так и по путям тоннеля, имеет повышенную величину с целью обеспечения высокой пропускной способности лимитирующего однопутного перегона на Байкало-Амурской магистрали.

Вследствие всех указанных причин в настоящее время наибольшие задержки грузовых поездов в пути следования на всей протяженной Байкало-Амурской магистрали происходят за счет ограничения в пропускной способности Северо-Муйского тоннеля. Поэтому для существующих конструкций однопутных магистральных линий в целом считается, что в случае роста объемов перевозок железнодорожным транспортом необходимо, в первую очередь, строить сплошной второй путь на перегоне, где имеются тоннели [9–12].

В существующих технико-экономических расчетах также считается, что данная техническая мера позволит не только обеспечить пропуск повышенных размеров движения, но и даст возможность значительно сократить суммарное время задержек грузовых поездов в пути следования [13, 14].

Эффективность автоблокировки зависит от размеров движения на однопутных железнодорожных линиях. В варианте отсутствия автоблокировки по каждому перегону возможно пропускать малое количество только одиночных грузовых поездов (рис. 1).

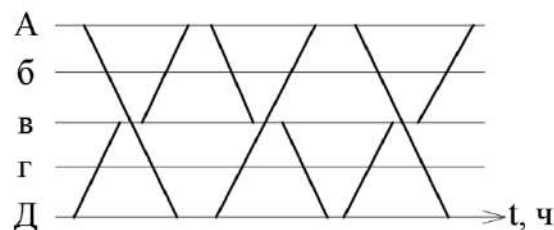


Рис. 1. Пропуск одиночных поездов по участку для малых размеров движения при отсутствии автоблокировки

Fig. 1. Handling single trains through the section for small traffic amounts in the absence of automatic blocking

При наличии автоблокировки следует также рассматривать варианты улучшения порядка использования протяженных искусственных сооружений (мостов, тоннелей) за счет совершенствования имеющихся, а также создания новых конструкций из нескольких перегонов, в которые входит дорогостоящий лимитирующий перегон большой протяженности.

Строительство сплошного второго главного пути на лимитирующем перегоне со сложными условиями, где находится протяженный тоннель, в связи с высокими затратами на его реконструкцию обычно значительно дороже по сравнению с вариантом строительства дополнительного главного пути на поверхности. Поэтому данный вариант целесообразно осуществлять только через несколько лет после общего увеличения объемов перевозок на магистральной железнодорожной линии большой протяженности.

Основные причины задержки поездов

В практических условиях эксплуатации железнодорожных линий возникает проблема длительной стоянки поездов на подходе к тоннелю. Замедление и разгон поездов перед тоннелем и после него также вызывает снижение пропускной способности однопутного перегона с тоннелем.

Можно выделить две группы основных причин, приводящих к увеличению времени следования поезда по участку.

1. Потери времени вследствие ограничения скорости из-за конструктивных параметров элементов линии и их технического состояния (инфраструктурные ограничения, в том числе конструктивные особенности и состояние тоннелей, мостов и других протяженных искусственных сооружений).

2. Потери времени из-за технологических особенностей пропуска поездов.

2.1. При снижении скорости вследствие влияния движения поездов попутного направления:

– ограничения, связанные с конструкцией или тяговыми возможностями подвижного состава (например, совмещенный пропуск скоростных и грузовых поездов, имеющих существенно различающуюся скорость и, соответственно, времена хода по перегону);

– ограничения, связанные с технологией пропуска поездов (например, необходимость снижения скорости по тяговым возможностям локомотива при пропуске тяжеловесных грузовых поездов).

2.2. Потери времени из-за задержки пропуска встречных поездопотоков при наличии на линии однопутных элементов, в том числе тоннелей [15, 16].

В случае использования на линии однопутных элементов необходимо учитывать возможное замедление пропуска поездопотока, вызванное не только конструктивными параметрами элемента трассы, но и технологией пропуска поездопотока, враждебностью с пропуском поездов встречного направления.

Моделирование задержек пропуска скоростных поездов

Для решения задачи оценки замедления пропуска поездов с учетом наличия на железнодорожной линии однопутных элементов (в том числе тоннелей) в современных условиях целесообразно использование метода моделирования [17–19]. В данном исследовании использовалась программа «Барьер-1», которая обеспечивает моделирование процесса пропуска встречных потоков поездов через однопутный элемент железнодорожной линии [19, 20].

Результаты моделирования пропуска встречных поездов через однопутный элемент [21] для каждой реализации модели представляются в виде графика, с отображением увеличения времени на подходах к однопутному элементу из-за его занятости пропуском встречного поезда (рис. 2).

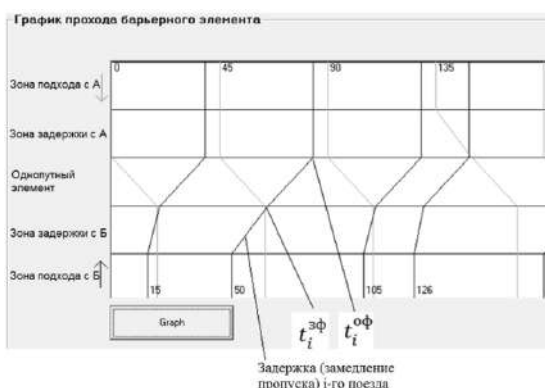


Рис. 2. График пропуска встречных поездопотоков через однопутный элемент (фрагмент)

Fig. 2. Schedule of handling oncoming train flows through a single-track element (fragment)

В этом случае в качестве основных варьируемых параметров, влияющих на задержки пропуска поездов, используются следующие:

- протяженность L_{03} однопутного элемента;
- средняя скорость V_{03} проследования элемента поездом;
- величина интервалов I между поездами;
- величина сдвижки (асинхронности) S моментов подхода поездов встречных направлений к однопутному элементу.

Модель «Барьер-1» позволяет определять количество задержек пропуска скоростных (высокоскоростных) поездов, соответствующие потери времени при наличии на линии однопутных элементов, а также расходы, связанные с увеличением нахождения поездов в пути. Эти показатели могут использоваться при технико-экономической оценке вариантов конфигурации линии для проверки допустимости использования однопутных элементов различной протяженности при разном уровне допускаемой скорости движения.

Результаты моделирования представлены на рис. 3.

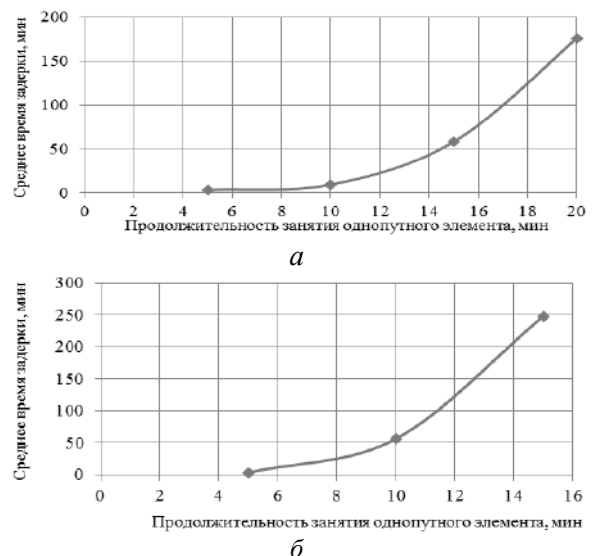


Рис. 3. Зависимость среднего времени задержки (замедления пропуска) одного грузового поезда от продолжительности занятия однопутного элемента при средней интенсивности подхода к однопутному элементу:

a – трех поездов в час; b – шести поездов в час

Fig. 3. Dependence of the average delay (handling slowdown) of one freight train on the duration of the possession of a single-track element with an average intensity of approach to a single-track element: a – three trains per hour; b – six trains per hour

Эксплуатационные расходы $\Xi_3^{Гр}$, связанные с суммарной задержкой пропуска грузовых поездов $T_3^{Гр}$ при использовании протяженных однопутных элементов можно определить по формуле:

$$\Xi_3^{\text{ГР}} = e_{\text{ГР}} \sum T_3^{\text{ГР}}, \quad (1)$$

где $e_{\text{ГР}}$ – расходная ставка на один поезд-час простаивающего в грузовом движении; $\sum T_3^{\text{ГР}}$ – суммарное время задержки грузовых поездов, ч.

Зависимости величины $\sum T_3^{\text{ГР}}$ от протяженности однопутного элемента получены методом моделирования по программе «Барьер-1». Результаты приведены (рис. 4).

В случае если время задержки грузового поезда перед однопутным элементом будет приводить к снижению темпа пропуска поездопотока, для сохранения необходимой пропускной способности потребуется устройство перед однопутным элементом накопителя очереди – раздельного пункта с путевым развитием.

Полученные результаты могут использоваться для определения величины задержки (замедления) потока грузовых поездов, пропускаемых по участку с однопутным элементом значительной протяженности, обоснования целесообразности устройства раздельных пунктов с путевым развитием на границах протяженного однопутного элемента (тоннеля). Также с помощью полученных зависимостей может выполняться оценка дополнительных расходов, связанных с замедлением пропуска поездопотока, технико-экономическая оценка мероприятий, связанных с повышением скорости движения грузовых поездов.

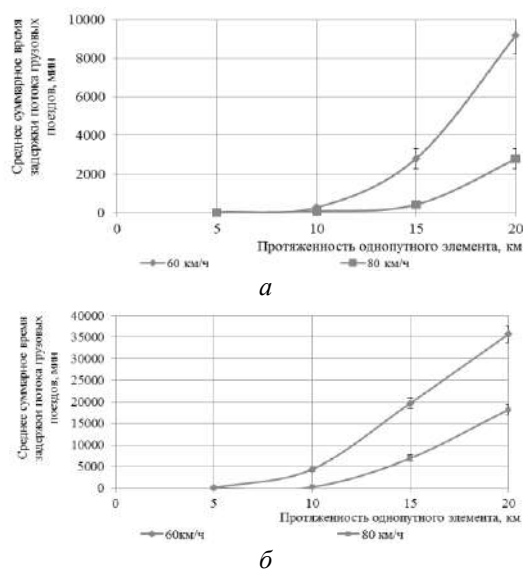


Рис. 4. Суммарная задержка пропуска грузовых поездов при средней интенсивности подхода к однопутному элементу:

a – трех поездов в час; б – шести поездов в час

Fig. 4. The total delay in the handling of freight trains with an average intensity of approach to a single-track element:

a – three trains per hour; b – six trains per hour

Строительство полностью двухпутного обхода тоннеля является весьма дорогостоящим решением.

Поэтому на современном этапе предлагается рассмотреть вариант увеличения пропускной способности ранее построенного тоннеля путем организации пакетного движения поездов и обеспечения более рациональных конструкций прилегающих к нему перегонов.

Наличие на магистрали автоблокировки позволяет обеспечивать на протяженных перегонах одновременно двух и более поездов. При повышенных размерах движения это создает возможность сокращать дополнительные задержки грузовых поездов в пути следования, вызванные недостатком в пропускной способности лимитирующих перегонов.

Одним из средств освоения повышенного объема перевозок на Байкало-Амурской магистрали является увеличение пропускной способности перегона с необходимостью усиления технического оснащения прилегающих к нему перегонов, расположенных в местности с более легкими условиями рельефа и профилем:

- укладка дополнительных приемоотправочных путей на прилегающих к тоннелю разъездах;
- укладка вторых главных путей на прилегающих к тоннелю перегонах.

При наличии на каждом разъезде кроме главного только одного приемоотправочного пути в случае оборудования участка автоблокировкой возможно пакеты поездов организовать только в одном из направлений, куда следует повышенное количество поездов (рис. 5).

В данном случае ожидание нитки графика в пропускной способности совмещается со временем образования пакета на разъезде, расположенном на подходе к лимитирующему перегону. Это обеспечивает в малой степени сокращение суммарного простаивания поездов в пути следования.

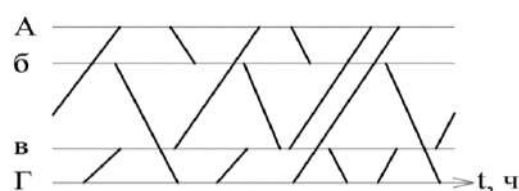


Рис. 5. Схема пропуска поездов по лимитирующему перегону при наличии на подходах разъездов с одним приемо-отправочным путем

Fig. 5. Scheme of the handling of trains on the limiting haul if there are crossing loops at the approaches with one receiving-departure track

Повысить пропускную способность лимитирующего перегона при наличии автоблокировки возможно за счет строительства дополнительных приемо-отправочных путей на прилегающих разъездах (рис. 6).

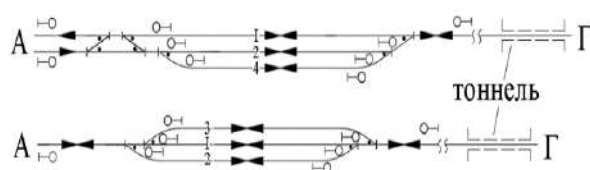


Рис. 6. Схемы раздельных пунктов перед туннелем
Fig. 6. Schemes of separate stations in front of the tunnel

С учетом остановки поездов полезная длина путей должна соответствовать максимальной длине поезда для перспективных условий.

Данная мера позволит осуществить повышение пропускной способности лимитирующего перегона за счет организации пропуска пакетов поездов в обоих направлениях (рис. 7).

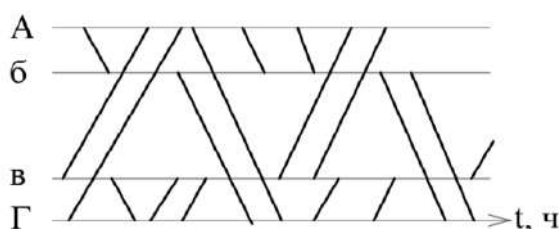


Рис. 7. Схема пропуска пакета поездов по лимитирующему перегону при наличии двух дополнительных путей на прилегающих к перегонам разъездах
Fig. 7. Scheme of handling a bunch of trains along the limiting haul in the presence of two additional tracks on the crossing loops adjacent to the hauls

Для образования пакетов поездов, следующих по туннелю, возможно осуществлять укладку дополнительных главных путей на прилегающих к туннелю разъездах. За счет организации движения поездов пакетами в этом варианте возможно усиление пропускной способности перегона с туннелем.

Однако за счет большого количества дополнительных остановок перед такими разъездами данный вариант не будет обеспечивать высокой степени использования главного пути туннеля большой протяженности и низких эксплуатационных расходов, связанных с движением поездов. В создавшейся обстановке более целесообразным является вариант строительства сплошного второго пути на прилегающих к туннелю перегонах с легким профилем.

Новые научные исследования показали, что в связи с особенностями в эксплуатационной работы полигонов, усилением пропускной способности одного элемента возможно будет улучшать как пропускную способность, так и эксплуатационные показатели смежных станций и перегонов [21–25]. При рациональных конструкциях за счет усиления технического оснащения одного перегона можно повышать пропускную способность и снижать эксплуатационные расходы, связанные с движением грузо-

вых поездов по всей магистральной железнодорожной линии (рис. 8).

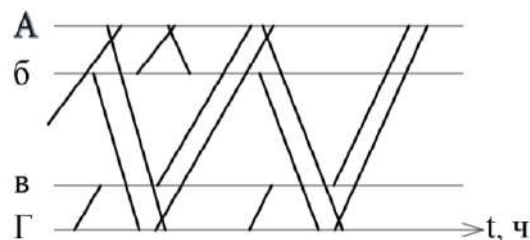


Рис. 8. Схема пропуска пакета поездов при наличии двухпутных вставок на прилегающих к туннелю перегонах А-б и в-Г

Fig. 8. Scheme of the handling of a bunch of trains in the presence of double-track inserts on the hauls A-b and c-D adjacent to the tunnel

Укладка дополнительного количества путей на разъездах для существующих конструкций участков приведет к увеличению времени простоя составов грузовых поездов под скрещением на подходах к туннелю. Данный перегон является ограничивающим в пропускной способности в целом по всей магистральной железнодорожной линии (например, Северомуйского туннеля на БАМе). Пропуск повышенных размеров движения в этом случае вызовет значительные затраты от увеличения времени нахождения поездов в пути следования за счет возрастающих задержек.

При наличии автоблокировки можно также рассматривать варианты улучшения порядка использования протяженных искусственных сооружений (мостов, туннелей) посредством совершенствования, а также создания новых конструкций из нескольких перегонов, в которые входит дорогостоящий лимитирующий перегон большой протяженности.

Приведенная система организации пропуска поездов и управления движением на однопутных железнодорожных линиях может быть успешно применена на протяженном перегоне, где расположен ограничивающий Северо-Муйский туннель, имеющий худшие технико-экономические показатели в эксплуатационной работе всей Байкало-Амурской магистрали.

Ранее выполненные исследования показали, что при ограниченных капитальных вложениях наибольший эффект достигается в вариантах, когда осуществляется усиление пропускной способности ограничивающих перегонов за счет строительства сплошных вторых путей на смежных перегонах с более легким профилем. В этом случае при меньших удельных капитальных вложениях целесообразно укладку вторых путей осуществлять на двух перегонах, смежных с лимитирующим.

Тогда при увеличении емкости в путевом развитии в целом для всего участка создается возмож-

ность повышения пропускной способности лимитирующих перегонов путем увеличения количества поездов в пакетах, а также за счет организации тягеловесного движения [26–28].

По тоннелю большой протяженности может быть пропущено большое количество поездов путем организации пакетного движения при наличии двух и более поездов в пакете по сравнению с короткими перегонами, но малым количеством дополнительных путей на примыкающих раздельных пунктах.

Построение графиков движения показало, что существующая структура магистральных однопутных железнодорожных линий, когда на каждом разъезде обычно кроме главного имеется только два дополнительных пути, не позволяет в дальнейшем по всей магистральной однопутной железнодорожной линии обеспечивать пропуск большого количества поездов в пакете в обоих направлениях.

Таким образом, для существующей системы эффективными становятся компоновочные решения с укладкой дополнительных путей, примыкающих к дорогостоящему протяженному тоннелю или устройством разъездов с двумя приемоотправочными путями. Экономическая эффективность данного мероприятия повышается, если обеспечиваются легкие условия укладки дополнительных путей. В этом случае становятся более рациональными структуры, когда на прилегающих к тоннелю легких по условиям строительства перегонах будут укладываться сплошные вторые главные пути (рис. 9).

В данном случае будет достигаться существенный прирост пропускной способности лимитирующего

перегона. Эта мера позволит сократить суммарные задержки грузовых поездов, вызванные недостатком в пропускной способности лимитирующего перегона на всей Байкало-Амурской магистрали.



Рис. 9. Схема тоннеля с прилегающими двухпутными перегонами

Fig. 9. Diagram of the tunnel with adjacent double-track hauls

Выводы

При решении задачи повышения пропускной способности протяженного лимитирующего перегона, особенно при наличии дорогостоящих искусственных сооружений (мостов и тоннелей), эффективным решением является использование автоблокировки.

Для улучшения качества использования тоннелей (с точки зрения пропуска поездопотока), повышения их пропускной способности следует на прилегающих к ним перегонах строить вторые главные пути с легким профилем с целью организации пропуска поездов пакетным способом.

Устройство дополнительных главных путей на прилегающих к тоннелю перегонах при благоприятных для строительства местных условиях позволяет увеличивать пропускную способность всей магистральной железнодорожной линии за счет повышения качества пропуска поездопотока через соответствующий лимитирующий перегон.

Список литературы

1. Аксененко Н.Е., Дмитренко А.В., Милованов И.А., Поздеев В.Н. Перспективы развития транспорта при переходе к рынку. Железнодорожный транспорт. 1993. № 2. С. 37–42.
2. Быков Ю.А. Основные системотехнические принципы проектирования железных дорог // Совершенствование теории и практики проектирования, реконструкции и эксплуатации железных дорог : межвуз. сб. науч. тр. Хабаровск, 1994. С. 17–23.
3. Экономические изыскания и основы проектирования железных дорог : учебник для вузов ж.д. транспорта / под ред. Б.А. Волкова. М. : Маршрут, 2005. 408 с.
4. Нехорошков В.П. Железнодорожный транспорт в развитии внешнеэкономической деятельности восточных регионов России. Новосибирск : Наука, 2011. С. 228.
5. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте / П.С. Грунтов и др. М. : Транспорт, 1994. 544 с.
6. Левин Д.Ю., Павлов В.Л. Расчет и использование пропускной способности железных дорог. М. : 2011. 364 с.
7. Умаров Х.К. Увеличение пропускных способностей лимитирующего перегона линии Ангрэн – Пап // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2015. Вып. 2(43). С. 84–90.
8. История железнодорожного транспорта России / Г.М. Фадеев, Ф.К. Амелин, Ф.К. Бернгард и др. // СПб. ; М. : Петербург. гос. ун-т путей сообщ., 1994. 335 с.
9. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. М. : Техинформ, 2011. 291 с.
10. Козлова С.Б. К вопросу усиления пропускных способностей полигонов транспортной сети // Вестник ЦНИИ МПС. 1969. № 6. С. 25–28.
11. Бородин А.Ф. Новая система организации грузового движения на железных дорогах Польши // Железнодорожный транспорт. Сер.: Организация движения и пассажирские перевозки. Вып. 4. М. : ЦНИИТЭИ. 1997.
12. Бубнова Г.В., Федоров Ю.Н. Об эффектах специализации железнодорожных линий // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 6 (44). С. 62–69.

13. Goverde R.M. A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks // *Transportation Research. Part C: Emerg. Technol.* 2010. № 18 (3). P. 269–287.
14. Method of analysis for delay propagation in a single-track network / Anette Østbø Sørensen, Andreas Dypvik Landmark, Nils O.E. Olsson et al. // *Journal of Rail Transport Planning & Management.* 2017. № 7. P. 77–97.
15. Higgins A. Optimal scheduling of trains on a single line track / A. Higgins, E. Kozan, L. Ferreira et al. // *Transportation Research. Part B.* 1996. № 30 (2). P. 147–161.
16. Timetabling optimization of a mixed double- and singletracked railway network / E. Castillo, I. Gallego, J. Urena & J. Coronado // *Applied Mathematical Modelling.* 2011. № 35. P. 859–878.
17. Assad A. Models for rail transportation // *Transportation Research. Part A.* 1980. № 14 (3). P. 205–220.
18. Carey M., D. Lockwood A model, algorithms and strategy for train pathing // *Journal of the Operational Research Society.* 1995. Vol. 46. № 8. P. 988–1005.
19. Программный продукт имитационного моделирования пропуска поездов через однопутное барьерное место инфраструктуры «ИМ Барьер-1»: свидетельство о регистр. электрон. ресурса ОФЭРНЮ №22781 от 23.05.2017. / С. В. Карасев, А. Д. Калидова. Новосибирск, 2017.
20. Калидова А.Д. Алгоритм пропуска скоростных поездов через барьерные места инфраструктуры // *Политранспортные системы: сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2017. С. 22–29.*
21. Estimation of conditions of using combined single-track and double-track railways at high-speed traffic [Электронный ресурс] / S. Karasev, A. Kalidova, A. Dmitrenko et al. // *Polytransport Systems: X International Scientific and Technical Conference. MATEC Web of Conferences.* 2018. Vol. 216. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821602010> (дата обращения 27.02.2021).
22. Дмитренко А.В., Карасев С.В., Пурэв Батхуяг. Эффективность оборудования автоблокировкой перегонов в зависимости от их протяженности // *Науч. пробл. трансп. Сибири и Дальн. Востока.* 2014. № 1-2. С. 146–149.
23. Дмитренко А.В., Карасев С.В. США и Россия: оптимальный вес грузовых поездов и развитие инфраструктуры // *Вестник транспорта.* 2015. № 12. С. 12–15.
24. Дмитренко А.В. Эффективность сооружения дополнительных главных путей на существующих железнодорожных линиях // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2014. № 4 (44). С. 154–161.
25. UIC – International union of railways. The worldwide railway organization : site. URL: <http://uic.org> (дата обращения 20.02.2021).
26. Юрина О.П. Принципы управления вагонным парком в современных условиях // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.* 2015. № 4. С. 14–17.
27. Юрина О.П., Танайно Ю.А. Особенности формирования тяжеловесных поездов на Западно-Сибирской железной дороге // *Транспорт Урала.* 2016. № 4 (40). С. 81–84.
28. Юрина О.П., Танайно Ю.А. Особенности организации работы с поездами повышенного веса на Западно-Сибирской железной дороге // *Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщ.* 2017. № 4(43). С. 60–65.

References

1. Aksenenko N.E., Dmitrenko A.V., Milovanov I.A., Pozdeev V.N. Perspektivy razvitiya transporta pri perekhode k rynku [Prospects for the development of transport during the transition to the market]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, 1993. No. 2. Pp. 37–42.
2. Bykov Yu.A. Osnovnye sistemotekhnicheskie printsipy proektirovaniya zheleznykh dorog [Basic system engineering principles of railway design]. *Sovershenstvovanie teorii i praktiki proektirovaniya, rekonstruksii i ekspluatatsii zheleznykh dorog. Mezhd. sb. nauch. trudov. [Improvement of the theory and practice of railway design, reconstruction and operation of higher education institution: an interuniversity coll. of academic articles]*. Khabarovsk, 1994. Pp. 17–23.
3. Volkov B.A., Turbin I.V., Svintsov E.S., Lobanova N.S. Ekonomicheskie izyskaniya i osnovy proektirovaniya zheleznykh dorog: Uchebnik dlya vuzov zh.d. transporta [Economic research and the basis of railway design: a textbook for railway transport universities]. In Volkov B.A. (ed.) Moscow: Marshrut Publ., 2005. 408 p.
4. Nekhoroshkov V.P. Zheleznodorozhnyi transport v razvitií vneshneekonomicheskoi deyatel'nosti vostochnykh regionov Rossii [Railway transport in the development of foreign economic activity in the eastern regions of Russia]. Novosibirsk. Nauka Publ., 2011. Pp. 228.
5. Gruntov P.S. et al. Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi i kachestvom perevozok na zheleznodorozhnom transporte [Management of railway transport operations and quality]. Moscow: Transport Publ., 1994. 544 p.
6. Levin D.Yu., Pavlov V.L. Raschet i ispol'zovanie propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog [Calculation and use of railway capacity]. Moscow, 2011. 364 p.
7. Umarov Kh.K., Svintsov E.S. Uvelichenie propusknykh sposobnostei limitiruyushchego pereгона linii Angren – Pap [Increase in the throughput capacity of the limiting haul Angren – Pap]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Izvestia of the St. Petersburg University of Railways]*, 2015. Vol. 2 (43). Pp. 84–90.
8. Fadeev G.M., Amelin F.K., Bernhard F.K. et al Istoriya zheleznodorozhnogo transporta Rossii [History of Railway Transport of Russia]. St. Petersburg–Moscow, 1994. 335 p.
9. Instruksiya po raschetu nalichnoi propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog [Instructions for calculating the available capacity of railways]. Moscow, 2011. Technical inform. 291 p.
10. Kozlova S.B. K voprosu usileniya propusknykh sposobnostei poligonov transportnoi seti [On the issue of strengthening the pro-launch abilities of the polygons of the trans-tailor network]. *Vestnik TsNII MPS [Bulletin of the Central Research Institute of the Ministry of Railways]*, 1969. No. 6. Pp. 25–28.

11. Borodin A.F. Novaya sistema organizatsii gruzovogo dvizheniya na zheleznykh dorogakh Pol'shi [A new system for organizing freight traffic on the railways of Poland]. *Zheleznodorozhnyi transport. Seriya: Organizatsiya dvizheniya i passazhirskie perevozki [Railway transport. Series: Organization of traffic and passenger transportation]*, Iss. 4 Moscow: TsNIITEI Publ., 1997.
12. Bubnova G.V., Fedorov Yu.N. Ob effektakh spetsializatsii zheleznodorozhnykh liniy [On the effects of specializing railway lines]. *Mir transporta [The world of transport]*, 2012. Vol. 10, No. 6 (44). Pp. 62–69.
13. Goverde R.M. A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research. Part C: Emerg. Technol.*, 2010. No. 18 (3). Pp. 269–287.
14. Sørensen A., Landmark A., Olsson N., Seim A. Method of analysis for delay propagation in a single-track network. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2017. No. 7. Pp. 77–97.
15. Higgins A., Kozan E., Ferreira L. Optimal scheduling of trains on a single line track. *Transportation Research. Part B*, 1996. No. 30 (2). Pp. 147–161.
16. Castillo E., Gallego I., Urena J., Coronado J. Timetabling optimization of a mixed double- and single-tracked railway network. *Applied Mathematical Modelling*, 2011. No. 35. Pp. 859–878.
17. Assad A. Models for rail transportation. *Transportation Research. Part A*, 1980. No 14 (3). Pp. 205–220.
18. Carey M., Lockwood D. A model, algorithms and strategy for train pathing. *Journal of the Operational Research Society*, 1995. Vol. 46. No. 8. Pp. 988–1005.
19. Karasev S.V., Kalidova A.D. Programma imitatsionnogo modelirovaniya propuska poezdov cherez odnopusnoe bar'ernoe mesto infrastruktury «Bar'er-1» [The program of simulation modeling of the passage of trains through the single-track infrastructure barrier “Barrier-1”]. Novosibirsk, 2017. State registration number OFERNiO 22781 dated May 23, 2017.
20. Kalidova A.D. Algorithm propuska skorostnykh poezdov cherez bar'ernye mesta infrastruktury [An algorithm for passing high-speed trains through infrastructure barrier places] *Politransportnye sistemy: sb. nauchn. st. mezhdunarodnoi nauch.-tekh. konf. [Polytransport systems: a coll. of academic art. International scientific and technical conf.]* Novosibirsk: SGUPS Publ., 2017. Pp. 22–29.
21. Karasev S., Kalidova A., Dmitrenko A., Sivitskii D. Estimation of conditions of using combined single-track and double-track railways at high-speed traffic [Electronic media]. *X International Scientific and Technical Conference “Polytransport Systems”*. MATEC Web of Conferences, 2018. Vol. 216. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821602010>. Accessed: ???
22. Dmitrenko A.V., Karasev S.V., Purev Bathuyag. Effektivnost' oborudovaniya avtoblokirovki peregonov v zavisimosti ot ikh protyazhennosti [Efficiency of equipment by self-locking of hauls depending on their length]. *Nauchn. probl. transp. Sibiri i Dal'n. Vostoka [Scientific probl. of transport of Siberia and Far East]*, 2014. No. 1-2. Pp. 146–149.
23. Dmitrenko A.V., Karasev S.V. SShA i Rossiya: optimal'nyi ves gruzovykh poezdov i razvitie infrastruktury [USA and Russia: optimal weight of freight trains and infrastructure development]. *Vestnik transporta [Bulletin of transport]*, No. 12. 2015. Pp. 12–15.
24. Dmitrenko A.V. Effektivnost' sooruzheniya dopolnitel'nykh glavnykh putei na sushchestvuyushchikh zheleznodorozhnykh liniyakh [Efficiency of construction of additional main tracks on existing railway lines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2014. No. 4 (44). Pp. 154–161.
25. UIC – International union of railways. The worldwide railway organization [Electronic media]. URL: <http://uic.org/>. Accessed:
26. Yugrina O.P. Printsipy upravleniya vagonnym parkom v sovremennykh usloviyakh [Principles of railcar fleet management in modern conditions]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka [Scientific problems of transport of Siberia and the Far East]*, 2015. No. 4. Pp. 14–17.
27. Yugrina O.P., Tanaino Yu.A. Osobennosti formirovaniya tyazhelovesnykh poezdov na Zapadno-Sibirskoi zheleznoi doroge [The peculiarities of the formation of heavy-weight trains on the West Siberian Railway]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2016. No. 4 (40). Pp. 81–84.
28. Yugrina O.P., Tanaino Yu.A. Osobennosti organizatsii raboty s poezdami povyshennogo vesa na Zapadno-Sibirskoi zheleznoi doroge [The peculiarities of the organizations of operation of heavy-weight trains on the West Siberian Railway]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of the Siberian State University of Railways]*, 2017. No. 4 (43). Pp. 60–65.

Информация об авторах

Дмитренко Алексей Васильевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры железнодорожных станций и узлов, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: dmitrenkoav@mail.ru

Карасёв Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры железнодорожных станций и узлов, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: gdsugdsu@yandex.ru

Королёв Константин Валерьевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры геотехники, тоннелей и метрополитенов, Сибирский государственный университет путей сообщения, e-mail: korolev_kv@mail.ru

Калидова Александра Дмитриевна – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры железнодорожных станций и узлов, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: alexandra_kd@bk.ru

Information about the authors

Aleksei V. Dmitrenko – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Subdepartment of Railway Stations and Hubs, the Siberian State University of Railways, Novosibirsk, e-mail: dmitrenkoav@mail.ru

Sergei V. Karasev – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Railway Stations and Hubs, the Siberian State University of Railways, Novosibirsk, e-mail: gdsugdsu@yandex.ru

Konstantin V. Korolev – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor, Department of Geotechnics, Tunnels and Subways, Siberian State University of Railways, e-mail: korolev_kv@mail.ru

Aleksandra D. Kalidova – Ph.D. in Engineering Science, the Subdepartment of Railway Stations and Hubs, the Siberian State University of Railways, Novosibirsk, e-mail: alexandra_kd@bk.ru

Оценка состояния буксовых узлов колесных пар грузовых вагонов с использованием вибродиагностического стенда ОМСД-03

Л. В. Мартыненко, М. Г. Кушков✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ mihail.kushkov@yandex.ru

Резюме

В статье рассмотрен комплекс вибродиагностики ОМСД-03, предназначенный для выявления возможных дефектов и неисправностей подшипниковых узлов. Предложены рекомендации и мероприятия, направленные на повышение безопасности движения подвижных составов, которые эксплуатируются в том числе и на горно-перевальных участках Восточного полигона. Наличие отказов и неисправностей напрямую связано с условиями эксплуатации, особенно в осенне-зимний период. Наиболее частой неисправностью в работе подшипниковых узлов является обводнение смазки, которое приводит к потере ее свойств. Например, в условиях резких температурных перепадов (в осенне-зимний период) пластическая смазка в буксе типа ЛЗ-ЦНИИ меняет свои свойства, в том числе за счет обводнения и образования кристаллов льда. Эти кристаллы вызывают изменение коэффициента трения, разрушение сепараторов и заклинивание подшипников. Любое нарушение работоспособности подшипникового узла приводит к частичному или полному его отказу. Срабатывание систем многофункционального комплекса технических средств и постов безопасности зачастую вынуждает производить выкатку колесной пары и обследовать ее на вибродиагностическом стенде ОМСД-03. Результаты тестовых исследований колесной пары на стенде ОМСД-03 позволяют установить причины отказа буксовых узлов и принять меры по ее восстановлению, обеспечивая при этом безопасность движения состава в целом. После каждого схода вагона колесные пары проходят полную ревизию и обследование на ОМСД-03 по акту расследования.

Ключевые слова

вибродиагностический стенд ОМСД-03, подшипниковый узел, подвижной состав, колесная пара, обводнение смазки, изменение коэффициента трения, разрушение сепаратора, заклинивание подшипника, комплекс технических средств многофункциональный, автоматический контроль технического состояния железнодорожного подвижного состава

Для цитирования

Мартыненко Л. В. Оценка состояния буксовых узлов колесных пар грузовых вагонов с использованием вибродиагностического стенда ОМСД-03 / Л. В. Мартыненко, М. Г. Кушков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 97–103. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).97-103

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.08.2020, поступила после рецензирования: 18.08.2020, принята к публикации: 21.10.2020

Assessment of the condition of axle box units of wheelsets of freight railcars using the vibration diagnostic stand OMSD-03

L. V. Martynenko, M. G. Kushkov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ mihail.kushkov@yandex.ru

Abstract

The article describes the complex of vibration diagnostics OMSD-03 designed to detect possible defects and malfunctions of bearing units. It proposes recommendations and measures aimed at improving the safety of rolling stock that is also operated on the mountain-pass sections of the Eastern polygon. The presence of failures and malfunctions is directly related to operating conditions, especially in the autumn and winter period. The most frequent malfunctions in the operation of bearing units are the lubricant watering, which leads to the loss of its properties. For example, in conditions of sharp temperature changes (in the autumn and winter period), the plastic lubricant in the box of the LZ-TsNII type changes its properties due to watering and the formation of ice crystals. These crystals induce a change in the friction coefficient, the possibility of destruction of separators and the seizure of bearings. Any malfunction of the bearing unit leads to partial or complete failure. The activation of the KTSM systems and safety posts often forces the wheelset to be rolled out and examined on the vibration diagnostic stand OMSD-03. The results of test studies of the wheelset on the stand OMSD-03 allows you to determine the reasons for the failure of the axle box units and take measures to restore it, while ensuring the safety of the movement of the train as a whole. After each railcar derailment, the wheel pairs undergo a full audit and examination on the OMSD-03 according to the act of investigation.

Keywords

Vibration diagnostic stand OMSD-03, bearing unit, rolling stock, wheelset, watering of lubricant, change in the friction coefficient, destruction of separators, seizure of a bearing, multifunctional complex of technical means, automatic control of a technical condition of the railway rolling stock

For citation

Martynenko L. V., Kushkov M. G. Otsenka sostoyaniya buksovykh uzlov kolesnykh par gruzovykh vagonov s ispol'zovaniem vibrodiagnosticheskogo stenda OMSD-03 [Assessment of the condition of axle box units of wheelsets of freight railcars using the vibration diagnostic stand OMSD-03]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.97–103.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).97-103

Article Info

Received: 15.08.2020, Revised: 18.08.2020, Accepted: 21.10.2020

Введение

Важную роль в развитии и функционировании экономики страны играет железнодорожный транспорт. Он обеспечивает своевременное, качественное и полное удовлетворение потребностей всех отраслей деятельности и населения в перевозках. В настоящее время увеличение объема перевозимых грузов влияет не только на безопасность движения подвижного состава, но и отражается на его техническом состоянии [1–5].

Решение этих сложных задач осуществляется с помощью включения ряда основных мероприятий:

- снижение количества внеплановых отцепок;
- внедрение современного оборудования для своевременного обнаружения и устранения неисправностей в деталях и узлах подвижного состава;
- увеличение гарантийных участков с высоким уровнем обеспечения безопасности движения.

Возрастание интенсивности движения грузовых поездов привело к тому, что увеличились требования к безопасности, особенно к ходовым частям вагона (фрикционных узлов, пружинных комплектов, поглощающих аппаратов и буксовых узлов в целом). В результате более 25 % отцепок вагонов происходит по неисправности узлов тележек. Для того чтобы соответствовать этим требованиям, необходимо обеспечить безопасность движения подвижного состава, поэтому предприятия уделяют огромное внимание внедрению современного оборудования контроля и диагностики. Проблема качества и надежности остро стоит перед предприятиями, выпускающими технически сложное оборудование, выход из строя которого может повлечь человеческие жертвы или крупные материальные потери.

Вибродиагностический комплекс ОМСД-03

Комплекс вибродиагностики ОМСД-03 предназначен для выявления дефектов и неисправностей с помощью измерений виброакустических сигналов, идущих от тел качения подшипника. Колесные пары, которые являются источником срабатывания комплекса технических средств мониторинга (КТСМ) в движении, как правило выкатываются и обследуются с помощью вибродиагностики. Буксовый узел в движении всегда находится под силовой нагрузкой от массовых сил. Так, например, в условиях резких температурных перепадов (в осенне-зимний период) пластическая смазка в буксе (буксол, ЛЗ–ЦНИИ), меняет свои свойства, в том числе

за счет обводнения и образования кристаллов льда. Эти кристаллы могут изменять коэффициент трения, вызывать разрушение сепараторов и заклинивание подшипников. Далее показаны наиболее часто встречающиеся неисправности буксового узла, где основными являются отказы деталей крепления и тел качения подшипника (ролика) (рис. 1).

После замены подшипников скольжения на подшипники качения увеличилось количество сходов, обусловленных интенсивными колебаниями вагонов, особенно в порожнем состоянии. Колебания вагонов возникают по разным причинам, одной из них является неправильная работа буксовых узлов, вызванная внутренними неисправностями, которые создают дополнительную динамику подвижного состава. Буксовый узел – важнейший конструктивный элемент, он обеспечивает вращение колесной пары при движении, а также служит для передачи на ось статических и динамических нагрузок. Известно, что колесная пара обеспечивает непосредственный контакт колеса с рельсом, от ее технического состояния зависит безопасность движения. Взаимодействие колеса и рельса имеет сложный характер и сопровождается качением, поперечным и продольным проскальзыванием [6–7]. Динамические воздействия на рельс могут возбуждать симметричные (сжатия – растяжения) и асимметричные (изгибные) методы колебаний. Увеличение колебаний может привести к дополнительным вертикальным и боковым силам, которые могут привести к вползанию колеса на рельс или к излому шейки оси, что повлечет сход подвижного состава. Своевременное обнаружение и устранение неисправностей обеспечит безопасность движения подвижного состава (рис. 2).

Комплекс ОМСД-03 включает:

- систему вибродиагностики подшипников буксовых узлов в составе стэнда и размещенного в нем программно-аппаратного модуля [8];
- систему вибродиагностики буксовых узлов колесных пар в составе стэнда и программно-аппаратного модуля, размещаемого в шкафу управления.

Стэнд вращения колесной пары обеспечивает:

- разгон колесной пары до частоты не менее 280 об/мин;
- торможение и остановку в заданном режиме;
- измерение частоты вращения с помощью оптического датчика.

Программный комплекс диагностики механизмов (ПКДМ) осуществляет:

- сбор и хранение диагностической информации;
- выдачу результатов диагностики в формате годен / брак;
- получение сводных отчетов за установленный период и развернутых по выбранному объекту;
- передачу информации о проведенных замерах

по системе передачи данных ОАО «РЖД» или через Интернет.

Преимущества комплекса ОМСД-03:

1. Исключено влияние человеческого фактора. Организован режим автоизмерения, который позволяет в автоматическом режиме с учетом проведения обкатки колесной пары производить весь цикл работ. Данная операция сводит до минимума влияние

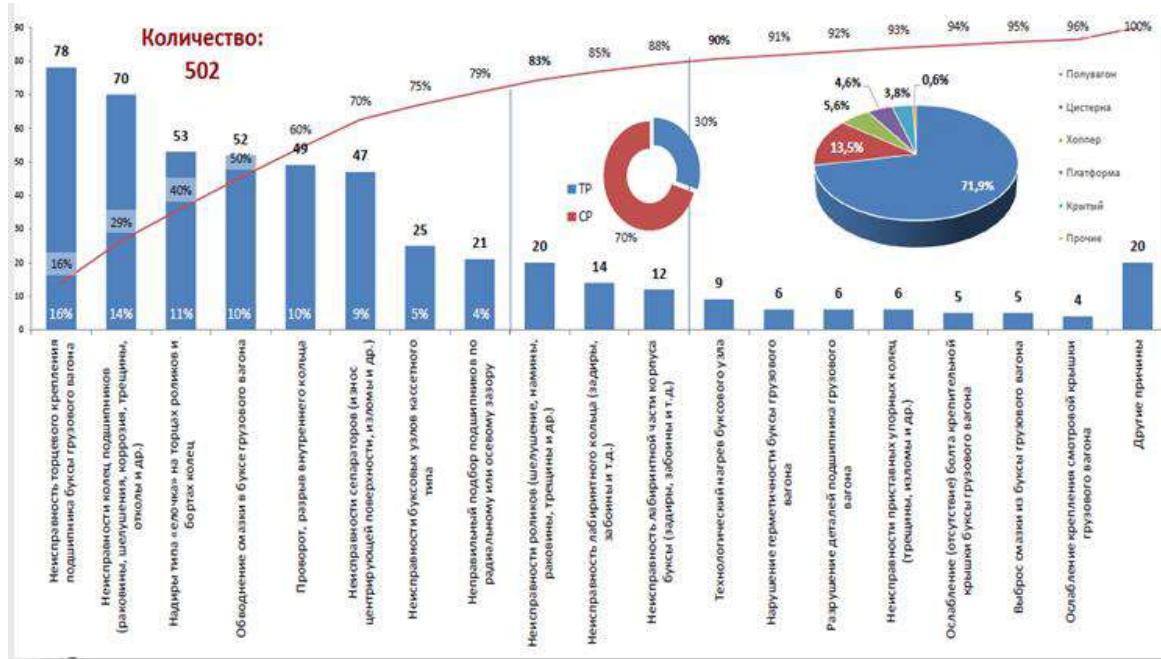


Рис. 1. Отказы буксовых узлов

Fig. 1. Failures of axle boxes



Рис. 2. Система вибродиагностики ОМСД-03

Fig. 2. Vibration diagnostics system OMSD-03

человека на весь процесс диагностики, исключает проведение измерений с приведенными разгонными роликами, измерения проводятся на заданной постоянной частоте вращения.

2. Исключена возможность записи одной колесной пары под разными номерами.

3. Сенсорный экран, который позволяет визуаль-но контролировать весь процесс диагностики и более эргономичен, так как работа с клавиатурой и мышкой сведена к минимуму.

4. Используются оптические датчики высокого разрешения, которые позволяют фокусироваться только на специальном отметчике, установленном на колесе, не реагирующие на меловые и иные надписи, часто имеющие место быть после проведенного ремонта в депо.

5. Датчики имеют промышленное исполнение и оснащены встроенными усилителями, что обеспечивает лучшее соотношение сигнала и шума и невосприимчивость системы к производственным помехам (работа кран-балки или сварки вблизи системы, случайными ударными составляющими – прокатывание колесной пары, удары кувалдой и т. д.). Также исключена возможность несанкционированного изменения параметров усиления.

6. В ПКДМ добавлена возможность измерения температуры буксовых узлов, что позволяет использовать бесконтактные пирометры, результаты которых учитываются в диагностике.

7. Техническое исполнение органов управления и шкафа исключает возможность «разграбления» в условиях депо.

С помощью системы вибродиагностики колес-

ных пар на стенде производится обкатка колесной пары и выявляются дефекты подшипников буксовых узлов. Система имеет узел осевого нагружения, что позволяет диагностировать колесные пары не только с роликовыми подшипниками, но и с подшипниками кассетного типа. Система выявляет следующие неисправности:

- дефекты сборки подшипника;
- повреждения сепаратора;
- дефекты тел качения;
- износ тел качения;
- дефекты наружного и внутреннего кольца;
- повреждения поверхностей катания (коррозия, шелушение поверхностей катания).

В системе присутствует модуль корреляционно-го анализа, который не позволяет проводить диагностику одного и того же объекта под разными номерами. Модуль предварительной обработки сигналов не допускает к анализу сигналы, записанные с нарушением технологии и недопустимые для проведения диагностики. Во всех системах исключено влияние человеческого фактора на процесс диагностики, принятие окончательного диагностического решения и изменение диагностических критериев. При проведенных исследованиях был замечен дисбаланс колесной пары, который возникает при нарушениях работы подшипников в буксовом узле.

Оценка методов системы диагностирования

Состояние буксовых узлов колесных пар, которые были изъяты с сошедших вагонов, прошли техническую диагностику на стенде ОМСД-03 для выявления дефектов и неисправностей подшипников.

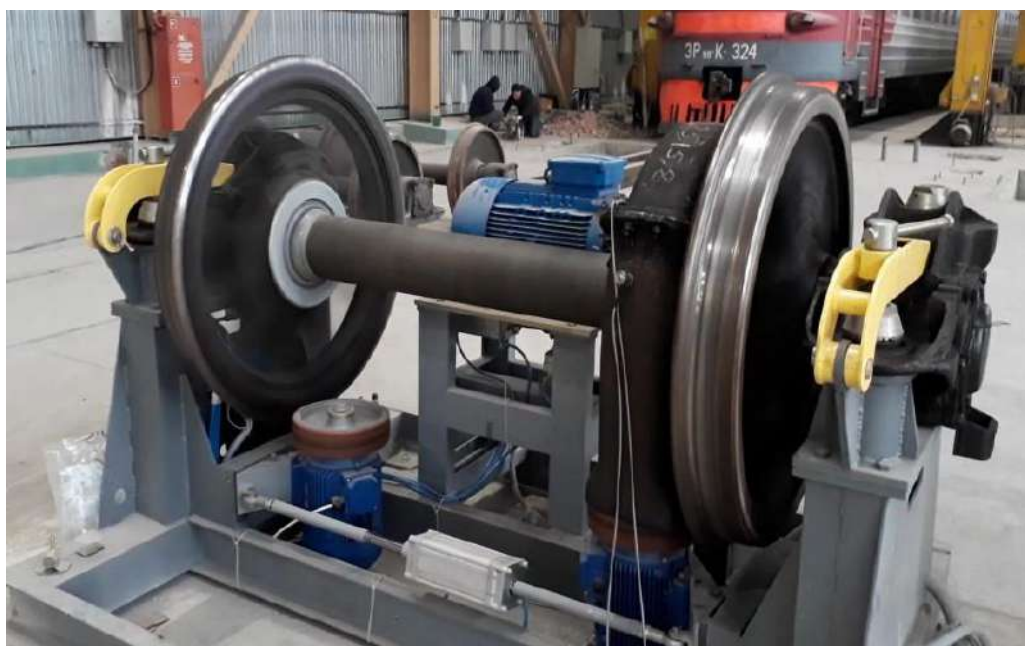


Рис. 3. Стенд вибродиагностики буксового узла

Fig. 3. Stand for the vibration diagnostics of the axle box unit

В одной из букс тележки на роликах видны пятна цвета побежалости, это говорит о том, что было подклинивание тел качения подшипника. КТСМ в одном из проходов накануне схода у этой тележки констатировал наличие неисправностей и прописал команду «Тревога 0». После снижения скорости движения на 20 км/ч замечена закономерность по снижению температуры нагрева буксовых узлов ниже «тревожных» значений. Рассмотренные выше два случая состояния технических объектов, которые подтверждают необходимость глубокого анализа всех элементов сложной системы «локомотив – вагон – путь». С точки зрения повышения надежности работ буксовых узлов наиболее продуктивным является использование снятых диаграмм с вибродиагностического стенда ОМСД-3 и их глубокий анализ. Далее представлен стенд вибродиагностики буксового узла (рис. 3).

С помощью встроенной системы, в которой присутствуют модули корреляционного анализа, можно проводить диагностику одного и того же объекта под разными номерами. Модуль предварительной обработки сигналов не допускает к анализу сигналы, записанные с нарушением технологии и недопустимые для проведения диагностики. Устойчивость порожних вагонов намного меньше, чем груженых, это обусловлено тем, что при малых нагрузках на пружины уменьшаются силы, действующие между боковыми рамами и наддресорной балкой, связанными элементами рессорного подвешивания тележки [9, 10].

Анализ обследования колёсной пары

На рис. 4 приведены диаграммы обследования колесной пары на вибродиагностическом стенде, где в диапазоне 4–5 участка выявлены отклонения. При осмотре поверхности катания роликов и внутреннего кольца обнаружены поверхностные микрострук-

турные разрушения (растрескивание). Для сравнительного анализа использовались изъятые диаграммы предыдущих измерений с этой колесной пары и сравнивались с диаграммами после схода.

Из данной диаграммы была сделана таблица по исследованиям колесной пары с нарушениями дисбаланса из-за дефектов на роликах подшипника, что, естественно, влияет на динамику движения подвижного состава, в том числе на непогашенное ускорение. Если норма $a_{нп} = 0,3$, то дисбаланс колесной пары увеличивает его еще на 0,1–0,2 м/с², что значительно влияет на динамику движения подвижного состава.

Приведены повреждения и износы деталей подшипника, которые были выявлены при диагностике буксового узла (табл.). Замеры проводились на вибродиагностическом стенде ОМСД-03 при разных частотах и диапазонах. Данные, полученные при проверке, формировались в таблицу с указанием предельных и измеренных уровней вибрации буксового узла. Жирным шрифтом выделены диапазоны, превышающие норму, а также наименования дефектов, которые привели к дисбалансу колесной пары. В нашем случае дефекты внутреннего кольца и дефекты тел качения привели к дополнительной вибрации колесной пары и явились причиной заклинивания.

В результате обследования колесной пары методом вибродиагностики букс, приходим к выводу, что дальнейшая эксплуатация узла недопустима.

Взаимодействие поверхностей колеса и рельса, а также работа элементов конструкции ходовых частей подвижного состава изменяются в зависимости от скорости движения [12–15]. Потеря устойчивости и возникновение колебаний виляния происходит, когда нарушается взаимосвязь между рельсом и колесом. Таким образом, источником взаимосвязи колеса с рельсом является состояние поверхности ка-

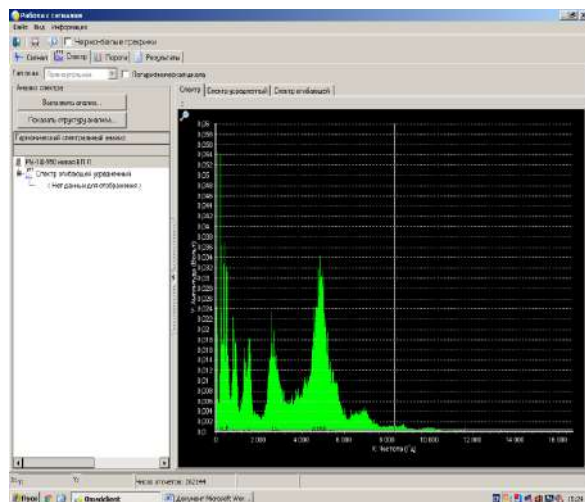
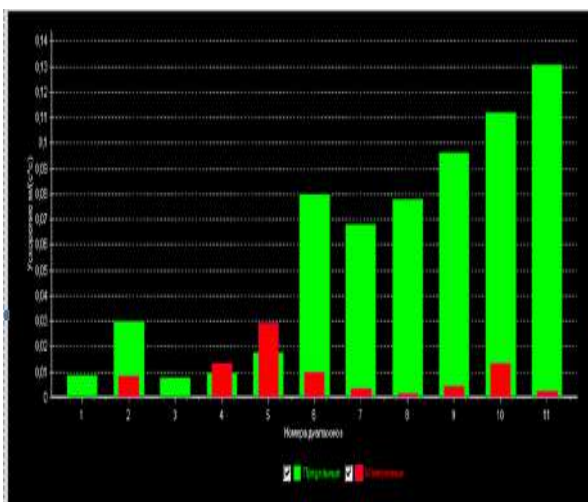


Рис. 4. Диаграммы обследования колесной пары
Fig. 4. Wheelset inspection diagrams

Повреждения и износы деталей подшипника
Damage and wear of bearing parts

Диапазон	Частоты, Гц	Предельный уровень	Фактический уровень	Наименование дефекта
1	2–3	0,009	0,000086	Повреждение сепаратора
2	3–5	0,03	0,008521	Износ внутреннего кольца
3	6–8	0,008	0,000242	Дефекты тел качения подшипника
4	8–11	0,01	0,013479	Дефекты внутреннего кольца
5	11–27	0,018	0,029075	Дефекты тел качения
6	27–33	0,08	0,00992	Дефекты наружного кольца
7	33–47	0,068	0,00351	Дефекты внутреннего кольца
8	52–67	0,078	0,001602	Дефекты наружного кольца
9	67–81	0,096	0,004405	Дефекты внутреннего кольца
10	150–900	0,112	0,013438	Дефекты на поверхностях катания
11	900–2 000	0,131	0,002696	Повреждения поверхностей катания подшипника

тания колесных пар и возможность их колебаний в рельсовой колее, что обусловлено жесткостью связей элементов тележки и сопротивлением ее повороту относительно вагонов [16–18].

Многочисленные исследования выявили значительное влияние формы профиля колеса на устойчивость движения подвижного состава. При расследовании сходов выявилась следующая зависимость, которая привела к определенной системе взаимосвязи, состоящей из трех составляющих: износ колеса, толщина гребня и скорость подвижного состава. Исследования показали, что скорость 30 км/ч – параметр сброса скорости на участке в зависимости от наличия дефектов на поверхности катания колеса.

Заключение

Проведенная оценка состояния буксовых узлов колесных пар после схода в колее позволила определить техническое состояние и выявить неисправности с использованием вибродиагностического стенда ОМСД-03. Опыт использования этой установки на ремонтных предприятиях Восточно-Сибирской железной дороги позволяет провести пошаговый анализ и выработать мероприятия, направленные на предупреждение технических событий и повышение безопасности движения.

Список литературы

1. Шахуняц Г.М. Железнодорожный путь. М. : Транспорт, 1987. 479 с.
2. Анисимов П.С. Конструирование и расчет вагонов. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2011. 688 с.
3. Лысюк В.С. Причины и механизмы схода колеса с рельса. М. : Транспорт, 2002. 215 с.
4. Пухов И.В. Между колесом и рельсом // Гудок. 2013. Вып. 207 (26346). 22 нояб. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1393921> (дата обращения 30.04.2020).
5. Лукин В.В., Анисимов П.С., Федосеев Ю.П. Вагоны. Общий курс. М. : Маршрут, 2004. 424 с.
6. Ромен Ю.С., Певзнер В.О. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения. М. : Интекст, 2013. 224 с.
7. Ромен Ю.С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее: методы расчета и испытаний. М. : ВМГ-Принт., 2014. 208 с.
8. Техническая диагностика вагонов : учебник. В 2 ч. / под ред. В.Ф. Криворудченко. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2013. 2 ч.
9. Быков Б.В. Конструкция тележек грузовых и пассажирских вагонов : учеб. пособие. М. : Маршрут, 2004. 36 с.
10. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. 3-е изд. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
11. Технология вагоностроения и ремонта вагонов: учеб. для вузов / под ред. В.С. Герасимова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1988. 381 с.
12. Иванова В.Ю. МДК 02.01 Организация работы и управление подразделением организации (вагоны): фонд оценочных средств. М. : УМЦ ЖДТ, 2020. 40 с.
13. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрищику вагонов) № 808-2017-ПКБ-ЦТ // СЦБИСТ : сайт. URL: <http://scbist.com/vagony-i-vagonnoe-hozyaistvo/51286-instrukciya-po-vagonov-v-ekspluatcii-instrukciya-osmotrichiku-vagonov-808-2017-pkb-cv.html> (дата обращения 17.04.2021).
14. Шадур Л.А. Вагоны. Конструкция, теория и расчет. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1980. 439 с.
15. Саперов А.В. Как повысить надежность буксового узла // Вагоны и вагонное хозяйство. 2009. № 3. С. 13–15.
16. Тимакова Е.А. «Буксол» больше не забуксует // Гудок. 2017. Вып. 124 (26263). 25 июл. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1381119> (дата обращения 20.04.2020).

17. Грачева Л.О., Певзнер В.О., Анисимов П.С. Показатели динамики и воздействия на путь грузовых четырехосных вагонов при различных износах тележек и отступлениях от норм содержания в прямых участках пути : сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Вып. 549. М. : Транспорт, 1976. С. 4–25.

18. Автоматический контроль геометрических параметров колесных пар во время движения поезда / А.Н. Байбаков, В.М. Гуренко, В.И. Патерикин и др. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lazernyy-diagnosticheskiy-kompleks-dlya-kontrolya-kolesnyh-par-vagonov-na-hodu-poezda> (дата обращения: 06.05.2019).

References

1. Shakhunyat G.M. Zheleznodorozhnyi put'. [Railway track]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.
2. Anisimov P.S. Konstruirovaniye i raschet vagonov [Design and calculation of railcars]. Moscow: FGOU "UMTS" Publ., 2011. 688 p.
3. Lysyuk V.S. Prichiny i mekhanizmy skhoda koleza s rel'sa [Causes and mechanisms of a wheel derailment]. Moscow: Transport Publ., 2002. 215 p.
4. Pukhov I.V. Mezhdru kolezom i rel'som [Between the wheel and the rail]. *Gudok*, Iss. 207 (26346), 22.11.2013 [Electronic media]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1393921> (Accessed: April 30, 2020).
5. Lukin V.V. Anisimov P.S. Fedoseev Yu.P. Vagony. Obshchii kurs [Railcars. The general guidelines]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 424 p.
6. Romen Yu.S. Pevzner V.O. Osnovy razrabotki normativov soderzhaniya puti i ustanovleniya skorostei dvizheniya [Bases of development of standards of the track maintenance and setting of traffic speeds]. Moscow: Intekst Publ., 2013. 224 p.
7. Romen Yu.S. Dinamika zheleznodorozhnogo ekipazha v rel'sovoi kolee: metody rascheta i ispytaniye Tekhnicheskaya diagnostika vagonov: ucheb. dlya studentov, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti 190300.65 «Podvizhnoi sostav zheleznykh dorog» VPO: v 2 ch. Pod red. V.F. Krivorudchenko [Dynamics of the railway vehicle in the rail track gauge: methods of calculation and testing. In Krivoruchko V.F. (ed.) Moscow: VMG-Print Publ., 2014. 208 p.
8. Akhmezhdanov R.A. et al. [Technical diagnostics of railcars. A textbook for students studying in the specialty 190300.65 "Railway rolling stock" HPE: in 2 parts]. Moscow: Educational and methodological center of education in railway transport Publ., 2013
9. Bykov B.V. Konstruktsiya telezhek gruzovykh i passazhirskikh vagonov: uchebnoe posobie [Design of trucks and passenger railcars: an illustrated textbook]. Marshrut Publ., 2004. 36 p.
10. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [The dynamics of the railcar]. 3rd edition, 1991. 360 p.
11. Gerasimov V.S., Skiba I.F., Kernich B.M. et al. Tekhnologiya vagonostroeniya i remonta vagonov: ucheb. dlya vuzov. Pod red. V.S. Gerasimova [The technology of the railcar building and railcar repair: A textbook for universities. In Gerasimov V.S. (ed.) 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Transport Publ., 1988. 381 p.
12. Ivanova V.Yu. MDK 02.01 Organizatsiya raboty i upravlenie podrazdeleniem organizatsii (vagonov) (razdel 3) (tema 3.3): fond otsenochnykh sredstv [MDK 02.01 Organization of work and management of the organization's division (railcars) (section 3) (topic 3.3): Fund of evaluation means]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 2020. 40 p.
13. Instruksiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu vagonov v ekspluatatsii (instruksiya osmotrshchiku vagonov) No. 808-2017-PKB-TsT. [Instructions for maintenance of railcars in operation (instructions to the railcar inspector) No. 808-2017-PKB-CT].
14. Shadur L.A. (ed.) Vagony. Konstruktsiya, teoriya i raschet [Railcars. Construction, theory and calculation]. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow: Transport Publ., 1980. 439 p.
15. Saperov A.V. Kak povysit' nadezhnost' buksovogo uzla [How to increase the reliability of the axle box assembly]. *Vagonny i vagonnoe khozyaistvo [Railcars and railcar facilities]*, 2009. No. 3. Pp. 13–15.
16. Timakova E.A. «Bukso!» bol'she ne zabuksuet. ["Bukso!" isn't going to stall any longer]. *Gudok*, Iss. 124 (26263), 25.07.2017 [Electronic media]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1381119> (Accessed: April 20, 2020).
17. Gracheva L.O., Pevzner V.O., Anisimov P.S. Pokazateli dinamiki i vozdeistviya na put' gruzovykh chetyrekhosnykh vagonov pri razlichnykh iznosakh telezhek i otstupleniyakh ot norm soderzhaniya v pryamykh uchastkakh puti [Indicators of dynamics and impact on the track of cargo four-axle railcars at various wear of bogies and deviations from the standards of maintenance in straight sections of the track]. *Sb. nauch. tr. VNIIZhT [Proceedings of Railway research institute of JSC Russian Railways]*. Iss. 549. Moscow: Transport Publ., 1976. Pp. 4–25.
18. Baibakov A.N., Gurenko V.M., Paterikin V.I., Yunoshev S.P., Plotnikov S.V., Sotnikov V.V., Chugui Yu.V. Avtomaticheskii kontrol' geometricheskikh parametrov koleznykh par vo vremya dvizheniya poezda [Automatic control of geometric parameters of wheel pairs during train movement] [Electronic media]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lazernyy-diagnosticheskiy-kompleks-dlya-kontrolya-kolesnyh-par-vagonov-na-hodu-poezda> (Accessed: May 06, 2019).

Информация об авторах

Мартыненко Любовь Викторовна – старший преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru

Кушков Михаил Геннадьевич – аспирант, кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: mikhail.kushkov@yandex.ru

Information about the authors

Lyubov' V. Martynenko – senior lecturer of the Subdepartment of Railcars and Railcar Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru

Mikhail G. Kushkov – Ph.D. student of the Subdepartment of Railcars and Railcar Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: mikhail.kushkov@yandex.ru

Энергетический критерий для оценки запаса устойчивости колеса от вкатывания гребня на головку рельса при движении колесной пары по прямому участку пути

М. С. Громаков¹, А. А. Тармаев², С. В. Беспалько¹✉

¹ Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ besp-alco@yandex.ru

Резюме

При извилистом движении создаются боковые силы нажатия колес на рельсы, что может привести к вкатыванию гребня колеса на головку рельса и к последующему сходу. Сход подвижного состава с рельсов представляет серьезную угрозу безопасности движения. Действующими нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог колеи 1520 мм предусмотрена проверка устойчивости колеса от вкатывания на головку рельса. В качестве критерия принято минимальное значение коэффициента запаса устойчивости колеса против схода с рельса. Коэффициент устойчивости определяется исходя из условия возвращения вкатившегося на головку рельса колеса в исходное положение под действием вертикальной силы, создаваемой весом вагона. В современной механике большинство методов расчета основано на энергетических принципах, что составляет так называемую «аналитическую механику», альтернативную «векторной (ньютоновской) механике». Предложен метод оценки устойчивости колеса исходя из условия недопущения вкатывания гребня колеса на головку рельса путем сравнения кинетической энергии извилистого движения колесной пары с работой вертикальной и горизонтальной сил, действующих на колесную пару. Условие устойчивости колеса определяется из принципа недопущения вкатывания гребня колеса на головку рельса. Выполнены расчеты вариантов движения вагона при различных скоростях на основе нормативной и предложенной методик. Произведено сравнение критической (допускаемой) скорости движения по названным методикам. Сравнительный анализ показал, что при оценке устойчивости по энергетическому критерию, допустимая скорость движения вагона выше, чем при силовом методе. Это может позволить увеличить расчетный скоростной допуск проектируемого вагона при дальнейшем детальном анализе и оценке всех динамических факторов вагона.

Ключевые слова

безопасность движения, безопасная скорость, вагон, колесная пара, колесо, сход с рельсов, вкатывание колеса на головку рельса, энергетический метод

Для цитирования

Громаков М. С. Энергетический критерий для оценки запаса устойчивости колеса от вкатывания гребня на головку рельса при движении колесной пары по прямому участку пути / М. С. Громаков, А. А. Тармаев, С. В. Беспалько // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 104–111. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).104-111

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.09.2020, поступила после рецензирования: 18.09.2020, принята к публикации: 11.10.2020

An energy criterion for estimating the wheel stability reserve from the rolling of the flange onto the railhead during the motion of a wheel set along a straight section

M. S. Gromakov¹, A. A. Tarmaev², S. V. Bespal'ko¹✉

¹ The Russian University of Transport, Moscow, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ besp-alco@yandex.ru

Abstract

In case of hunting, the lateral forces are created by pressing the wheels against the rails, which can lead to the wheel flange rolling onto the railhead and subsequent derailment. The derailment of the rolling stock poses a serious threat to traffic safety. The current standards for the calculation and design of railcars for 1520 mm gauge railways provide for checking the wheel stability from rolling onto the railhead. The minimum value of the safety factor of the wheel stability against derailment is taken as a criterion. The stability coefficient is determined based on the condition of the return of the wheel rolled onto the railhead to its original position under the action of the vertical force created by the weight of the railcar. In modern mechanics, most of the calculation methods are based on energy principles, which constitute the so-called "analytical mechanics" - an alternative to "vector (Newtonian) mechanics". A proposed method is to assess the stability of a wheel based on the condition of preventing the wheel

flange from rolling onto the railhead by comparing the kinetic energy of the wheel set hunting with the work of the vertical and horizontal forces acting on the wheel set. The stability condition for the wheel is determined from the principle of preventing the wheel flange from rolling onto the railhead. The calculations of the variants of the movement of the railcar at different speeds were carried out based on the normative and proposed methods. A comparison of the critical (permissible) speed of movement was made according to the above methods. Comparative analysis showed that when assessing stability by the energy criterion, the permissible speed of the railcar is higher than with the force method. It may allow increasing the estimated speed tolerance of the designed railcar with further detailed analysis and assessment of all the dynamic factors of the railcar.

Keywords

traffic safety, safe speed, railcar, wheel set, wheel, derailment, the rolling of a wheel onto the railhead, energy approach

For citation

Gromakov M. S., Tarmaev A. A., Bepal'ko S. V. Energeticheskiy kriterii dlya otsenki zapasa ustoichivosti koleasa ot vkatyvaniya grebnya na golovku rel'sa pri dvizhenii kolesnoi pary po pryamomu uchastku puti [An energy criterion for estimating the wheel stability reserve from the rolling of the flange onto the railhead during the motion of a wheel set along a straight section]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.104–111.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).104-111

Article info

Received: 15.09.2020, Revised: 18.09.2020, Accepted: 11.10.2020

Введение

Обеспечение безопасности движения поездов всегда актуально. К числу важнейших проблем, которые представляют серьезную угрозу безопасности движения поездов, относится проблема схода подвижного состава с рельсов [1–3]. Вопрос количественной оценки запаса устойчивости от схода очень сложен. Это связано с влиянием множества параметров, которые способствуют сходу с рельсов: сложное взаимодействие колеса и рельса, профили колес и рельса, условия эксплуатации подвижного состава, геометрия и состояние пути. В этой связи проблемы повышения безопасности, а также совершенствования методов оценки схода колесной пары с рельсов являются актуальными [4–19].

В соответствии с критерием Надаля [18], лежащим в основе большинства современных методик, определяется соотношение действующих на колесо сил, при котором предотвращается его сход от вкатывания на рельс. Считается, что сход происходит, когда поверхность катания колеса поднялась над головкой рельса и колесо контактирует с рельсом только в точке, расположенной на образующей конической части гребня. Критерий Надаля предполагает, что все действующие на колесо силы проходят через одну точку, при этом рассматривается отдельно взятое колесо и не принимается во внимание, что в процессе схода колесная пара катится по рельсам, а не просто выдавливается из колеи, т. е. происходит сход не отдельного колеса, а колесной пары в целом.

Используемый в нормах «коэффициент запаса устойчивости против вкатывания колеса на головку рельса», фактически является обратной величиной к коэффициенту Надаля и имеет схожие достоинства и недостатки [20]. В этой связи целесообразен поиск новых методов и критериев оценки устойчивости движения.

В современной механике большинство методов расчета основано на энергетических принципах, что составляет так называемую «аналитическую механику», альтернативную «векторной (ньютоновской) механике». Преимущества энергетических подходов проявляются при решении сложных задач и связаны с тем, что энергетические динамические характеристики (кинетическая энергия, работа) представляют собой скалярные величины, в отличие от векторных характеристик (силы или скорости).

В работе для оценки возможности схода колеса с рельса применен энергетический принцип взамен существующего нормативного подхода, основанного на сравнении значений боковой и вертикальной сил.

Математическая модель извилистого движения колесной пары

Движение колесной пары по рельсовому пути имеет извилистую траекторию, которая описывается уравнением

$$\frac{d^2x}{dz^2} + \frac{n}{s \cdot r_c} \cdot x = 0, \quad (1)$$

где x , y – линейное перемещение вдоль соответственно осей x и y ; n – конусность ободьев колес; s – полуширина рельсовой колеи; r_c – средний радиус поверхности катания колеса [1].

Для данного уравнения существует точное решение [21]:

$$x = A \cdot \sin(\omega \cdot z) + B \cdot \cos(\omega \cdot z), \quad (2)$$

где A и B – постоянные коэффициенты; $\omega = \sqrt{\frac{n}{s \cdot r_c}}$.

При начальных условиях $z = 0$, $x = x_0$, уравнение (2) примет вид:

$$x = x_0 \cdot \cos(\omega \cdot z). \quad (3)$$

Когда колесо вагона движется по рельсу, контакт «колесо – рельс» находится в состоянии сложной нагрузки от вертикальной и поперечной сил их взаимодействия.

При извилистом движении гребень колес в определенный момент времени прижимается к рельсу с некоторой боковой силой, которая при высоких скоростях движения может вызвать его подъем на головку рельса с последующим сходом. Поэтому при проектировании и расчете вагонов необходимо учитывать такой показатель, как запас устойчивости от вкатывания гребня колеса на головку рельса. Рассмотрим существующие методики его определения.

В нормах принята методика оценки устойчивости колеса от вкатывания гребня на головку рельса с использованием силового критерия [20]. В данном случае устойчивое положение колеса – это некоторое состояние равновесия сил, действующих на колесо, при нарушении которого происходит либо подъем (вкатывание) гребня колеса на головку рельса, либо его опускание (сползание) в штатное положение. Далее приведена силовая схема для оценки устойчивости колеса (рис. 1).

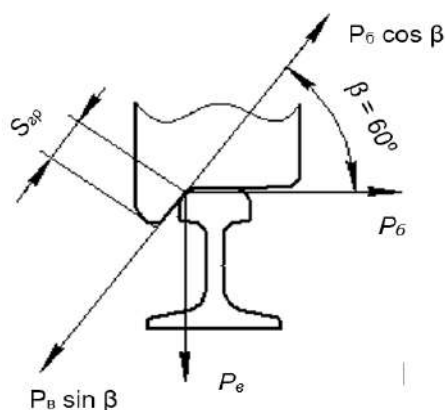


Рис. 1. Силы, действующие на колесо
Fig. 1. Forces acting on the wheel

Нормативный (силовой) критерий имеет следующий вид:

$$K_{yc} = \frac{\operatorname{tg}\beta - \mu}{1 + \operatorname{tg}\beta \cdot \mu} \cdot \frac{P_v}{P_6} > 1,4, \quad (4)$$

где β – угол между касательной к поверхности гребня колеса и горизонталью; μ – коэффициент трения на поверхностях контакта колеса и рельса; P_v – вертикальная сила взаимодействия колеса и рельса; P_6 – боковая сила взаимодействия.

Известен также метод, который применяется при оценке устойчивости верхнего строения пути от поперечного сдвига. В этом случае между собой сравниваются все силы, мешающие и сопутствующие вкатыванию гребня колеса на головку рельса. Данный критерий не подходит для применения в проектировании и расчете вагона [22].

Таким образом, в настоящее время нормативно закреплён метод с применением силового критерия. Недостатком данного метода является то, что силовой критерий предполагает наличие подъема колеса на головку рельса, а его выполнение должно обеспечить возврат колеса в рельсовую колею.

Предлагаемый критерий оценки возможности вкатывания колеса на головку рельса на основе энергетического подхода

Далее рассмотрим принципиально новый метод оценки устойчивости колеса от вкатывания на головку рельса, предлагаемый авторами, как альтернативу существующим методам. Данный метод основан на энергетическом критерии, который предполагает недопущение подъема колеса с последующим вкатыванием гребня на головку рельса.

Колесная пара движется вдоль оси пути извилисто, т. е. с некоторой боковой скоростью в горизонтальной плоскости [20]. На рис. 2 показана принятая к расчету схема движения колесной пары.

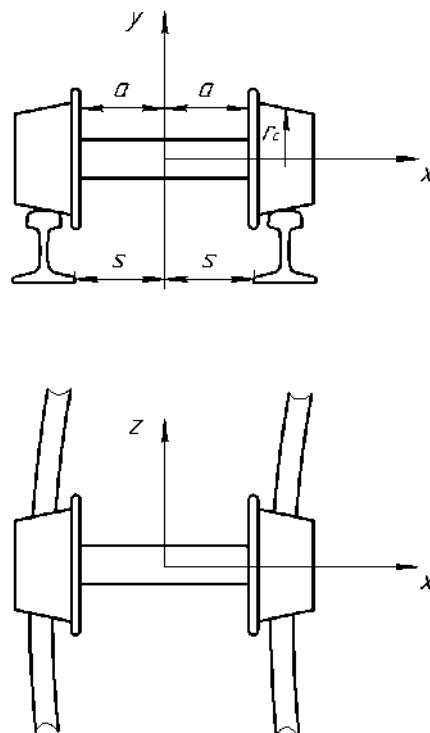


Рис. 2. Расчетная схема движения колесной пары
Fig. 2. Design scheme of wheel set movement

Продольная координата колесной пары будет определяться следующим образом:

$$z = v_z \cdot t. \quad (5)$$

Исходя из формулы (5), можно определить боковую скорость колесной пары

$$v_x(t) = \omega \cdot v_z \cdot [-x_0 \cdot \sin(\omega \cdot v_z \cdot t)]. \quad (6)$$

При боковом смещении колесной пары относительно оси пути в некоторый момент времени про-

изойдет касание гребня набегающего колеса и рельса. При этом кинетическая энергия колесной пары преобразуется в потенциальную, а ее значение можно определить по формуле (7):

$$E_k = \frac{m \cdot v_{x\max}(t)^2}{2}, \quad (7)$$

где m – осевая нагрузка вагона; $v_{x\max}$ – максимальная поперечная скорость колесной пары, которая определяется как амплитудное значение данной скорости.

Максимальная поперечная скорость колесной пары определяется как

$$v_{x\max}(t) = -\omega \cdot v_z \cdot x_0. \quad (8)$$

В данном случае x_0 принимаем равным максимальному отклонению колесной пары от оси пути для достижения максимально возможного (опасного) значения кинетической энергии. Ниже обозначены основные параметры колесной пары и рельсового пути, необходимые для определения показателя x_0 (рис. 3):

$$x_0 = s - f_{\text{вн}}, \quad (9)$$

$$f_{\text{вн}} = a + f_{2p}. \quad (10)$$

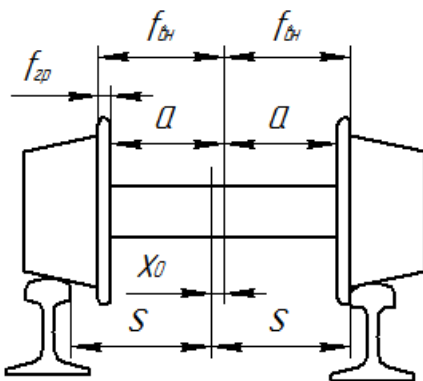


Рис. 3. Геометрические параметры колесной пары и рельсового пути
 Fig. 3. Geometric parameters of the wheel pair and rail track

Ранее были показаны силы, которые действуют на колесо во время движения, $P_{\sigma} \cdot \cos \beta$ и $P_{\sigma} \cdot \sin \beta$ – проекции соответственно боковой и вертикальной сил на линию гребня колеса (см. рис. 1).

При смещении колесной пары под воздействием силы, данная сила совершает некоторую работу, которую можно определить по формуле:

$$A = \max(0; -(P_{\sigma} \cdot \sin \beta - P_{\sigma} \cdot \cos \beta) \cdot s_{2p}), \quad (11)$$

где $s_{2p} = \frac{h_{2p}}{\sin \beta}$ – длина поверхности гребня колеса;

h_{2p} – высота гребня колеса.

В данном случае подъем колеса (вкатывание) на головку рельса произойдет при невыполнении следующего равенства, которое и является энергетическим критерием оценки устойчивости:

$$A \leq E_k. \quad (12)$$

На рис. 4 представлен алгоритм предлагаемой методики.

Произведем сравнительный анализ между двумя принципиально разными подходами к оценке устойчивости колеса. Для определения сил, действующих на колесо, воспользуемся формулами, приведенными в нормах [20].

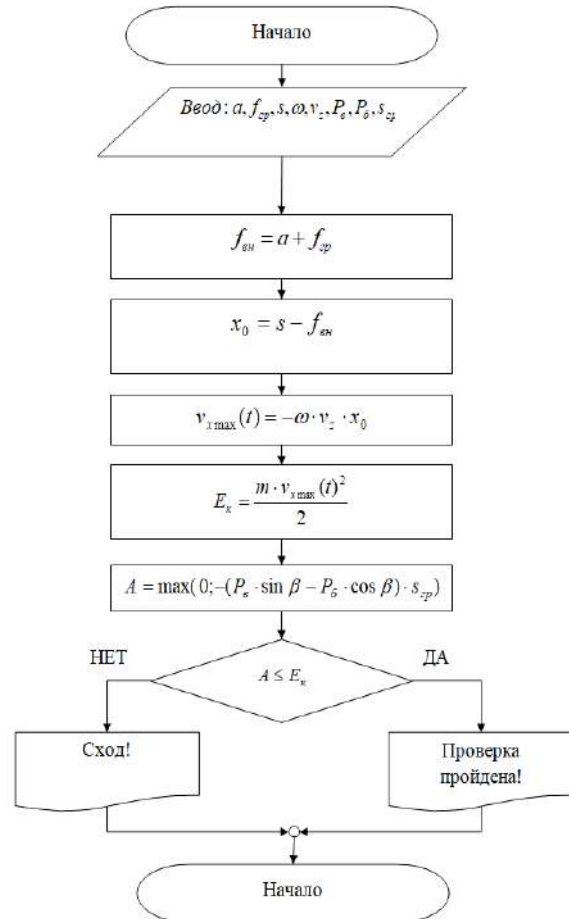


Рис. 4. Предлагаемый алгоритм оценки устойчивости от схода

Fig. 4. Proposed estimation algorithm of derailment resistance

Критерий оценки возможности вкатывания колеса на головку рельса в соответствии с действующими нормами

Определение сил, действующих на колесо, в соответствии с нормами выполняется в следующей последовательности:

1. Определяется нагрузка от обрессоренной части вагона, проходящая на шейку оси:

$$Q_{ш} = \frac{(m_{об} - P) \cdot g}{2 \cdot m}, \quad (13)$$

где $m_{об}$ – масса обрессоренной части вагона; P – грузоподъемность; g – ускорение свободного падения; m – количество осей.

2. Находится среднее вероятностное значение коэффициента вертикальной динамики:

$$K_{об} = a + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot b \cdot \frac{v-15}{f_{cm}}, \quad (14)$$

где $a = 0,05$; $b = \frac{n+2}{2 \cdot n}$ – коэффициент числа осей в тележке; $n = 2$ – количество колесных пар в одной тележке, $b = 1$; f_{cm} – статический прогиб рессорного подвешивания тележки, м.

3. Устанавливаются значения коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики:

$$K_{об} = 0,75 \cdot K_{об}; \quad (15)$$

$$K_{оз} = 0,25 \cdot K_{об}.$$

4. Определяется рамная сила:

$$H_p = q_o^n \cdot b \cdot \delta \cdot (5 + v), \quad (16)$$

где $q_o^n = \frac{T \cdot g}{m}$ – статическая осевая нагрузка, δ – коэффициент, определяющий тип ходовых частей вагона; v – скорость движения вагона, м/с.

5. Определяются вертикальные силы, действующие на набегающее и ненабегающее колеса, а также боковая сила, действующая на колесную пару:

$$P_{s1} = 2 \cdot Q_{ш} \cdot \left[\frac{b_1 - a_2}{L} \cdot (1 - K_{об}) - \frac{b_1}{L} \cdot K_{оз} \right] + H_p \cdot \frac{R_k}{L} + q_{кп} \cdot \frac{b_1 - a_2}{L}$$

$$P_{s2} = 2 \cdot Q_{ш} \cdot \left[\frac{b_1 - a_1}{L} \cdot (1 - K_{об}) - \frac{b_1}{L} \cdot K_{оз} \right] - H_p \cdot \frac{R_k}{L} + q_{кп} \cdot \frac{b_1 - a_1}{L}, \quad (13)$$

$$P_{б} = H_p + \mu \cdot P_{s2}$$

где b_1 – полуширина между шейками оси; a_1 – расстояние от точки контакта ненабегающего колеса с рельсом до середины шейки оси; a_2 – расстояние от точки контакта набегающего колеса с рельсом до середины шейки оси; L – поперечное расстояние между точками контакта колес с рельсами; R_k – радиус колеса по поверхности катания; $q_{кп}$ – вес необрессоренной части вагона, который приходится на одну колесную пару [20, 21].

Произведем расчеты для разных скоростей и проверку устойчивости по приведенным критериям [23].

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Table 1. Initial data for the calculation

Параметр	Единица измерения	Значение
b_1 – половина расстояния между серединами шеек оси	м	1,018
L – поперечное расстояние между точками контакта колес с рельсами	м	1,555
a_1 – расстояние от точки	м	0,264

контакта ненабегающего колеса с рельсом до середины шейки оси		
a_2 – расстояние от точки контакта набегающего колеса с рельсом до середины шейки оси	м	0,217
R – радиус колеса по поверхности катания	м	0,45
q_o – осевая нагрузка	т/ось	21
a – коэффициент для обрессоренных частей вагона	–	0,1
T – тара вагона	т	24
P – грузоподъемность вагона	т	60
δ – коэффициент, учитывающий тип ходовых частей вагона	–	0,003
μ – коэффициент трения на поверхностях контакта «колесо – рельс»	–	0,25
β – угол между касательной к поверхности гребня колеса и горизонталью	°	60
$m_{об}$ – масса обрессоренных частей груженого вагона	т	74,924
m – количество осей в вагоне	–	4
f_{cm} – статический прогиб рессорного подвешивания порожнего вагона	м	0,015
$2s$ – ширина рельсовой колеи	м	1,52
$2a$ – расстояние между колесами	м	1,44
f_{cp} – толщина гребня колеса	м	0,033

Результаты расчетов приведены в виде графиков (рис. 5, 6).

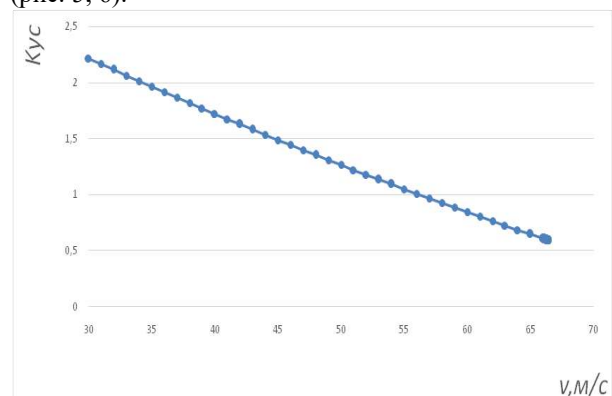


Рис. 5. Зависимость коэффициента устойчивости по силовому критерию от скорости движения вагона
Fig. 5. Dependence of the stability coefficient according to the force criterion on the railcar speed

Таблица 2. Результаты сравнительного анализа
Table 2. Results of comparative analysis

Показатель	Силовой критерий	Энергетический критерий
Формула	$K_{yc} = \frac{\operatorname{tg}\beta - \mu}{1 + \operatorname{tg}\beta \cdot \mu} \cdot \frac{P_g}{P_g} > 1,4$	$\max(0; -(P_g \cdot \sin \beta - P_g \cos \beta) \cdot s_{sp}) \leq E_k = \frac{P_{oc} \cdot v_{x\max}(t)^2}{2}$ $A \ll E_k$
Физический смысл критерия	При значении коэффициента устойчивости больше 1,4 вкатившееся на головку рельса колесо опустится в исходное положение	При работе сил, способствующих вкатыванию, большей, чем энергия поперечного движения колесной пары, произойдет вкатывание колеса на головку рельса
Расчетная скорость схода колесной пары с рельсов, м/с	47,0	66,3

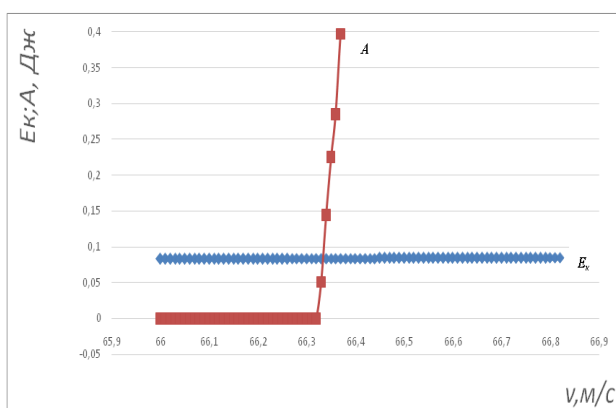


Рис. 6. Оценка устойчивости по энергетическому критерию
Fig. 6. Assessment of stability by an energy criterion

Результаты сравнительного анализа расчета

В сравнительном анализе вертикальные и боковые силы определялись по методике [20].

По результатам проведенного расчета вкатывание гребня колеса на головку рельса произойдет:

- по силовому критерию – при скорости 47 м/с (см. рис. 5);
- по предлагаемому энергетическому критерию – при скорости 66,34 м/с (см. рис. 6).

Результаты сопоставления двух критериев, по которым авторы проводили оценку устойчивости колесной пары от вкатывания на головку рельса, приведены в табл. 2.

Заключение

По результатам произведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Условие устойчивости колеса определяется из принципа недопущения вкатывания гребня колеса на головку рельса, что дает данному методу принципиальное преимущество.
2. В расчет берется динамика движения колесной пары, что делает данную методику применимой в том числе и к оценке устойчивости колесной пары при движении, как по прямому участку пути, так и по участкам пути с неровностями (кривым). В данном случае неровность задается дополнительным членом уравнения движения колесной пары.
3. Сравнительный анализ данных методов показал, что при оценке устойчивости по энергетическому критерию, допустимая скорость движения вагона выше, чем при силовом методе. Это может позволить увеличить расчетный скоростной допуск проектируемого вагона при дальнейшем детальном анализе и оценке всех динамических факторов вагона.

Список литературы

1. Клименко И.В. Развитие теоретических основ и методов оценки и повышения безопасности движения подвижного состава железных дорог : дис. ... д-ра техн. наук. Днепропетровск, 2015. 284 с.
2. Evans A.W. Fatal train accidents on Europe's railways: 1980–2009. Accident Analysis and Prevention // National Library of Medicine. 2011. 43. P. 391–401. DOI: 10.1016/j.aap.2010.09.009.
3. Kumar K.A. Indian Railways: Recent Trends in Control Accidents and Safety Measures for Passengers // East Asian Journal of Business Economics. 2014. Vol. 2, № 4. P. 48–55.
4. Арутюнян А.Р., Арутюнян Р.А. Критерий усталости, основанный на результатах исследований по скрытой энергии деформации // Вестн. Санкт-Петербур. ун-та. Сер.: Математика. Механика. Астрономия. 2010. № 3. С. 80–88.
5. Боронахин А.М., Гупалов В.И., Филипеня Н.С. Инерциальные методы и средства диагностики рельсового пути // Гирскопия и навигация. 2006. № 4. С. 102.
6. Влахова А.В. Моделирование движения железнодорожного экипажа при вкатывании гребня колеса на рельс с использованием подхода Дирака // Вестн. Моск. ун-та. Сер.: Математика. Механика. 2014. № 3. С. 68–72.

7. Ахмадеева А.А., Гозбенко В.Е. Рациональное задание числа степеней свободы динамической модели грузового вагона // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4 (12). С. 25–28.
8. Курбацкий Е.Н., Нгуен Ч.Т. Определение критических скоростей и критических сил при движении постоянной силы по балкам на упругом основании // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. 2014. № 5. С. 109–117.
9. Мугинштейн Л.А., Ромен Ю.С. Влияние продольных сил на опасность сходов порожних вагонов в поездах // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 3. С. 3–6.
10. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist / M. Bagheri, F. Saccomanno, Sh. Chenouri et al. // Accident Analysis & Prevention. 2011. Vol. 43, is. 3. P. 613–620. DOI 10.1016/j.aap.2010.09.008.
11. Eom B., Lee H.S. Assessment of running safety of railway vehicles using multibody dynamics // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing volume. 2010. 11, 315–320. DOI: 10.1007/s12541-010-0036-x.
12. Gilchrist A.O., Brickle B.V. A re-examination of the proneness to derailment of a railway wheelset // Journal of Mechanical Engineering Science. 1976. Vol. 18, № 3. P. 131–141.
13. Nam Y., Lee D., Kwon S. et al. Continuous measurement of interaction forces between wheel and rail // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing volume. 2009. Vol. 10. P. 35–39. DOI: 10.1007/s12541-009-0006-3.
14. Theoretical cross-wind speed against rail vehicle derailment considering the cross-running wind of trains and the dynamic wheel-rail effects / M.S. Kim, G.Y. Kim, H.T. Kim et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. T. 30, is. 8. P. 3487–3498.
15. Koo J. A new derailment coefficient considering dynamic and geometrical effects of a single wheelset // Journal of Mechanical Science and Technology. 2014. T. 28, is. 9. P. 3483–3498.
16. Determining the causes of rolling stock derailment from the track using modern research methods / A. Kuzyshin, A. Batig, J. Sobolevska et al. // MATEC Web of Conferences. 2009. 294, 03004. DOI 10.1051/mateconf/201929403004.
17. Liu X., Saat M.R., Barkan Ch. Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis // Accident Analysis & Prevention. 2017. Vol. 98. P. 1–9. DOI 10.1016/j.aap.2016.09.012.
18. Nadal M. J. Locomotive à Vapeur. Paris : Collection encyclopédie scientifique ; bibliothèque de mécanique appliquée et génie, 1908. Vol. 186.
19. Weinstock H. Wheel Climb Derailment Criteria for Evaluation of Rail Vehicle Safety // ASME Winter Annual Meeting. 1984. paper no. 84-WA/RT-1. P. 1–7.
20. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 317 с.
21. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В. Д. Динамика вагона. М. : АСПОЛ, 1991. 360 с.
22. Смолянинов А.В., Якупов А.Р. Сравнительный анализ методик расчета устойчивости колесной пары от схода с рельсов // Транспорт Урала. 2017. № 1. С. 48–54. DOI 10.20291/1815-9400-2016-2-48-54.
23. Котуранов В.Н., Козлов М.П. Технологическая последовательность экспертных оценок рабочих качеств универсального грузового вагона (на примере цистерны 15-1443) : учеб. пособие. М. : МИИТ, 2013. 147 с.

References

1. Klimenko I.V. Razvitie teoreticheskikh osnov i metodov otsenki i povysheniya bezopasnosti dvizheniya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Development of theoretical foundations and methods of assessing and improving traffic safety of railways rolling stock]. D. Sc. (Engineering) diss. Dnepropetrovsk, Dnipro National University of Railway Transport Publ., 2015, 284 p.
2. Evans A.W. Fatal train accidents on Europe's railways: 1980–2009. *Accident Analysis and Prevention*, 2011, 43, pp. 391–401. DOI 10.1016/j.aap.2010.09.009.
3. Kumar K.A. Indian Railways: Recent Trends in Control Accidents and Safety Measures for Passengers. *East Asian Journal of Business Economics*, 2014. Vol. 2. No. 4, pp. 48–55.
4. Arutyunyan A.R., Arutyunyan R.A. Kriterii ustalosti, osnovannyi na rezul'tatakh issledovaniy po skrytoi energii deformatsii [Fatigue fracture criterion based on the latent energy investigations]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika. Astronomiya* [Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy], 2010, No. 3, pp. 80–88.
5. Boronakhin A.M., Gupalov V.I., Filipenia N.S. Inertsial'nye metody i sredstva diagnostiki rel'sovogo puti [Inertial methods and means for rail track diagnostics]. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 206. No. 4, pp. 102.
6. Vlakhova A.V. Modelirovanie kacheniya kolesnogo apparata s ispol'zovaniem podkhoda Diraka [Simulation of rolling of wheeled vehicle using the Dirac approach]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika* [Moscow University Mechanics Bulletin. Series 1. Mathematics. Mechanics], 2013. No. 2, pp. 68–72.
7. Akhmadeeva A. A., Gozbenko V. E. Ratsional'noe zadanie chisla stepenei svobody dinamicheskoi modeli gruzovogo vagona [Rational assignment of the number of degrees of freedom of a dynamic model of a freight railcar]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2011. No. 4 (12), pp. 25–28.
8. Kurbatskii E.N., Nguyen Ch.T. Opredelenie kriticheskikh skorostei i kriticheskikh sil pri dvizhenii postoyanoi sily po balkam na uprugom osnovanii [Determination of critical speeds and critical forces in constant force movement along the beams on the elastic foundation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction]. 2014. No. 5, pp. 109–117.
9. Muginshtein L.A., Roman Yu.S. Vliyanie prodol'nykh sil na opasnost' skhodov porozhnykh vagonov v poezdakh [Influence of longitudinal forces on risk of empty cars derailment in trains]. *Vestnik VNIIZhT* [Proceedings of the Railway Research Institute], 2011. No. 3, pp. 3–6. (In Russ.)

10. Bagheri M., Saccomanno F., Chenouri Sh., Fu L. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 43, Iss. 3, May 2011, pp. 613–620. DOI 10.1016/j.aap.2010.09.008.
11. Eom B., Lee H.S. Assessment of running safety of railway vehicles using multibody dynamics. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 11, 315–320 (2010). DOI 10.1007/s12541-010-0036-x.
12. Gilchrist A.O. and Brickle B.V. A re-examination of the proneness to derailment of a railway wheelset. *J. Mech. Eng. Sci.*, 1976. Vol. 18. No. 3, pp. 131–141.
13. Ham Y., Lee D., Kwon S. et al. Continuous measurement of interaction forces between wheel and rail. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2009. Vol. 10, pp. 35–39. DOI 10.1007/s12541-009-0006-3.
14. Kim M.S., Kim G.Y., Kim H.T., Koo J. Theoretical cross-wind speed against rail vehicle derailment considering the cross-running wind of trains and the dynamic wheel-rail effects. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, t. 30, is. 8, pp. 3487–3498.
15. Koo J. A new derailment coefficient considering dynamic and geometrical effects of a single wheelset. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, Iss. 9, pp. 3483–3498, 2014.
16. Kuzyshin A., Batig A., Sobolevska J., Kostritsa S., Ursulyak L and Dovhaniuk S. Determining the causes of rolling stock derailment from the track using modern research methods. *MATEC Web of Conferences*, 209, 294, 03004. DOI 10.1051/mateconf/201929403004.
17. Liu X., Saat M.R., Barkan Ch. Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 98, January 2017, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.aap.2016.09.012.
18. Nadal M.J. *Locomotive à Vapeur*. Paris, Collection encyclopédie scientifique, bibliothèque de mécanique appliquée et génie, 1908. Vol. 186.
19. Weinstock H. Wheel Climb Derailment Criteria for Evaluation of Rail Vehicle Safety. *ASME Winter Annual Meeting*, 1984, paper no. 84-WA/RT-1, pp. 1–7.
20. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnykh) [Standards for the calculation and design of railcars of the Ministry of Railways of 1520 mm gauge (non-self-propelled)]. Moscow: State Research Institute of vehicle Building - Railway Research Institute of Russian Railways, 1996.
21. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. *Dinamika vagona* [Railcar dynamics]. Moscow: ASPOL Publ., 1991, 360 p.
22. Smol'yaninov A.V. and Jakupov A.R. Sravnitel'nyi analiz metodik rascheta ustoichivosti kolesnoi pary ot shoda s rel'sov [Comparative analysis of the methodology for calculating the stability of wheel sets]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2016, Iss. 49, pp. 48–54. DOI 10.20291/1815-9400-2016-2-48-54.
23. Koturanov V.N. and Kozlov M.P. *Tekhnologicheskaya posledovatel'nost' ekspertnykh otsenok rabochikh kachestv universal'nogo gruzovogo vagona (na primere tsisterny 15-1443)* [The technological sequence of expert evaluations of the working qualities of a universal freight railcar (for example, tank 15-1443)]. Moscow: MIIT Publ., 2013, 147 p.

Информация об авторах

Громаков Максим Сергеевич – аспирант кафедры нетягового подвижного состава, Российский университет транспорта, г. Москва, e-mail: maksimgromakov3011@gmail.com
Тармаев Анатолий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: t38_69@mail.ru
Беспалько Сергей Валерьевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры нетягового подвижного состава, Российский университет транспорта, г. Москва, e-mail: bespalco@yandex.ru

Information about the authors

Maksim S. Gromakov – Ph.D. student, Non-traction Rolling Stock Subdepartment, the Russian University of Transport, Moscow, e-mail: maksimgromakov3011@gmail.com
Anatolii A. Tarmaev – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Railway Cars and Rolling Stock Subdepartment, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: t38_69@mail.ru
Sergei V. Bespal'ko – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Non-traction Rolling Stock Subdepartment, the Russian University of Transport, Moscow, e-mail: bespalco@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).111-121

УДК 621.311

Эффективность системы электрической тяги поездов на постоянном токе высокого напряжения

Н. Л. Рябченко, Т. Л. Алексеева, Л. А. Астраханцев, В. А. Тихомиров, А. Л. Мартусов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ aleksey.martusov@yandex.ru

Резюме

Повышение эффективности энергетического обеспечения электрической тяги поездов позволяет реализовать перспективные приоритетные направления развития холдинга ОАО «РЖД». Для выявления причин, сдерживающих увеличение провозной и пропускной способности железной дороги, в статье использованы новые энергетические характеристики элементов электроэнергетической системы, которые основаны на уточненном законе сохранения энергии в

электромагнитном поле с применением математического моделирования и FFT-спектрального анализа. Расчетами доказано, что эффективное напряжение в сети переменного несинусоидального тока снижается из-за падения напряжения на реактивных сопротивлениях в силовой электрической цепи и является основной причиной, которая снижает энергетическую эффективность электрической тяги, ограничивает массу поездов и скорость их вождения. С применением электрической тяги на постоянном токе высокого напряжения обеспечивается симметричная нагрузка трехфазной системы тягового электроснабжения, устраняются реактивные сопротивления в тяговой силовой электрической цепи и повышаются динамические и энергетические показатели системы. Предложенными техническими решениями и математическим моделированием в среде Simulink программы «Matlab» показана возможность повышения коэффициента полезного действия электрической тяги на постоянном токе напряжением 37,1 кВ с асинхронными трехфазными тяговыми двигателями на 15,6 % по сравнению с электрической тягой на переменном токе напряжением 27,5 кВ, скорости движения поездов – на 31,5 %. Уровень напряжения в середине межподстанционной зоны позволяет работать грузовым трехсекционными электровозам в номинальном режиме для тяги трех соединенных поездов, а скорость движения поездов может ограничиваться только допустимым током в проводах контактной подвески. В процессе выполнения исследований по частотному управлению режимом пуска и регулирования скорости асинхронных трехфазных тяговых электродвигателей разработаны способы управления входным электрическим сопротивлением электропривода, коэффициентом модуляции и глубиной модуляции трехфазного напряжения для ограничения ускорения, обеспечения надежного сцепления колес с рельсами и исключения автоколебаний в электромеханической системе тяги поезда.

Ключевые слова

эффективность энергетического обеспечения, активная мощность, сопротивление, спектральный анализ, гармонические составляющие, эффективное напряжение, электрическая тяга

Для цитирования

Рябченко Н. Л. Эффективность системы электрической тяги поездов на постоянном токе высокого напряжения / Н.Л. Рябченко, Т. Л. Алексеева, Л. А. Астраханцев, В. А. Тихомиров, А. Л. Мартусов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 111–121. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).111-121

Информация о статье

поступила в редакцию: 25.01.2021, поступила после рецензирования: 05.02.2021, принята к публикации: 11.02.2021

The effectiveness of the high-voltage direct current system of electric traction of trains

N. L. Ryabchyonok, T. L. Alekseeva, L. A. Astrakhantsev, V. A. Tikhomirov, A. L. Martusov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ aleksey.martusov@yandex.ru

Abstract

Improving the efficiency of energy supply of electric traction trains allows us to implement promising priority areas of development of the holding company “Russian Railways” OAO. The article uses the new energy characteristics of the elements of the electric power system to identify the reasons that hinder the increase in the carrying capacity and throughput capacity of the railway. These characteristics are based on the refined law of conservation of energy in the electromagnetic field using mathematical modeling and FFT spectral analysis. Calculations have proved that the effective voltage in the AC network of non-sinusoidal current decreases due to a drop in the voltage at the reactances in the power electric circuit. This is the main reason that reduces the energy efficiency of electric traction, limits the mass of trains and the speed of driving trains. The use of high-voltage DC electric traction ensures a symmetrical load of the three-phase traction power supply system, eliminates reactive resistances in the traction power electric circuit and increases the dynamic, energy performance of the system. The proposed technical solutions and mathematical modeling in the Simulink environment of “Matlab” showed the possibility of increasing the efficiency of electric traction DC voltage of 37,1 kV three-phase asynchronous traction motors by 15,6 % compared to electric traction AC voltage of 27,5 kV, the speed of trains – by 31,5 %. The voltage level in the middle of the inter-substation zone allows freight three-section electric locomotives to operate in the nominal mode for traction of three connected trains. In this case, the speed of trains can be limited only by the permissible current in the wires of the contact suspension. Studies were conducted on the frequency control of the start-up mode and speed control of asynchronous three-phase traction motors. In the course of research performed, methods of controlling the input electrical resistance of the electric drive, the modulation coefficient and the modulation depth of the three-phase voltage were developed. The developed methods ensure the limitation of acceleration, reliable coupling of the wheels with the rails and the exclusion of self-oscillations in the electromechanical traction system of the train.

Keywords

energy supply efficiency, active power, resistance, spectral analysis, harmonic components, effective voltage, electric traction

For citation

Ryabchyonok N. L., Alekseeva T. L., Astrakhantsev L. A., Tikhomirov V. A., Martusov A. L. Effektivnost sistem elektricheskoi energii v elektricheskii seti peremennogo toka [The effectiveness of the high-voltage direct current system of electric traction of

trains]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.111–121.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).111-121

Article Info

Received: 25.01.2021, Revised: 05.02.2021, Accepted: 11.02.2021

Введение

В транспортном комплексе, обеспечивающем экономическую и национальную безопасность России, важнейшую роль выполняет железнодорожный транспорт. Прогнозом научно-технологического развития страны определены наиболее перспективные приоритетные решения в области транспортных и космических систем, энергоэффективности и энергосбережения, рационального природопользования, новых материалов и нанотехнологий [1]. Холдингом ОАО «РЖД» утверждены стратегические инициативы, которые позволяют реализовать инновационные разработки, внедрение технических и высокотехнологических решений для значительного повышения производительности, эффективности использования ресурсов отрасли и электрической тяги поездов. Одной из стратегических инициатив отрасли является обновление и унификация оборудования системы энергетического обеспечения электрической тяги (СОД) и электроподвижного состава (ЭПС) локомотивного комплекса. За счет инновационных разработок поставлена задача по снижению потребления электроэнергии и непроизводительных потерь энергии во всех режимах работы не менее чем на 10 %. С внедрением, в соответствии с техническими и технологическими решениями, в отрасли необходимо обеспечить снижение экологической нагрузки на окружающую среду на 15 %. Решение задачи по повышению коэффициента полезного действия (КПД) в среднем на 3 % во всем диапазоне мощности локомотивов намечено реализовать за счет комплексной модернизации оборудования электрической тяги поездов. На перспективу рассматривается создание скоростных грузовых электровозов (до 140–160 км/ч) для обслуживания в том числе контейнерных поездов массой до 2 600 т. Предусмотрено создание модификаций существующих локомотивов, включая локомотивы с асинхронным приводом на отечественной элементной базе.

В соответствии с объявленным курсом в стране по импортозамещению следует учитывать прогноз по минимизации рисков, связанных с перестройкой и переориентацией на поставки отечественных комплектующих для нового оборудования отрасли. Достижение высоких технико-экономических показателей возможно за счет применения современного высокоэффективного основного и вспомогательного оборудования отечественного производства, что также обеспечивает реализацию федеральной программы по импортозамещению.

Реализация перспективной программы дальнейшего комплексного развития электрической тяги

поездов возможна при повышении компетенции специалистов отрасли и совершенствовании образовательного процесса в учебных учреждениях [2].

В настоящее время тяговые подстанции железных дорог имеют в основном внешнее электроснабжение трехфазным переменным током напряжением 220, 110 кВ. Тяговое электроснабжение на постоянном токе напряжением 3,3 кВ обеспечивается с помощью трехфазных двенадцатипульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) последовательного типа [3, 4]. На ЭПС постоянного тока применяются тяговые коллекторные электродвигатели (ТЭД) и асинхронные трехфазные тяговые двигатели (АТД). Для преобразования постоянного тока в частотно-регулируемое переменное трехфазное напряжение применяются трехфазные автономные инверторы напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [5].

Тяговое электроснабжение на переменном токе напряжением 27,5 кВ в основном выполняется с применением на тяговых подстанциях (ТП) трехфазных трехобмоточных трансформаторов и распределением фаз тяговых вторичных обмоток по фидерным зонам тяговой сети. Внедряется СОД на переменном токе напряжением 2×25 кВ с применением на подстанциях трех силовых однофазных тяговых трансформаторов с установкой на линии автотрансформаторных пунктов и контактной подвески с питающими и усиливающими проводами [6]. На ЭПС переменного тока для преобразования напряжения и регулирования мощности коллекторных ТЭД применяются однофазные трансформаторы с секционированной вторичной тяговой обмоткой и четырехзонный ВИП с импульсно-фазовым управлением [7]. Разработан двухсистемный ЭПС с АТД. Для регулирования мощности АТД применяются входной четырехквadrантный 4-qS преобразователь и трехфазный АИН с ШИМ [8, 9].

С помощью оборудования, которое разрабатывается и изготавливается в настоящее время сложно выполнить задачи по дальнейшему развитию электрической тяги поездов. Выявить причину, из-за которой не удастся успешно решить задачу одновременного повышения скорости вождения и массы поездов позволяет оценка энергетического обеспечения электрической тяги на железной дороге.

Теоретическое обоснование

Известным балансом мощностей (1) на входе полупроводниковых преобразователей [10–12] специалисты ориентированы на разработку технических

решений для устранения мощности искажения и компенсации мощности сдвига:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T^2}, \quad (1)$$

где S – полная мощность на входе полупроводникового преобразователя; P_1 – активная мощность основной гармоники напряжения и первой гармоники тока на входе полупроводникового преобразователя; Q_1 – мощность сдвига (реактивная) основной гармоники напряжения и первой гармоники тока на входе полупроводникового преобразователя; T – мощность искажения (реактивная) основной гармоники напряжения и высших гармоник тока (кроме первой гармоники тока) на входе полупроводникового преобразователя.

К сожалению, в настоящее время подготовка будущих профессионалов в области разработки, изготовления и эксплуатации оборудования для электрической тяги ориентирована на устранение последствий неудовлетворительной работы оборудования (1). Технический и технологический прогресс возможен, если специалисты компетентны видеть и устранять причины, которые сдерживают дальнейшее совершенствование технических решений.

Теоремой Умова – Пойнтинга учтено сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии из-за процесса энергообмена между источником энергии и реактивными элементами электрической цепи [13, 14]. Аналитически доказано что, вовремя энергообмена часть напряжения генератора электрической энергии не используется для необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии.

Новые энергетические характеристики оборудования электроэнергетической системы железной дороги (2) основаны на уточненном законе сохранения энергии в электромагнитном поле с использованием второго закона Кирхгофа, и теории спектрального анализа:

$$\sqrt{S^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2)$$

где P – активная мощность учитываемых составляющих ряда Фурье напряжения и одноименных составляющих ряда Фурье тока на входе полупроводникового преобразователя; Q – реактивная мощность учитываемых составляющих ряда Фурье напряжения и одноименных составляющих ряда Фурье тока на входе полупроводникового преобразователя; ΔS – часть полной мощности на входе полупроводникового преобразователя с нагрузкой, учитывающая сокращение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии силовыми полупроводниковыми приборами (СПП) преобразователя [15–17].

С помощью предложенных энергетических характеристик выявлена причина снижения эффективности и электромагнитной совместимости элементов электроэнергетической системы железной дороги. Из-за коммутационных процессов в полупровод-

никовых преобразователях и непроводящего состояния СПП сокращается продолжительность использования напряжения системы тягового электрооборудования для тяги поездов. Во время непроводящего состояния и коммутации тока в СПП полупроводникового преобразователя ЭПС напряжение на его токоприемнике не используется для тяги поезда, а из контактной сети ЭПС потребляет завышенный ток [18].

Полная мощность на входе преобразователя ЭПС с нагрузкой (3) рассчитывается по формуле:

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U \cdot I, \quad (3)$$

где U_k – действующее напряжение k -ой составляющей ряда Фурье на входе преобразователя ЭПС; I_k – действующий ток k -ой составляющей ряда Фурье на входе преобразователя ЭПС; U – действующее напряжение на входе преобразователя ЭПС; I – действующий ток на входе преобразователя ЭПС; k – номер составляющей ряда Фурье; n – номер последней из учитываемых гармоник.

Активную мощность (4) на входе преобразователя ЭПС предложено рассчитывать по формуле:

$$P = U_{C0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \cos\varphi_k, \quad (4)$$

где U_{C0} – постоянная составляющая напряжения на входе преобразователя ЭПС во время проводящего состояния СПП; I_0 – постоянная составляющая тока на входе преобразователя ЭПС; U_{Ck} – действующее напряжение k -ой гармоники на входе преобразователя ЭПС во время проводящего состояния СПП; φ_k – угол сдвига по фазе тока k -ой гармоники относительно одноименной гармоники напряжения.

Так как реактивная мощность Q характеризует интенсивность энергообмена между реактивными элементами электрической цепи и источником энергии [13], то данная составляющая полной мощности формируется одноименными гармониками напряжения и тока на входе преобразователя с нагрузкой (5):

$$Q = \sum_{k=1}^n U_{Ck} \cdot I_k \cdot \sin\varphi_k. \quad (5)$$

Частью полной мощности на входе полупроводникового преобразователя с нагрузкой ΔS (6) учитывается сокращение продолжительности использования напряжения на токоприемнике ЭПС для работы тягового электропривода:

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{pk}^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2} = U_p \cdot I, \quad (6)$$

где U_{pk} – действующее напряжение k -ой гармоники на входе преобразователя с нагрузкой во время непроводящего состояния или коммутации тока СПП; U_p – действующее напряжение на входе преобразователя с нагрузкой во время непроводящего состояния или коммутации тока СПП преобразователя ЭПС.

Метод и результаты исследования

Основными элементами принципиальной силовой схемы электрической тяги на переменном токе (рис. 1)

являются тяговая подстанция, контактная сеть $R_{кк}, L_{кк}$, в секциях ЭПС тяговые трансформаторы TV, два ВИ-Па, четыре сглаживающих реактора R_s, L_s и четыре ТЭД M_1-M_4 . Математическое моделирование работы системы выполнено с помощью программы «Matlab» в среде Simulink, энергетических характеристик (1–6) и спектрального FFT-анализа (рис. 2).

С помощью осциллографа и блока «powergui» (рис. 2) получены осциллограммы напряжения и тока на шинах ТП, в первичной и вторичной обмотке TV (рис. 3), гармонические составляющие напряжения U_k , тока I_k и угол сдвига по фазе тока φ_k относительно одноименной гармоники напряжения (табл. 1).

Суммарная активная мощность учитываемых

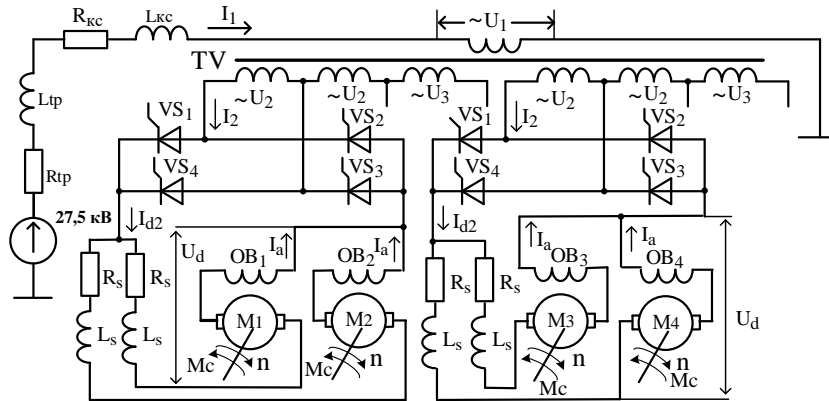


Рис. 1. Принципиальная схема электрической тяги на переменном токе
 Fig. 1. Schematic of alternating current electric traction

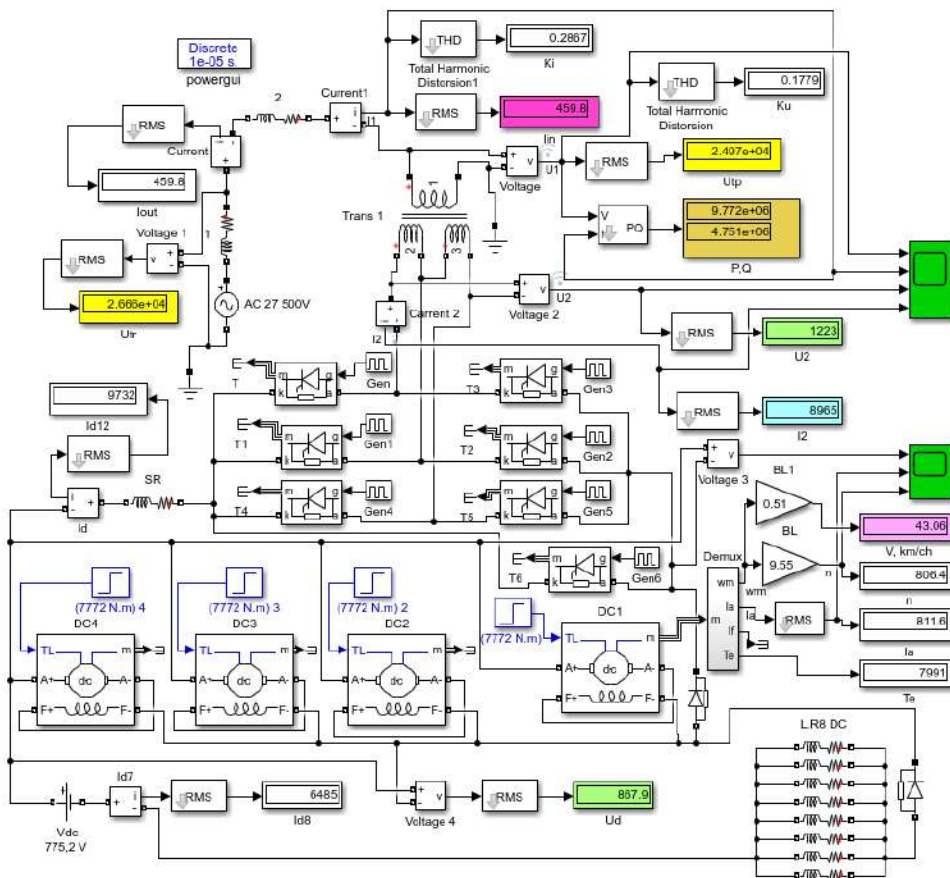


Рис. 2. Математическая модель электрической тяги поезда на переменном токе в середине межподстанционной зоны
 Fig. 2. Mathematical model of alternating current electric traction of a train in the middle of the inter-substation zone

Таблица 1. Гармонические составляющие напряжения U_k (а), тока I_k (б) и угол сдвига по фазе тока φ_k (в) относительно одноименной гармоники напряжения

Table 1. Harmonic components of voltage U_k (a), current I_k (b) and phase angle of current φ_k (c) relative to the voltage harmonic of the same name

а											
k	Единица измерения	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
U_{1k}	В	26 590	1 390,6	928,0	497,2	329,7	340,3	289,8	210,1	196,8	196,8
I_{1k}	А	442,0	115,7	46,4	17,8	9,15	7,75	5,6	3,5	2,9	2,61
φ_{1k}	град.	29,2	439,6	300,3	130,2	269,7	422,5	246,6	47,4	269,5	364,1
б											
k	Единица измерения	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
U_{1k}	В	24 580	3 148,7	2 099,1	1 123,3	744,8	771,8	651,4	471,9	444,9	447,4
I_{1k}	А	442,0	115,7	46,4	17,8	9,15	7,75	5,6	3,5	2,9	2,61
φ_{1k}	град.	25,9	434,3	297,1	128,0	268	421	245,4	46,3	268,5	363,3
в											
k	Единица измерения	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
U_{2k}	В	1 171,0	252,7	168,5	90,3	59,8	61,9	52,3	37,9	35,7	35,8
I_{2k}	А	8 602	2 304,5	924,7	354,4	182,4	154,8	111,0	69,7	57,6	51,6
φ_{2k}	град.	20,8	435,6	298,5	129,8	266,6	423,5	248,3	49,6	265,8	367,3

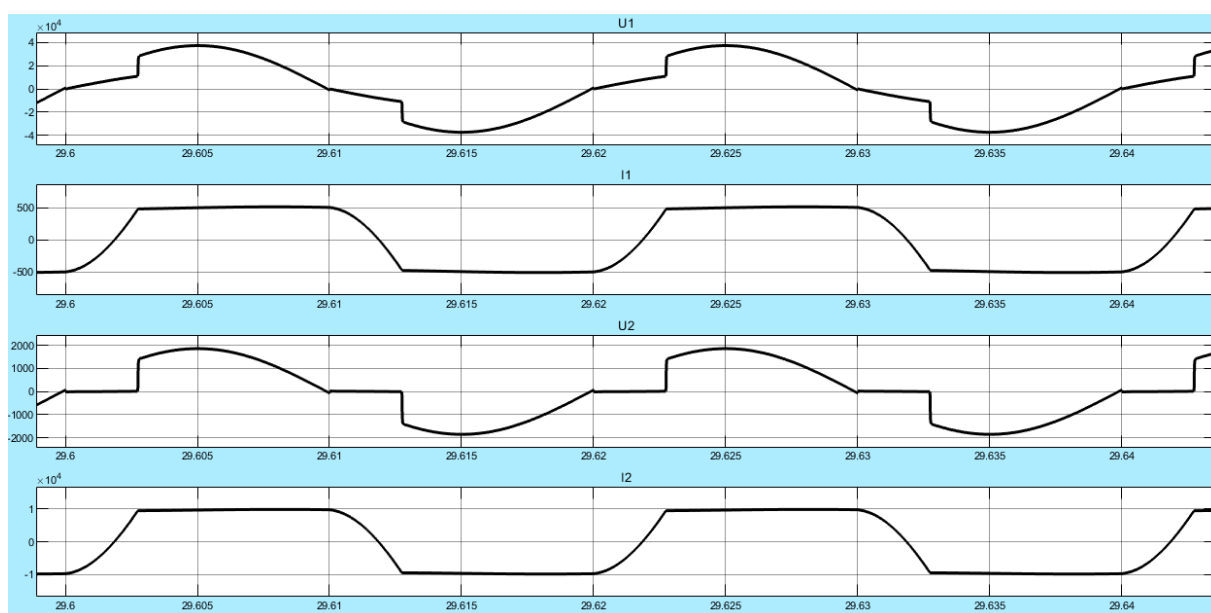


Рис. 3. Осциллограммы напряжения, тока в первичной u_1, i_1 и вторичной u_2, i_2 обмотках ТВ электроподвижного состава

Fig. 3. Oscillograms of voltage, current in the primary u_1, i_1 and secondary u_2, i_2 windings TV of electric rolling stock

гармоник на шинах ТП $P_{tr} = 10\,305,9$ кВт. Суммарная активная мощность учитываемых гармоник на входе электропривода $P_3 = 9\,907,2$ кВт. Потери активной мощности в контактной сети $\Delta P_{kc} = 398,7$ кВт. Суммарная активная мощность учитываемых гармоник вторичной обмотки трансформатора ЭПС $P_2 = 9\,619,9$ кВт. Потери активной мощности в трансформаторе $\Delta P_{tr} = 287,3$ кВт. Суммарная активная мощность на обмотках ТЭД $8\,445,9$ кВт. По-

тери активной мощности в ВИП ЭПС $\Delta P_{вип} = 1\,174$ кВт. Суммарная активная мощность на валах ТЭД $7\,875,2$ кВт. Потери активной мощности в ТЭД $570,7$ кВт. КПД СОД $\eta = 93,3\%$. Из-за потерь активной мощности в ВИП, которые значительно превышают потери в других элементах электрической цепи, КПД ЭПС $\eta_{эпс} = 79,5\%$, а КПД электрической тяги на переменном токе $\eta = 74,2\%$.

Таблица 2. Результаты расчета составляющих баланса мощностей
Table 2. The results of calculating the components of the power balance

k	Единица измерения	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$P_{тр}$	кВт	10 259,3	29,0	21,7	-5,7	-0,02	1,22	-0,64	0,50	-0,005	0,51
$Q_{тр}$	кВАр	5 733,7	30,7	-31,2	6,8	-3,02	2,34	-1,49	0,54	-0,57	0,04
$P_{1к}$	кВт	9 773,1	98,6	44,4	-12,3	-0,25	2,90	-1,52	1,14	-0,03	1,16
$Q_{1к}$	кВАр	4 745,6	350,7	-86,7	15,8	-6,80	5,20	-3,3	1,19	-1,29	0,07
$P_{2к}$	кВт	9 416,4	144,8	74,3	-20,5	-0,65	4,27	-2,1	1,71	-0,15	1,83
$Q_{2к}$	кВАр	3 577,0	564,0	-139,9	24,6	-10,9	8,57	-5,4	2,01	-2,05	0,23

С помощью формул (3–6) рассчитаны составляющие баланса мощностей (2) (табл. 2).

Суммарная реактивная мощность учитываемых гармоник напряжения и тока на шинах ТП $Q_{тр} = 5 737,8$ кВАр, на входе электропривода $Q_3 = 5 020,5$ кВАр. Потери реактивной мощности в контактной сети $\Delta Q_{кc} = 717,3$ кВАр. Суммарная реактивная мощность учитываемых гармоник напряжения и тока во вторичной обмотке трансформатора ЭПС $Q_2 = 4 018,2$ кВАр. Потери реактивной мощности в трансформаторе ЭПС $\Delta Q_{ТВ} = 1 002,3$ кВАр. Коэффициент мощности на шинах ТП $K_{МТП} = 0,841$. Коэффициент мощности на входе электропривода ЭПС $K_{М1} = 0,863$.

Величина реактивных сопротивлений несинусоидальному току основных силовых элементов электрической тяги на переменном токе значительно превышает активное сопротивление. Из-за падения напряжения на реактивных и активных сопротивлениях элементов СОД и ЭПС переменного тока отклонение напряжения на обмотках ТЭД составляет 31 %, поэтому скорость движения поезда ограничивается и составляет 43 км/ч.

Решение проблемы возможно с применением электрической тяги поездов на постоянном токе высокого напряжения и устранением индуктивного сопротивления в контуре силовой электрической цепи напряжением 37,1 кВ (рис. 4).

На ТП к вторичным обмоткам с линейным напряжением 27,5 кВ трехфазных тяговых трансформаторов присоединены трехфазные выпрямители, накопители электрической энергии и полупроводниковые стабилизаторы выпрямленного напряжения. К контактной сети сопротивлением $R_{кc}$, которая применялась для тяги поезда на переменном токе, присоединен входной преобразователь высокого напряжения ЭПС, который имеет свойство электрического полупроводникового вариатора при работе в сочетании с накопителями электрической энергии C , реакторами R_f , L_f и трехфазными АИН. Для тяги поезда применяются асинхронные трехфазные тяговые двигатели.

Математическая модель тяги поезда трехсекционным электровозом с АТД и СОД постоянного тока напряжением 37,1 кВ (рис. 5) позволяет оценить динамические и энергетические свойства системы.

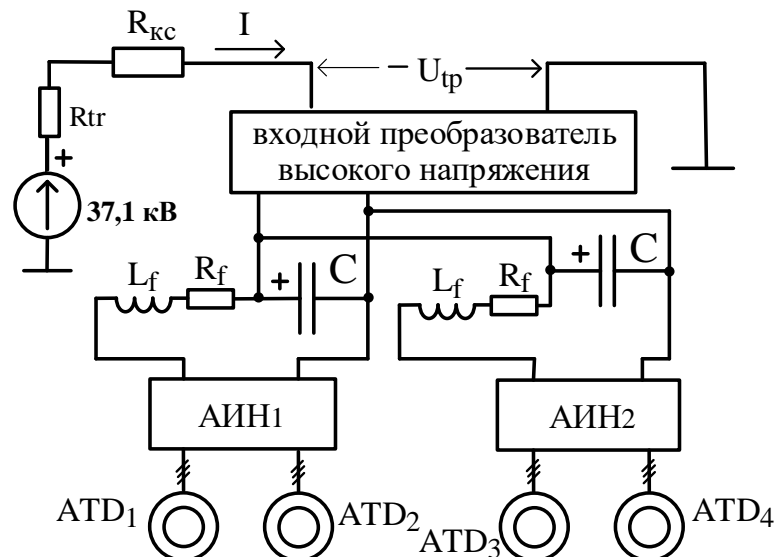


Рис. 4. Принципиальная схема электрической тяги на постоянном токе с одной секции электроподвижного состава

Fig. 4. Schematic of electric traction on direct current from one section of electric rolling stock

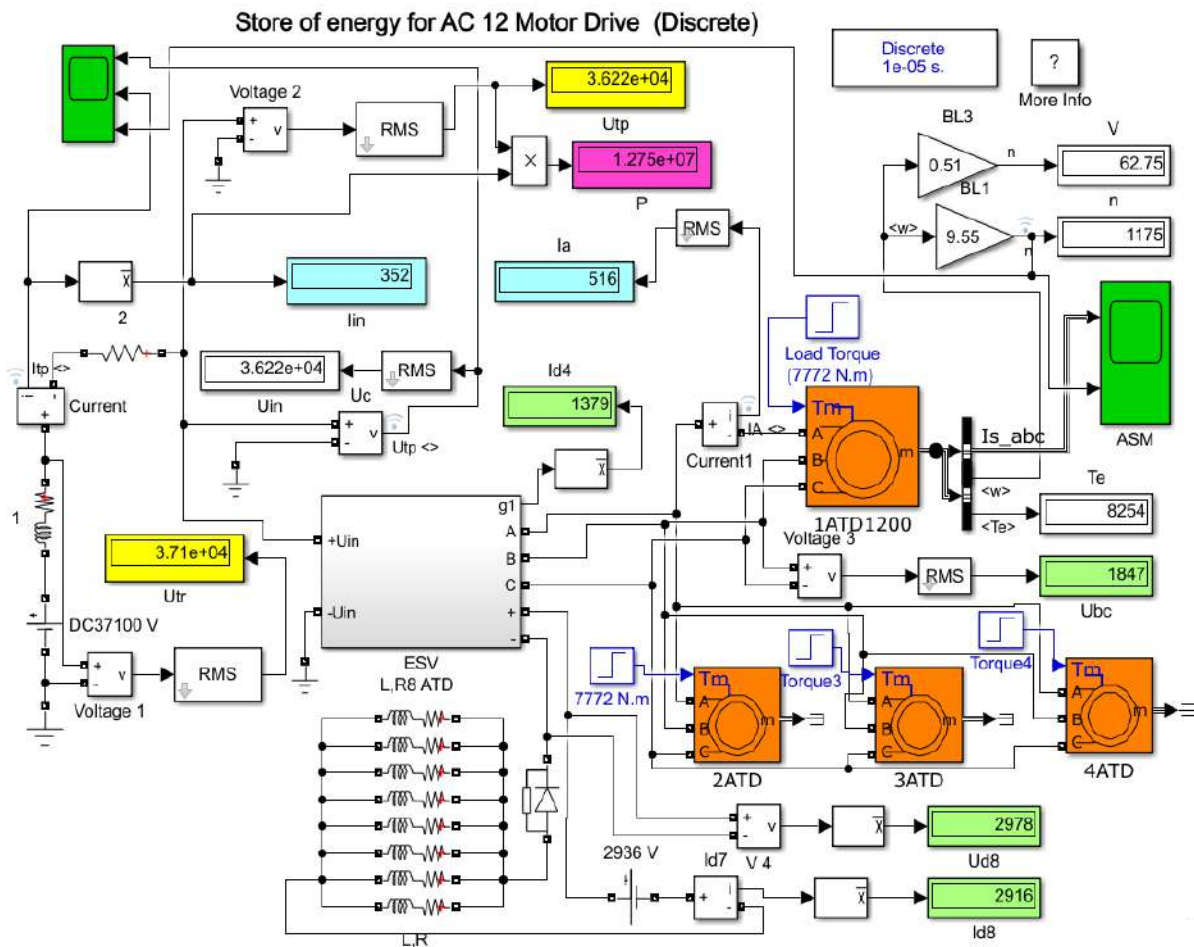


Рис. 5. Математическая модель системы энергетического обеспечения электрической тяги и электроподвижного состава постоянного тока напряжением 37,1 кВ с асинхронным тяговым двигателем в установившемся режиме работы при $V = 63$ км/ч

Fig. 5. Mathematical model of the power supply system for electric traction and electric rolling stock of direct current with a voltage of 37.1 kV with asynchronous traction motor in steady-state operation at $V = 63$ km/h

При подаче напряжения U_{cp} на токоприемник (рис. 6) ток заряда I_{cp} промежуточного накопителя электрической энергии в ESV снижается до нуля, а напряжение U_{cp} повышается до напряжения в контактной сети. В момент $t = 0,02$ с на обмотки статора АТД ЭПС подается трехфазное напряжение частотой 5 Гц, а контактная сеть и ТП загружаются током. При $I_{\text{cp}} = 13$ А вал электродвигателей начинает вращаться, повышается скорость до $n = 97$ об/мин, повышается ток до 40 А и снижается напряжение на токоприемнике до 37 кВ. КПД электрической тяги при скорости движения $V = 5$ км/ч составляет $\eta_{\text{ЭТ}} = 63,8\%$.

При работе системы в данном режиме требуется увеличивать входное электрическое сопротивление ЭПС преобразователем высокого напряжения с целью согласования величины коэффициента модуляции и глубины модуляции в системе управления АИН. Так как АТД при $f = 5$ Гц работает на жесткой рабочей ветви механической характеристики, то для

ограничения ускорения, обеспечения надежного сцепления колес с рельсами и для исключения автоколебаний в системе возникает необходимость в повышении входного электрического сопротивления АТД, в применении ПИД-регулятора с использованием обратных связей по скорости вращения вала и по току в обмотках статора АТД.

Для плавного разгона поезда до скорости 63 км/ч (см. рис. 5) необходимо одновременно преобразователем высокого напряжения (см. рис. 4) уменьшать входное электрическое сопротивление ЭПС, а в системе управления АИН изменять величину коэффициента модуляции и глубину модуляции. В данном режиме работы системы суммарная мощность на валах 12-и АТД $P_{\text{в}} = 11\,475$ кВт, активная мощность на токоприемнике ЭПС $P_{\text{cp}} = 12\,749$ кВт и активная мощность на шинах ТП $P_{\text{т}} = 13\,059$ кВт. КПД ЭПС составляет 90%, КПД СОД 97,6% и КПД электри-

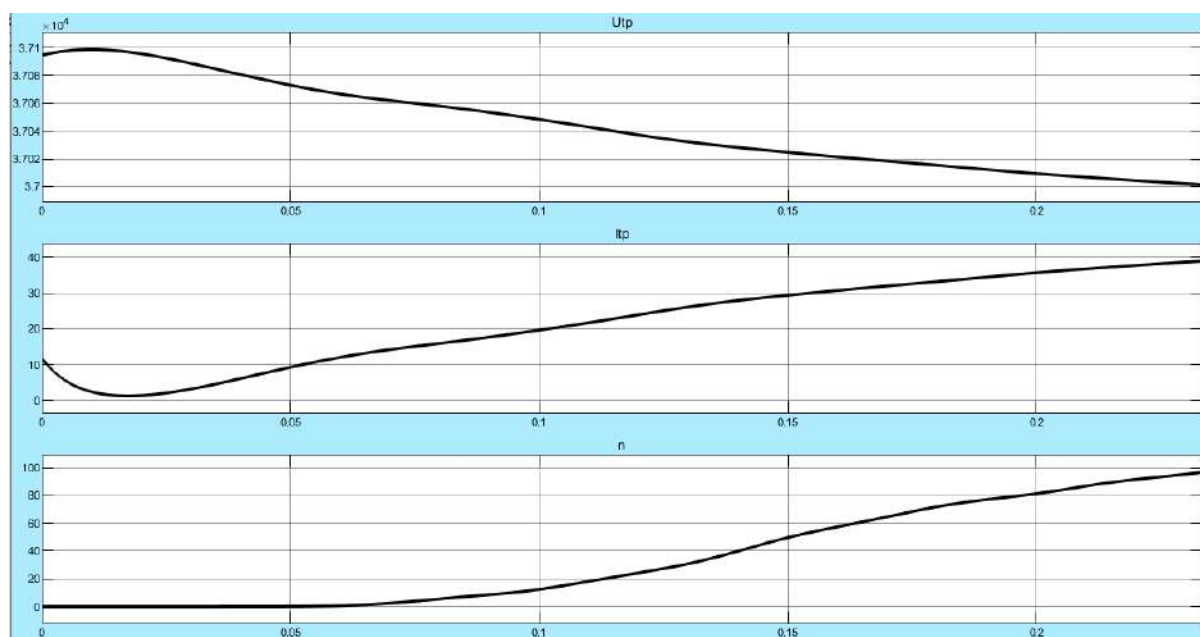


Рис. 6. Осциллограммы напряжения U_{tp} , тока I_{tp} и скорости вращения вала n
Fig. 6. Oscillograms of voltage U_{tp} , current I_{tp} and shaft rotation speed n

ческой тяги поезда на постоянном токе напряжении 37,1 кВ с АТД – 87,9 %.

Заключение

Таким образом, энергетическую эффективность электрической тяги поездов можно повысить на 15,6 % по сравнению с электрической тягой на пе-

ременном токе напряжением 27,5 кВ, скорость движения – на 31,5 %. Уровень напряжения в середине межподстанционной зоны позволяет работать трехсекционными грузовыми электровозам в номинальном режиме для тяги трех соединенных поездов, а их скорость движения может ограничиваться допустимым током в проводах контактной подвески.

Список литературы

1. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. М. : Министерство образования и науки РФ, 2014. 244 с.
2. Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Астраханцев Л.А. Новые возможности повышения эффективности образовательного процесса в учебных заведениях высшего образования // Современные проблемы профессионального образования: опыт и пути решения : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск : ИГУ, 2018. С. 837–843.
3. Аржанников Б.А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов. Екатеринбург : Урал. гос. ун-т путей сообщ., 2012. 207 с.
4. Салита Е.Ю., Ковалева Т.В., Комякова Т.В. Обоснование внедрения двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа в системе электроснабжения метрополитена // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 11–20.
5. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2015. Т. 2. 307 с.
6. Чернов Ю.А. Электроснабжение железных дорог. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2016. 406 с.
7. Преобразователь выпрямительно-инверторный ВИП-1000-У1 : руководство по эксплуатации ИЕАЛ.435411.046 РЭ. Саранск : ОАО «Электровыпрямитель», 2008. 35 с.
8. Тайгелькеттер И., Ширенгер Д. Мощный преобразователь на IGBT-транзисторах для применения на железнодорожном подвижном составе. Мюнхен : Siemens AG, 2000. 5 с.
9. Литовченко В.В. 4gS-четырёхквadrанный преобразователь электровозов переменного тока // Изв. вузов. Электромеханика. 2000. № 3. С. 64–73.
10. Маевский О.А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978. 320 с.
11. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook. New York : Wiley, 2007. 379 p.
12. Francesco V., Luigi I. Dynamic and Control of Switched Electronic Systems // Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters. London : Springer Nature, 2012. 492 p.
13. Poynting J.H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field // Philosophical Transactions of the Royal Society. T. 175. London, 1884. P. 343–361.
14. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. СПб. : Питер, 2009. Т. 2. 431 с.
15. Уточненный закон сохранения энергии / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, К.П. Якобчук и др. URL: http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm (дата обращения 10.04.2020).

16. Инновационные перспективы тягового электроподвижного состава / А.В. Воротилкин, Н.Л. Михальчук, Н.Л. Рябченко и др. // Мир транспорта. 2015. Т. 13, № 6. С. 62–76.
17. Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20, № 2. С. 89–98. DOI: 10.14529/power200208.
18. Рябченко Н.Л. Энергетическая эффективность тягового привода магистральных электровозов / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева и др. // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 29–41.

References

1. Prognoz nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda [Forecast of scientific and technological development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Moscow: Ministry of Education and Science of the Russian Federation, 2014. 244 p.
2. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhansev L.A. Novye vozmozhnosti povysheniya effektivnosti obrazovatel'nogo protsessa v uchebnykh zavedeniyakh vysshego obrazovaniya [New opportunities to increase the efficiency of the educational process in educational institutions of higher education]. Materialy III vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennye problemy professional'nogo obrazovaniya: opyt i puti resheniya" [Materials of III All-Russian Scientific and Practical Conferences with International Participation "Modern problems of vocational education: experience and solutions"]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2018. Pp. 431–434.
3. Arzhannikov B.A. Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov: Monografiya [Traction DC power supply for high-speed and heavy-duty train traffic: a monograph]. Ekaterinburg: USURT Publ., 2012. 207 p.
4. Salita E.Yu., Kovaleva T.V., Komyakova T.V. Obosnovanie vnedreniya dvenadtsatipul'sovykh vypryamitelei posledovatel'nogo tipa v sisteme elektrosnabzheniya metropolitena [Justification of the introduction of twelve-pulse serial rectifiers in the metro power supply system]. Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]. Omsk State University of Railway Transport. Omsk, 2020, No. 1 (41). Pp. 11–20.
5. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and converter technology]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2015. Vol. 1. 307 p.
6. Chernov Yu.A. Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog [The power supply of railways]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2016. 406 p.
7. Preobrazovatel' vypryamitel'no-invertornyi VIP-1000-U1: Rukovodstvo po ekspluatatsii IEAL.435411.046 [Rectifier-inverter VIP-1000-U1 converter: Operating manual IEAL.435411.046 RE]. Saransk: Elektrovypryamitel' OAO Publ., 2008. 35 p.
8. Taigel'ketter I., Shirenger D. Moshchnyi preobrazovatel' na IGBT-tranzistorakh dlya primeneniya na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave [Powerful IGBT-transistor converter for application on a cross-line rolling stock]. Munich: Siemens AG, 2000.
9. Litovchenko V.V. 4gS-chetyrekhkvadrantnyy preobrazovatel' elektrovozov peremennogo toka [4gS -quadrant converter of AC electric locomotives]. Izv. Vuzov Elektromekhanika [Proceedings of Higher Education Institutions. Electrical mechanics], 2000. No. 3. Pp. 64–73.
10. Maevskii O.A. Energeticheskie kharakteristiki ventil'nykh preobrazovatelei [Energy characteristics of valve converters]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 320 p.
11. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook. New York: Wiley, 2007. 379 p.
12. Francesco V., Luigi I. Dynamic and control of switched electronic systems. Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters. Springer, 2012. 492 p.
13. Poynting J.H. On the transfer of energy in the electromagnetic field. Philosophical Transactions of the Royal Society. London: 175, 1884, Pp. 343–361.
14. Demirchan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical bases of an electrical engineering]. St. Petersburg: Piter Publ., 2009. Vol. 2. 431 p.
15. Ryabchenok N.L., Alexeyeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhansev L.A. Utochnenniy zakon sokhraneniya energii [Refined energy conservation law]. Materialy XI Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji "Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami" [Materials of the XI international scientific and practical conference "prospective studies in science and technology"], 2015. V. 11, Techniczne nauki. Przemysl (Poland): Nauka i studia. Pp. 63–74.
16. Vorotilkin A.V., Mikhalkuk N.L., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L. Innovatsionnye perspektivy tyagovogo elektropodvijnogo sostava [Innovative perspectives of traction rolling stock]. Mir transporta [World of transport], 2015. Vol. 13. No. 6. Pp. 62–76.
17. Alexeyeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhansev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' v elektricheskikh tseyakh s poluprovodnikovymi priborami [Energy efficiency in electrical circuits with semiconductor devices]. Vestnik YurGU. Seriya «Energetika». [Bulletin of the South Ural State University. Series: "Power engineering"], 2020. Vol. 20. No. 2. Pp. 89–99.
18. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhansev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' tyagovogo privoda magistral'nykh elektrovozov [Energy efficiency of the traction drive of mainline electric locomotives]. Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]. Omsk State Transport University Publ. Omsk, 2020. No. 1(41). Pp. 29–41.

Информация об авторах

Рябченко Наталья Леонидовна - к. т. н., доцент, заведующая кафедрой «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astranal@mail.ru

Алексеева Татьяна Леонидовна - к. т. н., доцент, доцент кафедры «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: talecseeva843@gmail.com

Астраханцев Леонид Алексеевич - д. т. н., профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Тихомиров Владимир Александрович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: svat_irk@mail.ru

Мартусов Алексей Леонидович – инженер, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, aleksey.martusov@yandex.ru

Information about the authors

Natalya L. Ryabchyonok – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Head of the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astranal@mail.ru

Tatyana L. Alekseeva – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: talecseeva843@gmail.com

Leonid A. Astrakhantsev – Doctor of Engineering Science, Professor, the Subdepartment of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Vladimir A. Tikhomirov – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Head of the Subdepartment of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: svat_irk@mail.ru.

Aleksei L. Martusov – engineer, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: aleksey.martusov@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).121-126

УДК 621.311

Проектирование сортировочных устройств в современных условияхЛ. Н. Иванкова¹, А. Н. Иванков², А. Н. Кузнецова¹✉¹ Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация² ООО «ПСК ТехПроект», г. Москва, Российская Федерация

✉ aa135@mail.ru

Резюме

В статье выполнен анализ основных проблем, возникающих при проектировании сортировочных горок. За последние годы появились новые вагоны, изменились конструкции пути, в том числе на сортировочных горках. В практике проектирования встречается применение кривых менее 200 м, укладка одиночных обыкновенных стрелочных переводов марки 1/9, уменьшение расстояния между вершиной горки и первым стрелочным переводом при проектировании плана. Эти факторы негативно сказываются на работе сортировочных горок. Подчеркивается, что действующие методики ориентированы в основном на обеспечение скатывания одиночных бегунов и мало подходят для расчетов при скатывании групповых отцепов. При скатывании такого отцепа происходит уменьшение его ускорения на скоростном участке горки, что впоследствии приводит к потере эффективности торможения и снижению перерабатывающей способности горки. Большой проблемой является также разделение групповых отцепов с одиночными вагонами на стрелочных переводах. Рассмотрены способы расформирования многовагонных отцепов при делении состава на части и без разукрупнения групп. Выявлены основные негативные факторы, влияющие на скорость роспуска. Поскольку основную нагрузку несет вторая тормозная позиция, предложено увеличить ее мощность путем укладки дополнительных замедлителей. Сделан вывод, что существующие методы расчета не позволяют учесть все многообразные факторы, влияющие на качество сортировочного процесса.

Ключевые слова

план и профиль сортировочных горок, расформирование составов, многовагонный отцеп, скорость скатывания на головном участке, мощность замедлителей, укладка дополнительных замедлителей

Для цитирования

Иванкова Л.Н. Проектирование сортировочных устройств в современных условиях / Л. Н. Иванкова, А. Н. Иванков, А. Н. Кузнецова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 121–126. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).121-126

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.02.2021, поступила после рецензирования: 25.02.2021, принята к публикации: 28.02.2021

Design of sorting devices in modern conditionsL. N. Ivankova¹, A. N. Ivankov², A. N. Kuznetsova¹✉¹ The Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation² «PSK TekhProekt» OOO, Moscow, the Russian Federation

✉ aa135@mail.ru

Abstract

The article analyzes the main problems in the design of shunting humps. In recent years, new railcars have appeared, track designs have changed, including those on shunting humps. In the design practice we can encounter the use of curves less than 200 m, laying single ordinary switches of the mark 1/9, reducing the distance between the top of the shunting hump and the first switch when designing the plan. These factors have a negative impact on the operation of gravity sorting yards. It is emphasized that the current methods are mainly focused on ensuring the rolling down of single “runners” and are not suitable for calculations when a group cut rolls down. When such a cut rolls down, its acceleration decreases on the high-speed section of the hump, which subsequently leads to a loss of braking efficiency and a decrease in the processing capacity of the hump. Also, a major problem is the separation of group cut of cars and single railcars on the switches. The methods of breaking down multi-railcar cut of cars when dividing the train set into parts and without subdivision of the groups are considered. The main negative factors affecting the rate of breaking down are identified. Since the main load is carried by the second braking position, it is proposed to increase its power by laying additional retarding mechanisms. It is concluded that the existing calculation methods do not allow us to take into account all the various factors that affect the quality of the shunting process.

Keywords

plan and profile of shunting humps, breaking down of train sets, multi-railcar cut, speed of rolling down at the main section, power of retarding mechanisms, laying down of extra retarding mechanisms

For citation

Ivankova L. N., Ivankov A. N., Kuznetsova A. N. Proektirovanie sortirovochnykh ustroystv v sovremennykh usloviyakh [Design of sorting devices in modern conditions]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.121–126.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).121-126

Article info

Received: 15.02.2021, Revised: 25.02.2021, Accepted: 28.02.2021

Введение

Проблема проектирования сортировочных горок всегда была очень актуальной для железнодорожного транспорта. Требования к плану и профилю очень противоречивые, иногда взаимоисключающие. Например, при проектировании подвижной части горки одним из требований является надежность расцепления вагонов на горбе горки, что достигается как можно более крутым противоклоном (тогда все автосцепные приборы гарантированно сжаты, что облегчает их расцепку). Однако другое обязательное условие – возможность трогания состава с места после остановки – не допускает проектирование очень крутого уклона. Можно перечислить еще ряд требований к плану и профилю как спускной, так и подвижной частей сортировочного устройства, которые приводят к необходимости достигать каких-либо компромиссов.

Несомненно, уменьшение высоты проектируемой горки приводит к снижению потребных инвестиций, однако в холодных климатических зонах с сильными порывистыми ветрами высоту горки приходится увеличивать для обеспечения добегающего очень плохого (плохого) бегуна до расчетной точки самого трудного по условиям скатывания пути.

Ситуация осложняется тем, что устаревшая нормативная документация (времен Министерства путей сообщения) сейчас отменена, проектировщики вынуждены руководствоваться сводом правил в рамках Технического регламента Таможенного союза, все это носит какой-то бессистемный характер, к тому же некоторые документы противоречат друг другу [1].

В настоящей статье рассмотрены основные проблемы, которые были не полностью решены в предыдущих версиях нормативной документации и в настоящее время зачастую являются причиной разночтений в практике проектирования сортировочных горок.

Основные проблемы при расчете параметров горок

Прежде всего число путей в сортировочном парке необходимо привязать к потребной переработке и съему вагонов с одного пути. На практике емкости путевого развития сортировочных парков зачастую не хватает для ритмичной работы станции. Ведь помимо потребного числа путей для обеспечения формирования поездов установленных назначений необходимо иметь достаточное количество дополнительных путей для других нужд (для местных вагонов, технических и коммерческих браков, отсевных, путей для хозяйственных нужд и т. д.). Если общее количество сортировочных путей не соответствует потребностям, приходится применять скользкую специализацию, что приводит к повторной переработке вагонов на горке и снижает ее перерабатывающую способность.

За последние 30 лет (с момента издания [2]) произошла модернизация подвижного состава, практически нет восьмиосных вагонов (за исключением цистерн, которые курсируют преимущественно маршрутами на ограниченных полигонах), зато появились сочлененные шестиосные полувагоны, вагоны-хопперы.

Ходовая часть современного подвижного состава изменилась, много вагонов с кассетными подшип-

никами, в частности, такие подшипники имеют тележки «Barber». Основное удельное сопротивление для этих вагонов никогда не определялось.

Появились новые большегрузные вагоны с осевой нагрузкой до 25 т на ось и даже до 27 т. Возникают сложности с определением основного удельного сопротивления и для такого типа подвижного состава. Если по Правилам и нормам проектирования сортировочных устройств колеи 1520 мм [3] для 92-тонного вагона для ОХБ эта величина принималась 0,5 кгс/тс, то можно предположить, что тут будет соответственно 0,46 и 0,43 кгс/тс, а возможно даже ниже – до 0,3–0,35 кгс/тс. Все это требует дальнейших исследований и испытаний в полевых условиях.

Особое внимание следует уделить минимальному радиусу кривой в плане на закрестовинных кривых. До недавнего времени было 200 м [3], впоследствии этот параметр уменьшили до 180 м, но в нормативной литературе можно найти и 150 м. Следует внести ясность и жестко регламентировать допустимые радиусы кривых.

Очень неохотно проектировщики рассматривают возможность укладки перекрестного съезда 2/6 на горке. Так, на станции Лужская-Сортировочная был уложен съезд 2/9 (при этом стрелочные переводы в съезде 1/9). Это привело к замятости скоростного участка и, как следствие, к ухудшению разделения отцепов по первой стрелке и по первому замедлителю. В научно-технической литературе подчеркивается, что путевое развитие стрелочных горловин должно соответствовать применяемой технологии работы [4, 5].

Особый вопрос – расстояние между вершиной горки и первым стрелочным переводом. Согласно [3] для размещения измерительного участка необходимо выдерживать прямой участок 20 м между вершиной горки и первым стрелочным переводом, однако это требование зачастую нарушается, в ряде случаев проектируют и короче, так как там должен размещаться только весомый участок.

Мощность тормозных средств вызывает много споров в научно-технической литературе. Как показала практика, при скатывании одиночных отцепов мощности вполне хватает, а вот многовагонные отцепы не вытормаживаются должным образом [6]. Понятно, что это дефект алгоритма регулирования скорости. Следовательно, необходимо изменить алгоритм вытормаживания отцепов на спускной части горки.

В более ранних источниках рассматривалась горка максимальной высоты (по условию докатывания очень плохого бегуна до расчетной точки), минимальной высоты по условию докатывания массовых бегунов до хвоста сортировочного парка [7]. В случае, если станционная площадка располагается

на косогоре, нет необходимости проектировать все в одних отметках по низу.

Продольный профиль спускной части, безусловно, оказывает значительное влияние на эффективность сортировочного процесса. При его проектировании приходится учитывать множество разнонаправленных факторов [8–12]. Тезис, что сортировочные пути в профиле проектируются отдельно по каждому пучку, также требует корректировки. Исходя из этого, все пути должны быть в одних отметках в пучке, а поэтому надо делать разуклонку.

При укладке бесстыкового пути требования к проектированию совершенно другие. Достаточно сказать, что крестовина имеет вылет порядка 1 м для приваривания плети с изостыком, соответственно геометрия такого пути существенно отличается от звеньев.

Скатывание многовагонных отцепов

Проблема торможения многовагонных отцепов существует давно. Одним из последствий увеличения числа вагонов в отцепе является уменьшение его ускорения на скоростном участке горки. При этом происходит потеря мощности замедлителей из-за низкой скорости входа такого отцепа на первую тормозную позицию и пропуска части его вагонов без торможения, а потом может не хватить мощности замедлителей для прицельного торможения [6]. Кроме того, возникают проблемы разделения таких отцепов на стрелках с одиночными вагонами. Следует учитывать, что при подготовке сортировочных путей к роспуску должна быть обеспечена длина свободной части пути, достаточная для снижения скорости такого отцепа. Одним из путей радикального решения данной проблемы может быть разделение таких отцепов на несколько (2, 3 и т. д.) более коротких, а может быть даже осаживание такого отцепа, если он будет слишком длинным, особенно в конце состава. Однако это, естественно, увеличит время роспуска и, в конечном итоге, снизит перерабатывающую способность горки.

До недавнего времени, если в составе имелись многовагонные отцепы, для улучшения управления скатыванием рекомендовалось делить отцепы на части (не более 10 вагонов в каждом отцепе). Этой проблеме посвящен ряд научных исследований [13–16]. Ростовский филиал Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте разработал инструкцию, где предложил формулу, полученную по максимальной длине отцепа:

$$K_m = \frac{2 \times M_{TC} \times K_{TC} \times l}{(V_0 + \sqrt{2 \times g \times \Delta h})^2 - V_k^2},$$

где K_m – максимальное количество вагонов в отцепе; V_0 – начальная скорость отцепа (скорость роспуска), м/с; V_k – допустимая скорость соударения на путях

подгорочного парка – не более 1,38 м/с (5 км/ч); M_{TC} – наличная мощность тормозных средств спускной части горки по маршруту скатывания, м.э.в.; K_{TC} – коэффициент использования тормозных средств, связанный с расположением тормозных позиций на горке и особенностями торможения длинных отцепов для исключения возможности выдавливания колесных пар из замедлителей; $K_{TC} = 0,67$; l – длина спускной части горки (расстояние от горба горки до конца ближайшей парковой тормозной позиции), м; Δh – профильная высота горба горки относительно парковой тормозной позиции горки, м; g – ускорение свободного падения, м/с² ($g = 9,8$ м/с²) [17].

Деление состава на части в процессе ролпуска не снимает остроту проблемы. Возникают следующие сложности:

- потеря мощности замедлителей первой тормозной позиции (1 ТП);

- неполное использование мощности парковой тормозной позиции (ПТП) в зависимости от длины свободной части пути сортировочного парка;

- низкая скорость таких отцепов на головном участке со всеми вытекающими из этого последствиями как по разделению со смежными короткими отцепами, так и неэффективному использованию мощности первой тормозной позиции.

Здесь, на наш взгляд, есть несколько более глубинных проблем.

Следует детально разобраться, почему такие длинные отцепы возникают вообще. В большинстве случаев причиной является неэффективность плана формирования. По сути маршрутные группы ставят в разборочные поезда на предыдущих станциях формирования.

Причин образования групповых отцепов несколько. Прежде всего, это избыточная переработка, когда мелкие партии укрупняются до маршрутных групп из-за дефицита сортировочных путей на станциях зарождения. Выход один – строить дополнительные емкости на выходных сортировочных станциях грузообразующих районов.

Другой фактор – это явно маршрутные группы, идущие со станций зарождения. Эта проблема решается повышением степени маршрутизации вагонопотоков. Если на станциях зарождения вагонопотоков есть свободные емкости путевого развития, можно применить тарифное регулирование. Если резервов емкости нет, следует рассмотреть необходимость увеличения путевого развития.

Самая важная проблема заключается в том, как мотивировать грузоотправителя накапливать маршрутные группы на путях необщего пользования. Ведь на станциях общего пользования зачастую резервов путевого развития нет. Если скидки к тарифу грузовладельцу не предусматриваются, то ему не выгодно заниматься накоплением маршрутных групп или маршрутных поездов.

Дисконт к тарифу за организацию маршрута не предусмотрен, а если и предусмотрен, то нивелируется повышением дополнительных сборов за отправку по «твердой нитке».

Так что проблемы образования многовагонных отцепов затрагивают и другие сферы эксплуатационной деятельности, в том числе вопросы гибкого тарифообразования. При эффективном его использовании может возникать мощный стимул по техническому перевооружению всего транспортно-конвейера.

Возвращаясь к функционированию сортировочных устройств и учитывая все сказанное, можно отметить, что основная нагрузка приходится на пучковую тормозную позицию (2 ТП), поэтому целесообразно рассматривать вопрос увеличения ее мощности за счет дополнительных замедлителей, может быть даже за счет ликвидации 1 ТП и расположения высвободившихся замедлителей на 2 ТП.

Однако это все конструктивные решения, а вот для существующих горок рецепт один – изменение алгоритма управления тормозными позициями.

Существующие модели скатывания вагонов с сортировочных горок не учитывают изложенные факторы [18]. Кроме того, достаточно сложен вопрос с представлением в модели многовагонных отцепов при расчете сопротивления от среды и ветра. Непонятно, какие углы поворота следует учитывать, так как отцеп растянут по горке, и ориентация отдельных вагонов относительно продольной оси парка варьируется в широких пределах (от 0 до 30–40°), а коэффициент C_x и C_{xx} изменяется в данном диапазоне углов в несколько раз.

Выводы

На основании выполненного анализа существующих методик расчета сортировочных горок и практики проектирования можно резюмировать, что модернизация подвижного состава и конструкций пути настоятельно требуют пересмотра и дополнения нормативных положений с учетом реалий сегодняшнего дня. Кроме того, ряд проблем, связанных с массовым расформированием составов на крупных распорядительных станциях, можно решить за счет совершенствования эксплуатационной работы и улучшения взаимодействия с грузовладельцами. Авторами предложены следующие мероприятия для улучшения работы с многовагонными отцепами:

1. Разукрупнение отцепов за счет оптимизации плана формирования поездов и декомпозиции мощных назначений.

2. Изменение алгоритма вытормаживания отцепов для обеспечения рационального использования мощности тормозных позиций (в основном за счет переноса погашаемой энергетической высоты на первой тормозной позиции).

3. Усиление мощности второй тормозной позиции за счет установки дополнительного звена замедлителей. В некоторых случаях можно рассмотреть вопрос установки второй парковой тормозной позиции на путях, специализированных для назначений с многовагонными отцепами.

Список литературы

1. СП 225.1326000.2014. Свод правил. Станционные здания, сооружения и устройства : утв. Приказом Минтранса России от 02.12.2014 N 331 // Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» локальной сети (дата обращения: 15.01.2021).
2. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. М. : Транспорт, 1992. 95 с.
3. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. М. : Техинформ, 2003. 69 с.
4. Сортировочная станция: из прошлого в будущее / А.Н. Шабельников, В.А. Кобзев, И.А. Ольгейзер и др. // Железнодорожный транспорт. 2020. № 9. С. 18–21.
5. Костенко В.В., Шепель А.С. Методика оценки соответствия технологии и путевого развития стрелочных горловин // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРАНС-2019). СПб., 2020. С. 57–68.
6. Иванкова Л.Н., Кузнецова А.Н. Моделирование скатывания многовагонных отцепов с сортировочной горки // Наука и образование транспорту. 2018. № 1. С. 84–86.
7. Бузанов С.П., Карпов А.М., Рыцарев М.А. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных устройств. М. : Транспорт, 1965. 232 с.
8. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Фуфачева М.В. Развитие методов этапного овладения перевозками на двухпутных линиях при обращении длинносоставных грузовых поездов. Магнитогорск : Магнитогорский Дом печати, 2012. 141 с.
9. Иванкова Л.Н., Бондаренко И.С. Влияние основных параметров профиля надвигной и спускной частей сортировочной горки на перерабатывающую способность // Наука и техника транспорта. 2012. № 4. С. 42–46.
10. Осипов Д.В., Климов А.А. Влияние продольного профиля перевальной части сортировочной горки на перерабатывающую способность // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 71–76.
11. Бобровский В.И., Колесник А.И. Анализ влияния параметров продольного профиля сортировочной горки на динамику скатывания отцепов // Транспортні системи та технології перевезень. 2012. № 3. С. 10–14.
12. Иванкова Л.Н. Обеспечение комплексного проектирования плана и профиля сортировочной горки // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2018. № 14. С. 18–21.
13. Гунбин А.А., Климов А.А. Определение возможного положения первой тормозной позиции относительно вершины сортировочной горки с учетом роспуска многовагонных отцепов // Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщ. 2019. № 1 (48). С. 36–43.
14. Гунбин А.А., Климов А.А. Оценка влияния количества расцепов «сверхдлинных» отцепов на технологический горочный интервал // Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщ. 2019. №2 (49). С. 19–25.
15. Бобровский В.И., Дорош А.С. Оптимизация режимов торможения отцепов расчетной группы состава // Наука та прогрес транспорту. 2013. № 1 (43). С. 103–112.
16. Мероприятия по снижению уровня риска возникновения событий и происшествий в горочном комплексе / Н.А. Коваленко, Р.А. Ефимов, А.А. Бородин и др. // Тенденции развития железнодорожного транспорта и управления перевозочным процессом. М. : Рос. ун-т трансп. (МИИТ), 2020. С. 120–124.
17. Инструкция по расчету максимально допустимой длины отцепа при роспуске на сортировочных горках М. : ОАО «РЖД», 2012. 11 с.
18. Четчуев М.В. Методы описания структуры железнодорожной станции при разработке ее имитационной модели // Интеллектуальные системы на транспорте. СПб., 2014. С. 360–367.

References

1. SP 225.1326000.2014. Svod pravil. Stantsionnye zdaniya, sooruzheniya i ustroystva (utv. Prikazom Mintransa Rossii ot 02.12.2014 N 331). SPS «KonsultantPlyus». Iz informatsionnogo banka «Stroitel'stvo» [SP 225.1326000.2014. A set of rules. Station buildings, structures and devices (approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of 02.12.2014 N 331). SPS "ConsultantPlus". From the information bank "Construction"] (Accessed: January 15, 2021).
2. Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh Soyuzs SSR [Rules and regulations for designing sorting devices on the railways of the USSR]. Moscow: Transport Publ., 1992. 195 p.
3. Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm [Rules and norms for the design of sorting devices on railways with a gauge of 1520 mm]. Moscow: TECHINFORM Publ., 2003. 169 p.
4. Shabel'nikov A.N., Kobzev V.A., Olgeizer I.A., Rogov S.A. Sortirovochnaya stantsiya: iz proshlogo v budushchee [Shunting station: from the past to the future]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, 2020. No. 9. Pp. 18–21.
5. Kostenko V.V., Shepel' A.S. Metodika otsenki sootvetstviya tekhnologii i putevogo razvitiya strelochnykh gorlovin [Methodology of assessing the compliance of technology and track development of leads]. *Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologii v transportnykh sistemakh (RILTTRANS-2019)*. [Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems (RILTTRANS-2019)], 2020. Pp. 57–68.

6. Ivankova L.N., Kuznetsova A.N. Modelirovanie skatyvaniya mnogovagonnykh ottsepov s sortirovochnoi gorki [Modeling of the rolling down of multi-railcar cuts from a shunting hump]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education for transport], 2018. No. 1. Pp. 84–86.
7. Buzanov S.P., Karpov A.M., Knyazarev M.A. Proektirovanie mekhanizirovannykh i avtomatizirovannykh sortirovochnykh ustroystv [Design of mechanized and automated sorting devices]. Moscow: Transport Publ., 1965. 232 p.
8. Ivankova L. N., Ivankov A. N., Fufacheva M. V. Razvitie metodov etapnogo ovladeniya perevozkami na dvukhputnykh liniyakh pri obrashchenii dlinnosostavnykh gruzovykh poezdov [Development of methods of step-by-step mastering of transportation on double-track lines when handling long-component freight trains]. Magnitogorsk, 2012.
9. Ivankova L.N., Bondarenko I.S. Vliyanie osnovnykh parametrov profilya nadvizhnoi i spusknnoi chastei sortirovochnoi gorki na pererabatyvayushchuyu sposobnost' [Influence of the main parameters of the profile of the sliding and descending parts of the shunting hump on the processing capacity]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport], 2012. No. 4. Pp. 42–46.
10. Osipov D.V., Klimov A.A. Vliyanie prodol'nogo profilya pereval'noi chasti sortirovochnoi gorki na pererabatyvayushchuyu sposobnost' [Influence of the longitudinal profile of the transshipment part of the shunting hump on the processing capacity]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2016. No. 4 (51). Pp. 71–76.
11. Bobrovskii V.I., Kolesnik A.I. [Analysis of the influence of the parameters of the longitudinal profile of the shunting hump on the dynamics of rolling off the hooks]. *Transportni sistemi ta tekhnologii perevezhen'* [Transport systems and transportation technologies], 2012. No. 3. Pp. 10–14.
12. Ivankova L.N. Analiz vliyaniya parametrov prodol'nogo profilya sortirovochnoi gorki na dinamiku skatyvaniya ottsepov [Ensuring the integrated design of the plan and profile of the shunting hump]. *Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta* [Modern problems of improving the work of railway transport], 2018. No. 14. Pp. 18–21.
13. Gunbin A.A., Klimov A.A. Opredelenie vozmozhnogo polozheniya pervoi tormoznoi pozitsii otositel'no vershiny sortirovochnoi gorki s uchetom rospuska mnogovagonnykh ottsepov [Determination of the possible position of the first brake position relative to the top of the shunting hump, taking into account the dissolution of multi-railcar ottsepov]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport], 2019. No. 1 (48). Pp. 36–43.
14. Gunbin A.A., Klimov A.A. Otsenka vliyaniya kolichestva rastsepok «sverkhdlinnykh» ottsepov na tekhnologicheskii gorochnyi interval [Evaluation of the influence of the number of uncoupling of “extra-long” railcar cuts on the technological shunting hump interval]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport], 2019. No. 2 (49). Pp. 19–25.
15. Bobrovskii V.I., Dorosh A.S. Optimizatsiya rezhimov tormozheniya ottsepov raschetnoi gruppy sostava [Optimization of braking modes of railcar cuts of the designed group of the train set]. *Nauka ta progress* [Science and advancements], 2013. No. 1 (43). Pp. 103–112.
16. Kovalenko N.A., Efimov R.A., Borodin A.A., Sukhov A.A. Meropriyatiya po snizheniyu urovnya riska vozniknoveniya sobytii i proisshestvii v gorochnom komplekse [Measures to reduce the risk of events and accidents in the shunting hump complex]. *Tendentsii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta i upravleniya perevochnym protsessom* [Trends in the development of railway transport and transport process management]. The Russian University of Transport (MIIT) Publ., 2020. Pp. 120–124.
17. Instruktsiya po raschetu maksimal'no dopustimoi dliny ottsepa pri rospuske na sortirovochnykh gorkakh [Instructions for calculating the maximum permissible length of the railcar cut when breaking down on the shunting humps]. “Russian Railways” OAO Publ., 2012. 11 p.
18. Chetchuev M.V. Metody opisaniya struktury zheleznodorozhnoi stantsii pri razrabotke ee imitatsionnoi modeli [Methods of describing the structure of a railway station in the development of its simulation model] *Intellektual'nye sistemy na transporte* [Intelligent transport systems]. The Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Railway Transport, 2014. Pp. 360–367.

Информация об авторах

Иванкова Людмила Николаевна – канд. техн. наук, доцент кафедры управления транспортными процессами, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, e-mail: ivankovaln@yandex.ru

Иванков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, главный инженер ООО «ПСК ТехПроект», г. Москва, e-mail: aivankov@yandex.ru

Кузнецова Анжелика Николаевна – канд. техн. наук, доцент кафедры управления транспортными процессами, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, e-mail: aa135@mail.ru

Information about the authors

Lyudmila N. Ivankova – Ph. D. of Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Transport Process Management, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, e-mail: ivankovaln@yandex.ru

Aleksei N. Ivankov – Ph. D. of Engineering Science, Chief engineer of “PSK TechProject” Co. OOO, Moscow, e-mail: aivankov@yandex.ru

Anzhelika N. Kuznetsova – Ph. D. of Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Transport Process Management, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, e-mail: aa135@mail.ru

Анализ переустройства криволинейных участков пути при замене криволинейных стрелочных переводов производства «VAE» (Рига)

В. В. Романенко✉

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

✉ vromanencko@mail.ru

Резюме

На сегодняшний день на Белорусской железной дороге эксплуатируется 24 криволинейных стрелочных перевода производства предприятия «VAE» (Рига). Основное отличие этих переводов от типовых стрелочных переводов заключается в индивидуальности их конструкции. Стрелочные переводы эксплуатируются с 1999 г. и зарекомендовали себя с положительной стороны. Однако срок эксплуатации переводов заканчивается, и при этом, естественно, встает вопрос о возможности их замены. Проблема заключается в том, что на сегодняшний день предприятием «VAE» не планируется проведение сертификации выпускаемой продукции согласно требованиям ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта». К данным стрелочным переводам в дистанциях пути имеется в наличии 7 крестовин и 16 рамных рельсов с острьяками. При отсутствии возможности закупки стрелочных переводов производства «VAE» их необходимо будет заменить либо одиночными обыкновенными, либо типовыми криволинейными стрелочными переводами. Типовые криволинейные стрелочные переводы, соответствующие требованиям ТР ТС 003/2011, производят стрелочные заводы, находящиеся на территории Российской Федерации. Однако по сравнению с переводами «VAE» российские изготавливаются только с конкретными радиусами постоянной кривизны, а не с радиусами тех кривых, в которые эти переводы вписаны на станциях. Замена криволинейных стрелочных переводов «VAE» типовыми стрелочными переводами в несколько раз увеличивает стоимость ремонтных работ и влечет за собой переустройство путей на новую ось, вплоть до переустройства всей горловины станции.

Ключевые слова

железная дорога, стрелочный перевод, переустройство криволинейных участков пути, переводная кривая, величина сдвижки

Для цитирования

Романенко В.В. Анализ переустройства криволинейных участков пути при замене криволинейных стрелочных переводов производства «VAE» (Рига) / В. В. Романенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 127–135. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).127-135

Информация о статье

поступила в редакцию: 20.01.2021, поступила после рецензирования: 11.02.2021, принята к публикации: 15.02.2021

Analysis of the reconstruction of curved sections of the track when replacing curved track switches produced by “VAE” (Riga)

V. V. Romanenko✉

The Belarusian State University of Transport, Gomel, the Republic of Belarus

✉ vromanencko@mail.ru

Abstract

To date, the Belarusian railway operates 24 curved switches manufactured by “VAE” (Riga). The main difference between these switches is the individuality of their design, which is fundamentally different from the design of standard switches. Switches have been in operation since 1999, and have proven themselves to be positive recommend. But when the service life of switches ends, the question on their replaceability naturally arises. The problem is that today “VAE” does not plan to certify its products in accordance with the requirements of TR CU 003/2011 “On the safety of railway transport infrastructure”. There are 7 crosses and 16 stock rails with points available for these switches in the maintenance sections. If it is not possible to purchase switches manufactured by “VAE”, they will need to be replaced with either single ordinary switches or standard curved ones. Standard curved switches are produced by switch plants located on the territory of the Russian Federation and have certificates of compliance with the requirements of TR CU 003/2011. However, compared to switches manufactured by “VAE”, Russian switches are made only with specific radii of constant curvature, and not with the radii of the curves in which these switches are inscribed at stations. Replacing curved “VAE” switches with standard switches increases the cost of repairs several times and entails rearrangement of the tracks according to a new axis, up to the reconstruction of the entire yard neck.

Keywords

railway, switch, reconstruction of curved sections of the track, switch curve, displacement value

For citation

Romanenko V. V. Analiz pereustroistva krivolineinykh uchastkov puti pri zamene krivolineinykh strelochnykh perevodov proizvodstva "VAE" (Riga) [Analysis of the reconstruction of curved sections of the track when replacing curved track switches produced by "VAE" (Riga)]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 1 (69), pp.127–135.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).127-135

Article Info

Received: 20.01.2021, Revised: 11.02.2021, Accepted: 15.02.2021

Введение

Voestalpine VAE Legetecha UAB – группа компаний, которая была основана в 1995 г. как совместное предприятие Voestalpine AG и ЗАО «Литовские железные дороги». Компания является мировым лидером на рынке стрелочных переводов (СП), производимых в том числе и на основе индивидуальных конструктивных решений.

Первые криволинейные СП на Белорусской железной дороге (БЖД) были уложены в 1999 г. На сегодняшний день практически во всех СП в период с 2007 по 2017 г. были заменены крестовины. Перечень криволинейных СП производства «VAE» (Рига), эксплуатируемых на БЖД в настоящее время, приведен далее (табл.).

Перечень криволинейных стрелочных переводов производства «VAE», эксплуатируемых на Белорусской железной дороге
List of curved switches manufactured by "VAE", operated by the Belarusian Railway

№ п/п	Отделение дороги, дистанция пути	Станция	Количество
1	НОД-1, ПЧ-1	Осиновка	1
2	НОД-1, ПЧ-1	Хлусово	1
3	НОД-1, ПЧ-2	Смолевичи	4
4	НОД-1, ПЧ-2	Бобр	1
5	НОД-1, ПЧ-2	Борисов	3
6	НОД-1, ПЧ-2	Толочин	1
7	НОД-1, ПЧ-3	Минск-Восточный	1
8	НОД-1, ПЧ-3	Минск-Сортировочный	1
9	НОД-1, ПЧ-3	Минск-Пассажирский	4
10	НОД-1, ПЧ-3	Негорелое	3
11	НОД-1, ПЧ-9	Уша	1
12	НОД-2, ПЧ-4	Городея	3

Преимущественное расположение СП «VAE» на главных путях направления Орша – Минск – Брест (входящего во II Панъевропейский транспортный коридор) определяет их важное место в структуре стрелочного хозяйства БЖД. Эти СП имеют ряд особенностей не только в устройстве, но и в содержании.

Основная особенность конструкции криволинейных СП «VAE» заключается в том, что оба остряка являются криволинейными, и их кривизна соответствует радиусам криволинейных путей, на которые

они переводят. Из всех поставщиков СП на БЖД такие оригинальные конструкционные условия переводных кривых на сегодняшний день обеспечивает только предприятие «VAE». Очевидно, что для замены исчерпавших свой ресурс СП «VAE», необходима закупка продукции именно на этом предприятии.

На БЖД с 15 июля 2011 г. действует Технический регламент [1] принятый решением Комиссии Таможенного союза, который распространяется на инфраструктуру железнодорожного транспорта, в том числе на пути общего и необщего пользования.

Требования [1] должны учитываться при проектировании, производстве, строительстве, монтаже, приемке и вводе в эксплуатацию объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, а также при оценке соответствия продукции. Регламент устанавливает требования для путей, по которым обращаются поезда со скоростью до 200 км/ч.

Перечень продукции, относящейся к конструкции СП, подлежащей декларированию соответствия, следующий:

- болты для рельсовых стыков;
- гайки для болтов рельсовых стыков;
- брусья деревянные для СП широкой колеи;
- костыли путевые;
- подкладки костыльного скрепления железнодорожного пути;
- противоугоны пружинные к железнодорожным рельсам;
- прокладки рельсового скрепления;
- стыки изолирующие железнодорожных рельсов;
- шурупы путевые;
- щебень для балластного слоя железных дорог из природного камня.

Таким образом, очевидно, что для поставки своей продукции на БЖД предприятие «VAE» должно ее сертифицировать, но ввиду небольшого количества СП предприятие не планирует этого.

Путевое хозяйство ОАО «Российские железные дороги» [2] также ориентируется на применение криволинейных СП для повышения скоростей движения в криволинейных участках железнодорожного пути [3–5], что экономически выгоднее, чем вынос переводов из кривых. Изготавливаются и укладываются в путь специальные конструкции односторонних криволинейных СП различных радиусов.

Конструкционные особенности стрелочных переводов производства «VAE»

Все эксплуатируемые СП на БЖД имеют марку крестовины 1/11, тип рельсов и металлических элементов – Р65, уложены на деревянных брусках, поставляемых комплектно с самим СП.

Такие переводы имеют основные и боковые пути различной кривизны, при этом радиусы основного пути переводов варьируется от 640 м до 2 257 м, бокового пути – от 266 м до 625 м. Конкретные радиусы переводных кривых назначаются согласно схеме железнодорожных путей станции. Проектная ширина колеи по всей длине перевода составляет 1 520 мм и неизменна по обоим путям [6].

По сравнению с типовыми одиночными обыкновенными СП, стрелочные переводы производства «VAE» имеют следующие особенности:

- поставляется с завода изготовителя тремя цельными блоками, смонтированными на деревянных брусках, которые пронумерованы и имеют специальную номерную бирку, набитую у торца каждого бруса;

- оба остряка являются криволинейными, их кривизна, а также кривизна переводных кривых, соответствует радиусам криволинейных участков путей, на которые они переводят, в том числе ряд стрелочных переводов расположены и в пределах переводных кривых;

- в качестве изолирующих устроены усиленные клеболтовые стыки с четырехдырными полимерными накладками;

- в середине переводного пути отсутствуют стыки, которые устроены в обыкновенном СП;

- стыки сварные, которые при укладке стрелочных переводов в путь свариваются аллюминотермитным способом, после чего рабочая грань головки рельса шлифуется, а шейка и подошва остаются со сварным напылом;

- сердечник крестовины сварной и состоит из двух частей (передняя часть сердечника по противоположному движению длиной порядка 50 см выполнена из высокопрочной стали, которая защищена от коррозии, устойчива к выкрашиванию и постоян-

ным ударным нагрузкам);

- направляющие контррельсы имеют надвигаемую конструкцию с применением одноболтовых вкладышей (такая конструкция способствует поддержанию постоянной величины желобов за счет надвигки рабочей грани контррельса к рабочей грани приконтррельсового рельса).

Анализ особенностей конструкции показывает, что криволинейный стрелочный перевод является сварным, в связи с этим имеют место быть температурные колебания длины рельсов. При повышении температуры рельсовая сталь расширяется, при этом увеличивается длина рельсов, при охлаждении – уменьшается. В связи с этим может возникнуть неточность в работе переводного механизма и могут появиться колебания зазора между остряком и рамным рельсом. Для компенсации этого явления, а также нивелирования вибраций, вызванных динамикой движения подвижного состава, в устройство стрелки включен замыкающий кляммерный механизм Tempflex II.

Принцип работы кляммерного механизма заключается в замыкании поперечной стальной балки, которая связана с ходом остряков посредством кулисного механизма, и так называемого «ласточкиного хвоста», образуя при этом подвижное шлицевое соединение.

Переустройство путей, примыкающих к стрелочному переводу при его замене

На станции Негорелое, обслуживаемой Минской дистанцией пути, уложены три криволинейных СП производства «VAE». Каждый из них имеет свою оригинальную конструкцию, которая позволяет вписать эти СП в криволинейные участки I-го и II-го главных путей.

Участок электрифицированный, грузонапряженность по I-му и II-му главным путям соответственно 33,71 и 34,70 млн т·км брутто на км в год. Скорость движения пассажирских поездов – 140 км/ч, грузовых – 80 км/ч.

СП № 16 вписан в составную (двухрадиусную) кривую, у которой радиус первой круговой кривой

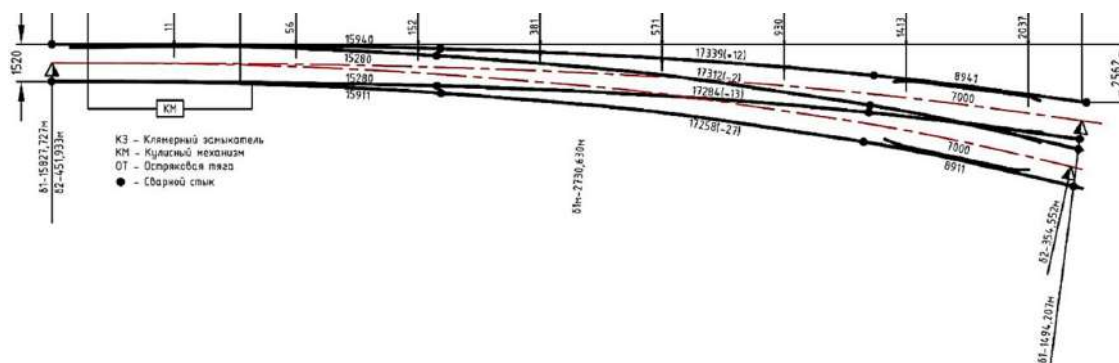


Рис. 1. Схема стрелочного перевода № 16 на станции Негорелое Минской дистанции пути
Fig. 1. Diagram of the switch number 16 at the Negoreloe station of the Minsk distance of the track

равен 995 м, второй – 865 м, соответственно у основного пути радиус меняется от 1 527,727 м до 14 994,207 м, у бокового – от 451,933 м до 354,552 м (рис. 1).

У СП № 2 (рис. 2) основной путь вписан частично в переходную кривую, а частично в прямой участок, при этом радиус меняется от 1 386,319 м до бесконечности. Боковой путь переходит из переходной кривой в круговую, с изменением радиуса от 348,102 м до 465,245 м.

Основной путь стрелочного перевода № 20 (рис. 3) до центра перевода вписан в прямой участок, а затем в переходную кривую, при этом радиус меняется от бесконечности до 3 768,240 м.

Боковой путь запроектирован переменной кривизны с изменением радиуса от 465,245 м до 530,913 м, при этом стрелочный перевод № 20 разносторонний.

Таким образом, анализируя только конструкцию, можно сделать вывод, что любые изменения в СП

«VAE» приведут к необходимости переустройства примыкающих к ним путей и рядом расположенных СП.

Замена криволинейного стрелочного перевода производства «VAE» одиночным обыкновенным

Одиночный обыкновенный СП самая простая конструкция из возможных пересечений путей, предполагающая устройство основного пути прямолинейным, а бокового – с переводной кривой с радиусом ($R_{\text{ПК}}$) равным радиусу криволинейного острька (R_0) и марке крестовины. Для марки 1/11 радиусы $R_{\text{ПК}}$ и R_0 равны 300 м.

СП № 16 является частью второго главного пути, к которому примыкает станционный путь № 4, проходящий через СП № 24. Расстояние (прямая вставка) от задних стыков крестовины СП № 16 до задних стыков крестовин СП № 24 составляет 23,0 м (рис. 4).

При замене криволинейного СП и укладке взамен

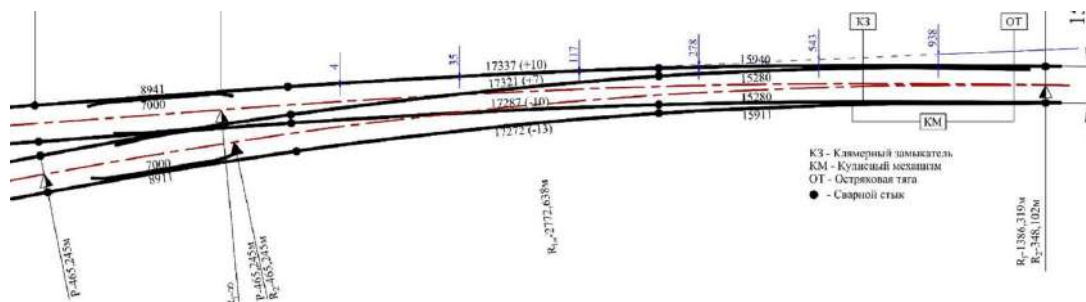


Рис. 2. Схема стрелочного перевода № 2 на станции Негорелое Минской дистанции пути
Fig. 2. Diagram of the switch number 2 at the Negoreloe station of the Minsk distance of the track

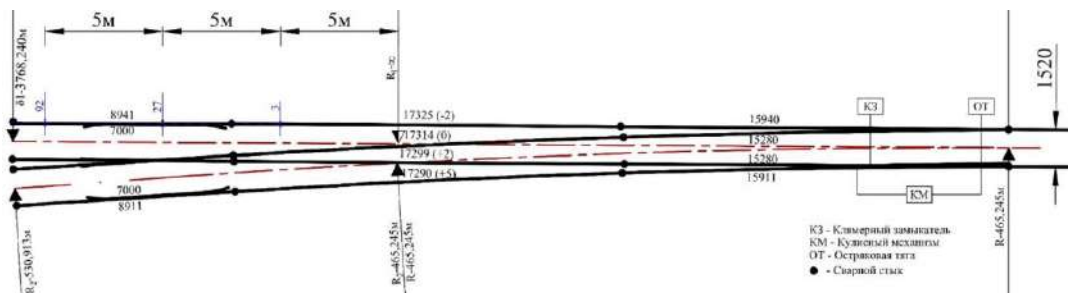


Рис. 3. Схема стрелочного перевода № 20 на станции Негорелое Минской дистанции пути
Fig. 3. Diagram of the switch number 20 at the Negoreloe station of the Minsk distance of the track

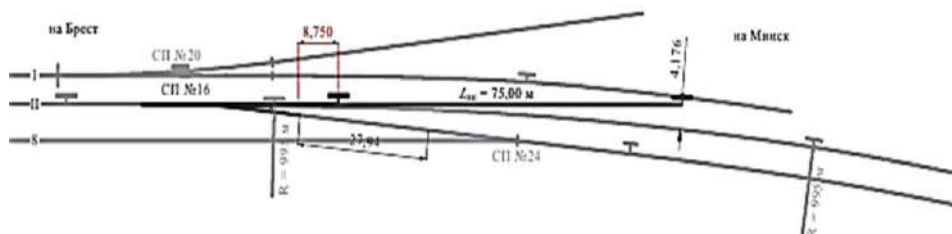


Рис. 4. Схема переустройства криволинейного участка II-го главного пути после укладки одиночного обыкновенного стрелочного перевода взамен криволинейного «VAE»
Fig. 4. Scheme of reconstruction of the curved section of the II-th main track after laying a single ordinary switch instead of a curved “VAE”

него одиночного обыкновенного, чтобы сохранить прямолинейное направление между СП № 16 и № 24, необходимо сместить положение нового СП № 16 на 7,34 м в сторону от СП № 24. При этом расстояние между задними стыками крестовин СП № 16 и 24 составит 27,94 м.

При таком варианте СП № 24 не будет менять своего положения и, следовательно, положение оси пути № 4 также не изменится. Но так как одиночный обыкновенный СП должен находиться в прямолинейном участке пути, то начало примыкающей к СП № 16 переходной кривой (НПК) необходимо перенести в направлении Минска. После чего точка НПК будет располагаться после брусев закрестовинного блока, длина которого составляет 8,75 м.

Примыкающая кривая II-го главного пути эксплуатируется с возвышением наружного рельса ($h_{нр}$), которое равно 75 мм. При изменении параметров этой кривой величину $h_{нр}$ уменьшить недопустимо, так как $h_{нр} = 75$ мм – минимальное условие обеспечения комфортабельности езды пассажиров [7–9]. Исходя из условия обеспечения минимальной крутизны отвода возвышения (1 мм на 1 м пути) длина переходной кривой ($l_{пк}$) должна составлять не менее 75 м [10].

Согласно схеме расположения путей, при устройстве переходной кривой в форме клотоиды при $l_{пк} = 75$ м величина ординаты (y) [10] в конце переходной кривой (КПК) до оси существующего пути (круговой кривой радиусом 995 м) составит 4,176 м (1):

$$y = \frac{x^3}{6l_{пк} \cdot R}, \quad (1)$$

где R – радиус кривой, м; $l_{пк}$ – длина переходной кривой, м; x – протяженность от точки НПК до расчетного сечения, м.

Исходя из зависимости y от $l_{пк}$ и R , имея величину y , возможно определить R , которым необходимо вписать кривую (2):

$$R = \frac{x^3}{6l_{пк} \cdot y}, \quad (2)$$

Величинам $y = 4,176$ м, $x = l_{пк} = 75$ м соответствует $R = 225$ м. Согласно правилам проектирова-

ния железнодорожных путей, устройство кривой радиусом 225 м недопустимо, поэтому необходимо определить минимально возможный радиус для устройства круговой кривой исходя из условия обеспечения требования не превышения величины непогашенного ускорения ($a_{нп}$) [10] (3):

$$a_{нп} = \frac{v_{\max}^2}{13 R} - 0,0061 \cdot h_{нр} \rightarrow R = \frac{v_{\max}^2}{13 (a_{нп} + 0,0061 h_{нр})}, \quad (3)$$

где $a_{нп}$ – величина непогашенного ускорения, допускаемое значение на БЖД $0,7$ м/с²; $h_{нр}$ – возвышение наружного рельса, мм; V_{\max}^2 – максимальная скорость движения поездов, км/ч.

При $a_{нп} = 0,7$ м/с², $V_{\max}^2 = 120$ км/ч, $h_{нр} = 75$ мм, соответственно $R = 957$ м (см. рис. 4).

Исходя из схемы переустройства (см. рис. 4), можно сделать вывод, что при вписывании кривой радиусом 957 м и переходной кривой длиной 75 м ось проектируемого второго главного пути абсолютно не совпадает с осью существующего пути. При этом совместить оси проектируемого и существующего пути не представляется возможным без больших смещений, в том числе и параллельно расположенных с ним станционных путей. Переустройство станционных путей необходимо для того, чтобы обеспечить их исходные направления и минимальную ширину междупутья [4, 7].

Криволинейный СП № 16 расположен на II-м главном пути и далее за ним, по направлению на Брест «стык в стык» обыкновенный СП № 8, боковой путь которого ведет к обыкновенному СП № 6. В свою очередь съезд, а именно СП № 6 лежит «стык в стык» с СП № 4, который образует с криволинейным СП № 2 съезд на II-й главный путь.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что замена криволинейного СП № 16 производства «VAE» на одиночный обыкновенный стрелочный перевод повлечет за собой существенные изменения в расположении как существующих стрелочных переводов, так и осей путей. Подробные работы, их объемы и затраты определяются проектом реконструкции горловины станции.

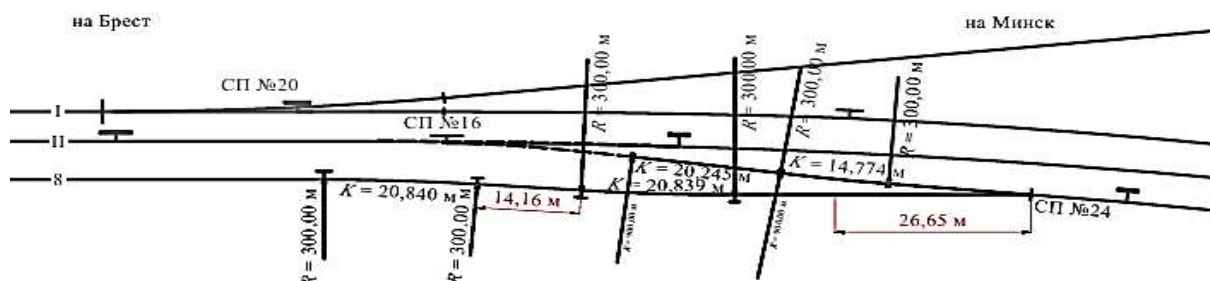


Рис. 5. Схема переустройства криволинейного участка II-го главного пути после укладки типового криволинейного стрелочного перевода взамен криволинейного «VAE»

Fig. 5. Diagram of the reconstruction of the curved section of the II-th main track after laying a standard curved switch instead of a curved “VAE”

Замена криволинейного стрелочного перевода производства «ВАЕ» типовым криволинейным односторонним

Новосибирский стрелочный завод – филиал ОАО «Российские железные дороги» [2, 9] предусматривает выпуск стрелочной продукции марки 1/11 с гибкими остряками для радиусов по основному и боковому путям соответственно:

- 600 м и 350 м на деревянных брусках;
- 900 м и 430 м на деревянных и железобетонных брусках;
- 600 м и 200 м на железобетонных брусках;
- 750 м и 390 м на железобетонных брусках.

Исходя из кривизны пути, в которую необходимо вписать типовой криволинейный стрелочный перевод, был выбран вариант согласно проекту 2851.00.000 (с гибкими остряками, с криволинейной крестовиной для радиуса кривой 900 м по основному пути и 430 м по боковому пути).

В этом случае при замене для минимизирования величины сдвижки II-го главного пути необходимо сместить положение нового СП № 16. Расчетная схема переустройства показывает, что максимальное совпадение кривизны основного пути СП № 16 и кривой II-го главного пути будет достигнуто при его смещении на 26,61 м в сторону СП № 24, и в свою очередь повлечет изменение положения самого СП № 24. При этом расстояние между задними стыками крестовин СП № 16 и № 24 составит 35,02 м.

При таком варианте переустройства СП № 24 изменит свое положение и, как следствие, положение оси пути № 4 (рис. 5).

При смещении СП № 24 изменится пикетажное положение его центра. Для того чтобы запроектировать путь № 4 с минимальными сдвигками было принято решение об устройстве S-образной кривой без прямой вставки. Данная кривая вписывается между задними стыками крестовин СП № 16 и № 24. Радиусы кривых составляют 900 м и 300 м, их длины соответственно 20,245 м и 14,774 м.

К СП № 24 (боковой путь) примыкает стационарный путь № 8, где также требуется устройство двух однорядных кривых разного направления длиной по 20,840 м с прямой вставкой между ними равной 14,16 м. Радиусы кривых – 300 м. Устройство таких кривых возможно без переходных кривых.

Кривизна пути обеспечивается величиной стрел изгиба (f), а ее правильность проверяется разностью стрел изгиба (Δf), которая в свою очередь зависит от установленных на участке скоростей движения поездов [10]. Превышение допустимой разности стрел изгиба ($[\Delta f]$) может вызвать снижение установленных скоростей, что не допустимо ни при каких условиях [11, 12]. Стрела изгиба зависит от R и определяется по формуле

$$f = a^2 / 8, \quad (4)$$

где a – длина хорды, между смежными точками промеров стрел изгиба, 20 м.

Исходя из формулы (4), на прямом участке, где $R = \infty \rightarrow f = 0$ мм.

Для однорядной кривой: на прямом участке $f = 0$, в кривой $R = 300$ м $\rightarrow f = 15$ мм, соответственно максимальная Δf составит 15 мм. Минимальная Δf , вызывающая ограничение скорости – 35 мм [10], т. е. $\Delta f = 15$ мм допускается при любых скоростях.

Таким образом, для S-образной кривой криволинейность устраивается следующим образом: боковой путь $R = 300$ м $\rightarrow f = 15$ мм, кривая радиусом $R = 900$ м $\rightarrow f = 45$ мм, кривая радиусом $R = 300,0$ м $\rightarrow f = 15$ мм, прямой путь стрелочного перевода $\rightarrow f = 0$. При этом максимальная разница стрел изгиба составит 30 мм, что допускает движения грузовых поездов со скоростью 61–80 км/ч. Таким образом, устройство S-образной кривой не снижает скоростной режим [13].

Исходя из нормативов, подобные кривые допускается устраивать без возвышения наружного рельса, причем устройство кривых с $R = 300$ м допускается только на деревянных шпалах.

На основании расчетов и итогов графоаналитического исследования оценки переустройства определено (см. рис. 6–8), что при смещении оси II-го главного пути на участке вписывания типового криволинейного СП, его максимальная сдвижка составляет 0,386 м. На участке устройства бокового пути типового криволинейного стрелочного перевода и примыкающей к нему S-образной кривой, максимальная величина сдвижки – 1,408 м. При смещении СП № 24 на новое положение и устройстве двух однорядных кривых с прямой вставкой между ними максимальная величина сдвижки участка 8-го пути составит 2,630 м [14].

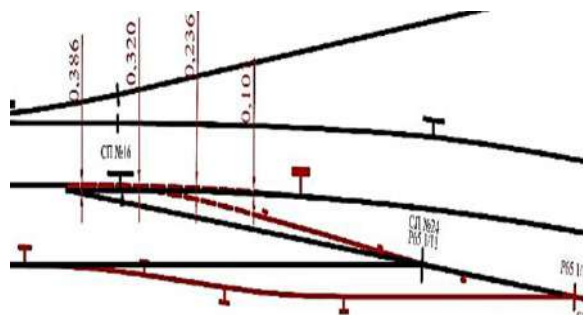


Рис. 6. Схема определения величины смещения II-го главного пути при переустройстве стрелочного перевода № 16

Fig. 6. Scheme for determining the value of the displacement of the II-th main track during the reconstruction of switch No. 16

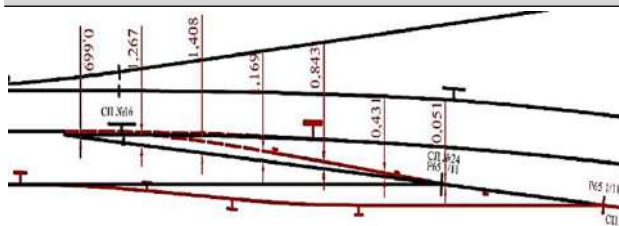


Рис. 7. Схема определения величины смещения боковых путей стрелочных переводов № 16 и № 24
Fig. 7. Scheme for determining the displacement of the side tracks of switch No. 16 and No. 24

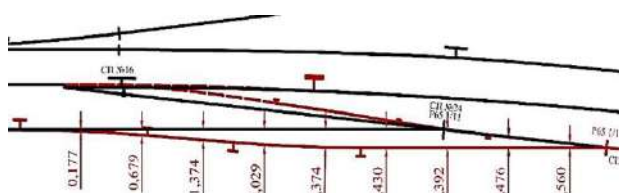


Рис. 8. Схема определения величины смещения 8-го станционного пути
Fig. 8. Scheme for determining the value of the offset 8th station track

Исходя из схемы (см. рис. 4), можно сделать вывод, что при вписывании типового криволинейного СП необходимо изменить положение СП № 16 и № 24, при этом обеспечить устройство S-образной кривой и двух однорядных кривых разного направления с прямой вставкой между ними [15, 16].

Подобное переустройство кривых влечет за собой значительные сдвиги оси участка II-го главного пути, оси участка пути № 8 и оси участка пути № 4. В связи с тем, что рассматриваемый участок электрифицирован, подобные сдвиги без переустановки опор контактной сети не представляются

возможными. Кроме того, участок пути где планируется устройство кривых радиусом 300 м необходимо уложить на деревянные шпалы.

Можно сделать вывод, что замена криволинейного СП № 16 производства «VAE» на типовой криволинейный СП повлечет за собой существенные изменения месторасположения как существующих СП, так и осей путей. Подобные работы определяются проектом реконструкции горловины станции [4, 7, 8].

Заключение

Исходя из того, что СП производства «VAE» зарекомендовали в эксплуатации себя с положительной стороны, при этом обеспечивают высокие скорости движения поездов без дополнительных динамических воздействий, которые неотъемлемо бы возникли при изменении кривизны с радиуса криволинейного пути на радиус переходной кривой, устройстве прямых вставок при переходе с одного радиуса на другой и т. п. Таким образом, любая замена СП «VAE» на типовой ухудшит показатели плавности [17, 18].

Ввиду необходимости принятия решений об укладке типовых СП (отказ «VAE» от сертификации продукции), переустройство примыкающих к ним путей и СП необходимо минимизировать.

Исследования показали, что даже минимальные объемы работ требуют значительных трудовых и материальных затрат. Очевидно, что переукладка на обыкновенные СП вызовет большие объемы работ по сравнению с заменой на типовые криволинейные.

Типового решения для всех СП производства «VAE» определить невозможно, в каждом конкретном случае необходимо составление индивидуальных проектов.

Список литературы

1. Технический регламент Таможенного союза 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта»: утв. решением комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710.
2. Каталог-справочник стрелочной продукции для железных дорог. Новосибирск : Новосибирский стрелочный завод, 2007. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293806/4293806254.pdf/> (дата обращения: 01.09.2020).
3. Новакович В.И. Конструкции верхнего строения пути, обеспечивающие повышенную безопасность движения // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 11. С. 20–22.
4. Гришан А.А. Плавность хода поездов и комфорт пассажиров на участках скоростного и высокоскоростного движения // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 9. С. 2–3.
5. Глюзберг Б.Э. Модернизация и совершенствование стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 54–57.
6. Испытательный центр взаимодействия экипажа и пути железных дорог // ИЦ ВЭИП : сайт. URL: <http://www.ic-veip.ru/work/vae/> (дата обращения: 01.09.2020).
7. Глюзберг Б.Э. Параметры, обеспечивающие плавность проезда подвижного состава по стрелочным переводам // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2012. Т. 5, № 5 (5). С. 41–45.
8. Патласов А.М., Токарев С.А., Патласов Е.А. Установление допустимых скоростей движения поездов по криволинейным стрелочным переводам // Наука и прогресс транспорта. 2016. № 2 (62). С. 98–108.
9. Глюзберг Б.Э. Стрелочные переводы для строящихся высокоскоростных линий // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. М. : МГУПС, 2017. С. 137–138.

10. СТП 09150.56.010-2005 Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ : утв. приказом начальника Белорус. ж.-д. от 29.06.2006 № 221Н. Минск, 2006. 284 с.

11. Влияние геометрических параметров железнодорожного пути на величину эквивалентной коничности колесной пары / А.А. Киселев и др. // Изв. Петербур. ун-та путей сообщения. 2019. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-geometricheskikh-parametrov-zheleznodorozhnogo-puti-na-velichinu-ekvivalentnoy-konichnosti-kolesnoy-pary> (дата обращения: 24.02.2021).

12. Правила технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь : утв. постановлением Министерства трансп. и коммуникаций Республики Беларусь 25.11.2015 № 52. Введ. 01.06.16. Минск : Министерство транспорта и коммуникаций, 2016. 351 с.

13. Бринь М.Я., Канашин Н.В., Полетаев В.И. Расчет элементов и разбивка железнодорожных кривых : учеб. пособие. СПб. : Петерб. гос. ун-т путей сообщ., 2008. 36 с.

14. Довгелюк Н.В., Ахраменко Г.В., Вербилло В.А. Реконструкция железных дорог: учеб. пособие. Гомель : БелГУТ, 2017. 339 с.

15. Турбин И.В. Подбор параметров проектной кривой в декартовой системе координат : учеб. пособие. М., 2003. 32 с.

16. Патласов А.М. Укладка стрелочных переводов на железобетонных брусках в кривых участках пути // Вестн. Белорус. гос. ун-та трансп.: Наука и транспорт. 2002. № 2 (5). С. 25–28.

17. Казначеев Е.А. Плавность хода поездов в кривых малых радиусов // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 7. С. 10–12.

18. Причины нарушения плавности хода поездов / А.В. Романов и др. // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 7. С. 29–31.

References

1. Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza 003/2011 «O bezopasnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta». Komissiya tamozhennogo soveta, 2011. 50 s. [Technical regulation of the Customs Union 003/2011. On the safety of railway transport infrastructure, Customs Council Commission, 2011. 50 p.].

2. Novosibirskii strelochnyi zavod. Katalog-spravochnik strelochnoi produktsii dlya zheleznykh dorog [Novosibirskii strelochnyi zavod. Katalog-spravochnik strelochnoi produktsii dlya zheleznykh dorog] [Electronic media]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293806/4293806254.pdf/> (Accessed: September 1, 2020).

3. Novakovich V.I. Konstruktsii verkhnego stroeniya puti, obespechivayushchie povyshennuyu bezopasnost' dvizheniya [Designs of the track superstructure that provide increased traffic safety]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2019. No.11. Pp. 20–22.

4. Grishan A.A. Plavnost' khoda poezdov i komfort passazhirov na uchastkakh skorostnogo i vysokoskorostnogo dvizheniya [Smooth running of trains and comfort of passengers on sections with fast and high-speed traffic]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2019. No. 9. Pp. 2–3.

5. Glyuzberg B.E. Modernizatsiya i sovershenstvovanie strelochnykh perevodov [Modernization and improvement of switches]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2015. No. 7. Pp. 54–57.

6. Ispytatel'nyi tsentr vzaimodeistviya ekipazha i puti zheleznykh dorog [The testing center of the vehicle and railway track interaction] [Electronic media]. URL: <http://www.ic-veip.ru/work/vae/> (Accessed: September 1, 2020).

7. Glyuzberg B.E. Parametry, obespechivayushchie plavnost' proezda podvuzhnogo sostava po strelochnym perevodam [Parameters that ensure smooth passage of rolling stock on switches]. *Vnedrenie sovremennykh konstruktsii i peredovykh tekhnologii v putevoe khozyaistvo* [Introduction of modern structures and advanced technologies in track facilities], 2012, vol. 5. No. 5. Pp. 41–45.

8. Patlasov A.M., Tokarev S.A., Patlasov E.A. Ustanovlenie dopustimyykh skorostei dvizheniya poezdov po krivolineinym strelochnym perevodam [Establishment of permissible train speeds on curved switches]. *Nauka i progress transporta* [Science and transport progress], 2016. No. 2 (62). Pp. 98–108.

9. Glyuzberg B.E. Strelochnye perevody dlya stroyashchikhsya vysokoskorostnykh linii [Switches for high-speed lines under construction]. *Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti. Trudy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Chteniya, posvyashchennye pamyati professora G.M. Shakhunyantsa* [Modern problems of railway track design, construction and operation. Proceedings of the XIV International scientific and technical conference. Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhunyants]. Moscow, 2017. Pp. 137–138.

10. СТП 09150.56.010-2005. Tekushchee soderzhanie zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie trebovaniya i organizatsiya rabot : utv. prikazom nachal'nika Bel. zh. d. ot 29.06.2006 No. 221N. [Standard of organization 09150.56.010-2005. Current maintenance of the railway track. Technical requirements and organization of work: approved by the order of the head of Bel. railway from June 29, 2006]. Minsk, 2006. 284 p.

11. Kiselev A.A., Blazhko L.S., Gaponenko A.S., Romanov A.V. Vliyanie geometricheskikh parametrov zheleznodorozhnogo puti na velichinu ekvivalentnoi konichnosti kolosnoi pary [Influence of the geometrical parameters of the railway track on the value of the equivalent taper of the wheelset]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [News of the St. Petersburg University of Railway Transport], St. Petersburg, 2019. No. 2 [Electronic media]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-geometricheskikh-parametrov-zheleznodorozhnogo-puti-na-velichinu-ekvivalentnoy-konichnosti-kolesnoy-pary> (Accessed: February 24, 2021).

12. Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznoi dorogi v Respublike Belarus' : utv. postanovleniem Ministerstva transporta i kommunikatsii Respubliki Belarus' 25.11.2015 No. 52. Vved. 01.06.16. [Instructions for the technical operation of the railway in the Republic of Belarus November 25, 2015. No. 52. Intr. June 01, 2016]. Minsk, Ministerstvo transporta i kommunikatsii Publ., 2016. 351 p.

13. Brin' M.Ya., Kanashin N.V., Poletaev V.I. Raschet elementov i razbivka zheleznodorozhnykh krivykh Raschet elementov i razbivka zheleznodorozhnykh krivykh : ucheb. posobie [The calculation of the elements and laying out railway curves]. St.Peterburg state transport un-ty Publ. 2008, 36 p.

14. Dovgelyuk N.V., Akhramenko G.V., Verbilo V.A. Rekonstruktsiya zheleznykh dorog [The reconstruction of Railways]. Gomel', 2017. 339 p.
15. Turbin I.V. Podbor parametrov proektnoi krivoi v dekartovoi sisteme koordinat : ucheb. posobie [The selection of the parameters of the design curve in a Cartesian coordinate system: a study guide]. Moscow, 2003. 32 p.
16. Patlasov A.M. Ukladka strelochnykh perevodov na zhelezobetonnykh brus'yakh v krivykh uchastkakh puti [Laying switches on reinforced concrete beams in curved sections of the track]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport [Bulletin of BSUT: science and transport]*, 2002. Pp. 25–28 [Electronic media]. URL: <https://www.bsut.by/en/science-eng/scientific-publications/vestnik-en>
17. Kaznacheev E.A. Plavnost' khoda poezdov v krivykh mal'nykh radiusov [Smooth running of trains in curves of small radii]. *Put' i putevoe khozyaistvo [Track and track facilities]*, 2018. No. 7. Pp. 10–12.
18. Romanov A.V. Prichiny narusheniya plavnosti khoda poezdov [The reasons for the violation of the smooth running of trains]. *Put' i putevoe khozyaistvo [Track and track facilities]*, 2020. No. 7. Pp. 29–31.

Информация об авторах

Романенко Виктория Владимировна – старший преподаватель кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь, e-mail: vromanenko@mail.ru

Information about the authors

Viktoriya V. Romanenko – Senior Lecturer of the Subdepartment of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, The Belarusian State University of Transport, Gomel, the Republic of Belarus, e-mail: vromanenko@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).135-141

УДК 656.2

Оптимизация работы грузового железнодорожного транспорта с использованием смешанно-целочисленной нелинейной модели

О. А. Лебедева✉

Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

✉ kravhome@mail.ru

Резюме

В статье рассматривается смешанно-целочисленная модель, позволяющая решать задачи маршрутизации относительно железнодорожной сети. В качестве исходных данных используется транспортная железнодорожная сеть с постоянными маршрутами пассажирских и грузовых поездов, в каждом из которых приведена пара станций – отправления и назначения. Цель исследования – поиск всех возможных вариантов составления путей объезда при минимизации времени движения и оптимизации всего транспортного цикла. Ранее исследование в этой области проводилось относительно микроскопических железнодорожных коридорами. В нашем исследовании рассмотрим задачу маршрутизации железнодорожной сети в макроскопической транспортной сети. Под такой сетью понимается объединение сложных транспортных структур в более простые сети. Время отправления и прибытия принимается равным заданному интервалу. Можно отнести задачи такого плана к стратегическим, так как решение требует грубой маршрутизации при применении смешанно-целочисленного нелинейного программирования. Модель товарного потока представляется в виде графа с дополнительными ограничениями. Нелинейность модели обусловлена аппроксимацией задержек железнодорожных составов на дугах сети и функциями ограничения пропускной способности. Решение задачи сводится к смешанной целочисленной линейной модели минимизации времени.

Ключевые слова

транспорт, железнодорожные перевозки, пропускная способность, многотоварные потоки, программирование

Для цитирования

Лебедева О.А. Оптимизация работы грузового железнодорожного транспорта с использованием смешанно-целочисленной нелинейной модели / О.А. Лебедева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 135–141. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).135-141

Информация о статье

поступила в редакцию: 22.01.2021, поступила после рецензирования: 13.02.2021, принята к публикации: 17.02.2021

Optimization of the operation of freight rail transport using a mixed-integer nonlinear model

O. A. Lebedeva✉

Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉ kravhome@mail.ru

Abstract

The article discusses a mixed-integer model that allows solving routing problems relative to the railway network. As the initial data, a transport railway network with permanent routes of passenger and freight trains is used, each of which contains a pair of stations: those of departure and destination. The purpose of the study is to search for all possible options for drawing up bypass routes, while minimizing travel time and optimizing the entire transport cycle. Previously, research in this area was carried out with reference to microscopic rail routes at large stations. Recent developments are aimed at experimenting with larger transport corridors. In our study, we will consider the problem of routing a railroad network in a macroscopic transport network. Such a network is understood as the integration of complex transport structures into simpler networks. Departure and arrival times are assumed to be equal to the specified interval. It is possible to classify problems of this kind as strategic, since their solution requires rough routing when using mixed-integer nonlinear programming. The product flow model is presented as a graph with additional restrictions. The nonlinearity of the model is conditioned by the approximation of train delays on the arcs of the network and through capacity limiting functions. The solution to the problem is reduced to a mixed integer linear time minimization model.

Keywords

transport, rail transportation, throughput capacity, multi-commodity flows, programming

For citation

Lebedeva O. A. Optimizatsiya raboty gruzovogo zheleznodorozhnogo transporta s ispol'zovaniem smeshanno-tselochislennoi nelineinoy modeli [Optimization of the operation of freight rail transport using a mixed-integer nonlinear model]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.135–141.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).135-141

Article info

Received: 22.01.2021, Revised: 13.02.2021, Accepted: 17.02.2021

Введение

В практике железнодорожных перевозок за последние десятилетия отмечается увеличение объема перевозок, но развитие соответствующей инфраструктуры не успевает за такими темпами, поскольку ее обновление всегда является дорогостоящим и долгосрочным проектом. Для максимального использования инфраструктуры необходимо определить узкие места в сети. Одна из важных частей исследования – поиск маршрутов, неудовлетворяющих потребности в перевозках. Следовательно, для оптимизации транспортной сети необходимо провести анализ с целью получения реальной оценки и распределения имеющейся емкости [1–5]. Основная цель – опреде-

ление маршрутов грузовых поездов с учетом железнодорожной инфраструктуры и уже запланированного и неизменного пассажирского движения.

Исследования методов решения транспортных задач

Маршрутизация пассажирских и грузовых перевозок имеет важные отличия, которые необходимо учитывать при моделировании транспортной сети. Одним из главных являются интервалы времени отправления и прибытия, которые в грузовых перевозках задаются не строго, и отсутствие ограничений на промежуточных станциях. Однако необходимо понимать, что грузовые и пассажирские перевозки используют одну и ту

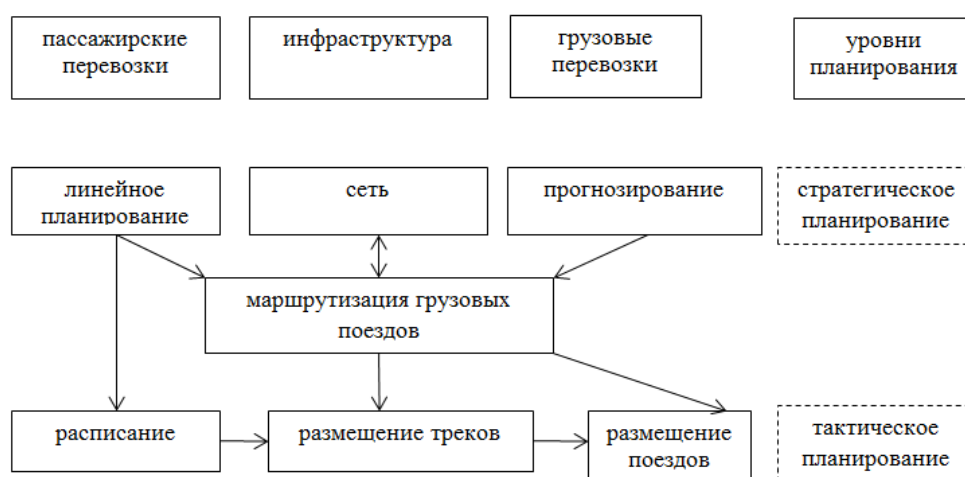


Рис. 1. Модель маршрутизации грузовых перевозок в железнодорожной системе
Fig.1. A model for routing freight traffic in the railway system

же инфраструктуру, и железнодорожный транспорт принято рассматривать в целом для обеспечения стратегического планирования и моделирования в реальном режиме времени (рис. 1).

Пути движения грузовых поездов в железнодорожной сети должны быть запланированы и интегрированы в годовое расписание. Множество исследований посвящено составлению расписания или распределению путей, которые, в частности, предполагают маршруты грузовых поездов в качестве входных данных [6–9]. Известны различные подходы к решению задач: G. Cairni представляет подход управления железнодорожной сетью с использованием априорной декомпозиции в различных зонах [10]; T. Schlechte предлагает определение макроскопической модели железной дороги на основе микроскопического моделирования [11]. Крупнейшая железнодорожная компания Германии «Deutsche Bahn» предлагает два варианта транспортировки в случае крупных отправок по железнодорожной сети. Первый вариант – это отправка железнодорожным поездом от 20 до 40 вагонов. В этом случае перевозчик может тянуть такой составной поезд локомотивом из пункта отправления в пункт назначения. Это предложение о прямых грузовых перевозках с фиксированным составом поездов. Альтернативный вариант, когда происходит отправка грузов мелкими партиями в отдельных автомобилях. В таком варианте отправка на отдельном локомотиве по сети не целесообразна, эффективнее осуществить перевозку только до сортировочной станции. Далее происходит группировка с вагонами других клиентов, а затем по мере прибытия (отправления) поездов на следующую сортировочную станцию. Поезда разбирают, а машины снова группируются, пока каждая не достигнет своего конечного пункта назначения. Это второй вариант грузовых отправок. Такие задачи требуют проектирования сети, то есть расположения сортировочных станций и вариантов отправок между ними. Результаты объединения более мелких отправок в один вагон на практике показывают положительный эффект.

Оптимизации работы железной дороги сформулирована как крупномасштабная, многопрофильная задача проектирования потоковой сети и маршрутизации с огромным числом переменных решений [12, 13]. R.K. Ahuja предложен алгоритм, использующий крупномасштабный поиск для железнодорожной отрасли [14]. Авторы в своих исследованиях доказывают применимость такого подхода для поиска оптимального решения. E. Köhler представляет математическую теорию зависимых от потока функций затрат [15]. Основное отличие заключается в том, что в дорожном движении маршрутизация децентрализована, а в железнодорожных системах централизована. Поток поездов нельзя разделить произвольно, следовательно, маршрут и расписание являются более жесткой системой по сравнению с потоком вагонов.

Рассмотрим стратегическую задачу маршрутизации в макроскопической транспортной сети. Макроскопическими называются сложные структуры, разделенные на системы с меньшим количеством элементов, с заданным временем отправления (прибытия). Задача имеет стратегический характер, поскольку в ней учитываются интервалы движения, а не точное время, т. е. входные данные – грубые оценки. Для эффективной работы железнодорожной транспортной сети рассмотрим метод нелинейной оптимизации с двумя возможными вариантами направления поездов из узла U в узел V (рис. 2). Если путь через X короче пути через Y, то линейные модели будут стремиться направлять все поезда от U к V по кратчайшему пути до тех пор, пока пропускная способность не нарушится. Оптимальное решение показано в виде жирной линии (рис. 2, б).

Оптимизационная модель, использующая нелинейную целевую функцию, приводит к сбалансированному решению (рис. 2, в). Основным достоинством такой модели является автоматическое определение путей проезда не удовлетворяющих условиям пропускной способности и предложение вариантов проектирования железнодорожной сети. Рассмотрим функции ограничения емкости.

Моделирование пропускной способности железной дороги технически сложная задача, поэтому прогнозирование загруженности и времени ожидания являются актуальным направлением исследований. Время ожидания практически не учитывается во время процедуры обработки емкости инфраструктуры. При достижении предела пропускной способности происходит перегрузка сети, которая обусловлена временными задержками, соответственно средняя задержка каждого поезда также начинает возрастать.

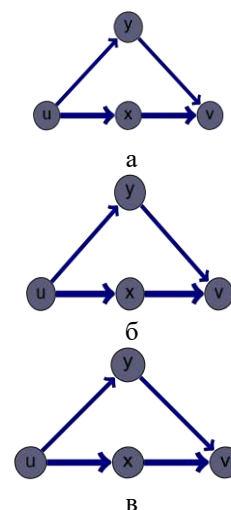


Рис. 2. Возможные варианты направления железнодорожных потоков
Fig. 2. Possible options for the direction of railway flows

Моделирование количества поездов, проходящих через дугу, заключается во введении функции ограничения пропускной способности (CR), которая устанавливает предел средней задержки. Исследованиями в этой области занимались Irwin, Wohl, описывая с ее использованием характеристики поездки или времени в пути [16, 17]. J. Lieberherr и E. Pritscher предложили использовать CR-функции в железнодорожном пассажирском транспорте [18]. Рассмотрим применение функции в грузовом железнодорожном транспорте. Загрузка или задержка в таком случае определяется как

$$\tau \left(1 + a \left(\frac{n}{k \cdot \gamma} \right)^\beta \right) * \alpha, \beta \in [0, \infty[\quad \gamma \in]0, \infty[, \quad (1)$$

где время работы τ и вместимость k зависят от маршрута; α, β, γ – параметры для CR-функции; α – время работы поезда при достижении предельной пропускной способности. Выбираем $\alpha = 1$, необходимость оплатить время движения поезда, если произойдет полная загрузка подвижного состава, γ – резервная емкость. Поскольку не предоставляем возможность выбора емкости, то $\gamma = 1$.

Упростим CR-функцию:

$$\tau \left(1 + \frac{n}{k} \right)^\beta. \quad (2)$$

Контролирует скорость наложения штрафа – β . Время выполнения заявки уже указано в целевой функции, поэтому в качестве стоимости времени ожидания берется только время свыше планового. Функция применяется для оценки загруженности на каждом пути следования:

$$f(n) = \tau \left(\frac{n}{k} \right)^\beta. \quad (3)$$

В общем виде транспортная сеть представлена в виде ориентированного графа $GI = (VI, AI)$. Узел $V \in VI$ представляет собой станцию (объект) инфраструктуры, где берут начало или завершаются маршруты железнодорожного транспорта. Между узлами существует направленная дуга, если они соединены железнодорожным полотном.

Предположим равный спрос, разделенный на временные отрезки, расположенные в циклическом порядке, в конце дня – последний срез, в начале следующего дня – первый срез. Обозначим набор временных интервалов – S ; Is – временный интервал; $k_a, a \in AI$, – значение пропускной способности, которое описывает приблизительное количество поездов, которые могут использовать этот путь в течение суток; набор стандартных типов поездов с характеристиками – τ ; la – длина дуги; $\tau_{t,a}$, – время движения поезда типа $t \in \tau$ (поезда подразделяются на набор стандартных типов поездов T с особыми характеристиками, зависящими от пути и динамики движения). Для каждой дуги $a \in AI$, la обозначает длину дуги, a ; спрос на грузовые поезда – R . Поезд $r \in R$ связан со станцией отправления, станцией назначения, временным интервалом отправления и

типом поезда tr . Срез времени прибытия не ограничен. Время выполнения поездки и длина маршрута ограничиваются значением кратчайшего пути, обозначаемого как Δ_{time}^r и Δ_{dist}^r , соответственно. Пассажиропотоки выражаются количеством поездов за временной интервал.

Полагается, что поезд, проходящий в каждом узле графа, осуществляет выбор дальнейшего пути, т. е. резкие углы поворота либо запрещены, либо требуют дополнительной платы. Поскольку в модели заложено дополнительное ограничение на поток, которое сложно сформулировать на двойном графе, при решении необходимо придерживаться исходного варианта.

Предполагается, что даны два непересекающихся множества. Первый набор TF состоит из троек узлов (u, v, w) с $(u, v), (v, w) \in AI$, таких, что последовательность узлов u, v, w запрещена для всех поездов. В общем случае тройка (u, v, u) для $(u, v) \in AI$ принадлежит набору, так как не разрешается покидать станцию в том направлении, с которого она прибыла. Второй набор TR состоит из тройки узлов (u, v, w) с $(u, v), (v, w) \in AI$, такой, что поворот от (u, v) к (v, w) в v происходит с дополнительными затратами $C_{u,v,w}$ в целевой функции. В некоторых случаях тройка (u, v, u) для $(u, v) \in AI$ принадлежит набору, если есть возможность перебросить локомотив с одного конца поезда на другой. В этом случае поезд может изменить направление и покинуть станцию v в том же направлении, откуда он прибыл.

Обозначим через $\deg(v)$ сумму всех дуг, входящих или выходящих из узла v . Строится расширение графа $GI = (VI, AI)$, которое способно обрабатывать ограничения поворота. Для каждого узла $v \in GI$ введем $2 \deg(v)$ множества. Обозначим их через vw, w и vw, v для каждого $(v, w), (w, v) \in AI$. Введем дугу (vu, v, vw, w) между двумя новыми узлами, когда $(u, v, w) \notin TF$. Это дополнительные дуги с нулевой длиной и временем работы $C_{u,v,w}$ когда TR содержит (u, v, w) . Каждая дуга $a = (u, v) \in AI$ превращается в (uu, v, vu, v) в развернутом графике и имеет те же свойства, что и соответствующая дуга в GI . Построенный таким образом граф обозначается $Gx = (VX, AX)$.

Для стратегического планирования необходима информация о фактическом расписании поездов, использующих общий элемент сети и идущих в одном временном интервале. Поэтому для каждого пути определяются функция стоимости заторов $fa: 2R \rightarrow IR^+$, которая зависит от состава поездов, использующих соответствующий путь. Это измеряет ожидаемую задержку. Основная часть этой функции – CR-функция, остальные части – время работы и длина.

Определенные маршруты должны минимизировать сумму всех ожидаемых задержек, а также время и длину выполнения. Ограничения вместимости дуг неявно обрабатываются функцией перегрузки, то есть

потенциальные конфликты поездов, использующих один и тот же элемент инфраструктуры, приводят к большим значениям перегрузки. Минимизируя сумму задержек, увеличиваем вероятность бесперебойной дороги железнодорожной инфраструктуры.

Смешанно-целочисленная нелинейная модель грузовых перевозок

Для моделирования задачи строится расширенный граф G срезов времени. Для каждого узла $v \in V_x$ и для каждой дуги $a \in A_x$ существует временной интервал $s \in S$ в G . Расширенный по времени граф G содержит $|S|$ варианты графа G_x и дополнительные дуги перехода vs_1, vs_2, \dots, vs_k и $k = |S|$, а дуги (vs_i, vs_{i+1}) для $i = 1, \dots, k-1$ и (vs_k, vs_1) представляют переход от одного временного интервала к другому в v . Узлы и дуги графа во временном интервале G обозначаются через V и A . Длина и время работы непереходных дуг берутся из G_x . Дуги перехода имеют нулевую длину и время работы, определяющиеся как промежуток времени, с которого начинается дуга. Обозначим заданное количество пассажирских поездов, пересекающих дугу a – κ_a , $a \in A_x$ по временным квантам в зависимости от длин временных интервалов. Для каждого запроса $o(r) \in V$ – узел отправления в расширенном графе. Так как время прибытия не ограничено, то существует целевой узел для каждого временного интервала. Набор узлов назначения обозначается D_r .

На основе такого графа, возможно моделирование дуг для различных вариантов отправления. Для этого применяют двоичную переменную x_a^r для каждой дуги $a \in A$ и каждого $r \in R$. Переменная равна 1, когда поезд r использует дугу a , в противном случае переменная равна 0.

Пусть $x \in \{0, 1\}$, A, R – вектор переменных. Целевая функция содержит общую стоимость нелинейных перевозок для каждого пути, а также сумму времени и длины всех пробегов. Стоимость каждой операции – λ_{wait} , $\lambda_{running}$, λ_{length} ; τ_a – среднее время работы на дуге по всем типам поездов:

$$\min \lambda_{wait} \sum_{v \in A} \tau_a \left(\frac{\sum_{r \in R} x_a^r}{\kappa_a} \right)^\beta + \lambda_{time} \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_a^r \tau_{t,a} + \lambda_{length} \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_a^r l_a. \quad (4)$$

В узлах учитывается требование, относительно сохранения потока:

$$\sum_{a \in \delta^+(v)} x_a^r - \sum_{a \in \delta^-(v)} x_a^r = 0 \quad \forall r \in R \quad \forall v \in V \setminus (o(r) \cup D(r)). \quad (5)$$

Список литературы

1. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Моделирование грузовых перевозок в транспортной сети // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2016. № 10. С. 182–184.
2. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Развитие городских грузовых систем с учетом концепции городского планирования // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 244–247.
3. Лебедева О.А. Применение интеллектуальных транспортных систем в области управления грузовыми перевозками // В сборнике: Развитие теории и практики автомобильных перевозок, транспортной логистики. сборник научных трудов кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» в рамках Международной научно-практической конференции. Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ). 2016. С. 102–107.

Общие ограничения потока для каждого поезда, относительно начала координат:

$$\sum_{a \in \delta^+(o(r))} x_a^r = 1 \quad \forall r \in R. \quad (6)$$

Приток должен быть на одном из узлов назначения в расширенном по времени графе:

$$\sum_{v \in D_r} \sum_{a \in \delta^-(v)} x_a^r = 1 \quad \forall r \in R. \quad (7)$$

Поезд должен перейти на следующий временной интервал, если время работы больше, чем временной интервал:

$$\sum_{a \in A(s)} \tau_{t,a} x_a^r \leq \tau_s^{len} \quad \forall s \in S, \forall r \in R. \quad (8)$$

Ограничение на длину и время работы:

$$\sum_{a \in A} l_a x_a^r \leq \Delta_{dist}^r \quad \forall r \in R \quad (9)$$

$$\sum_{a \in A} \tau_{t,a} x_a^r \leq \Delta_{time}^r \quad \forall r \in R$$

$$x_a^r \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A \quad \forall r \in R. \quad (10)$$

Заключение

Для решения задачи маршрутизации грузовых перевозок необходима предварительная обработка сети для каждого поезда и нахождение дуг и узлов, которые не являются частью возможного решения.

Очевидно, что все входящие дуги исходного узла и все исходящие дуги конечных узлов можно игнорировать. Основная часть предварительной обработки состоит в сокращении сети поезда до подмножества дуг и узлов, которые являются элементами пути от исходной точки до одного из пунктов назначения, и соблюдают ограничения по длине и времени работы. Для того чтобы найти соответствующие подмножества дуг и узлов строится одно дерево кратчайших путей из исходной точки и другое из конечного узла. Затем для каждого узла проверяется, меньше ли расстояние от исходного до конечного узла относительно ограничения длины. Если расстояние меньше ограничения, то узел может быть решением, в противном случае – не может быть с учетом ограничения на длину пути. То же самое делается с ограничением времени работы. Определив для каждого поезда соответствующее подмножество дуг, получим значительное сокращение переменных потока.

В результате, можно сделать вывод, что задачи маршрутизации железнодорожных путей сообщения возможно решить методами нелинейного программирования. Это позволяет значительно сокращать трудоемкость расчетов и предоставляет возможность использовать решение для транспортного планирования работы сети в целом.

4. Лебедева О.А., Полтавская Ю.О., Гаммаева З.Н., Кондратенко Т.В. Транспортная инфраструктура как основополагающий фактор эффективного функционирования экономики страны // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2018. Т. 1. № 15. С. 125–130.
5. Полтавская Ю.О. Оптимизация транспортной сети на основе минимума общих затрат на доставку грузов // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 178–183.
6. Полтавская Ю.О. Методы сбора данных о продолжительности движения на маршруте и требования к объему выборки // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2018. № 12. С. 192–195.
7. Михайлов А.Ю., Копылова Т.А. Система критериев оценки транспортно-пересадочных узлов // Вестник ИрГТУ. 2015. № 7 (102). С. 168–174.
8. Гозбенко В.Е. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажиро- и грузопотоков / В.Е. Гозбенко, А.Н. Иванков, М.Н. Колесник, А.С. Пашкова. депонированная рукопись № 330-В2008 17.04.2008.
9. Гозбенко В.Е., Крипак М.Н., Иванков А.Н. Совершенствование транспортно-экспедиционного обслуживания грузовладельцев. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2011. 176 с.
10. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. Pp. 427–433.
11. Caimi G. Algorithmic decision support for train scheduling in a large and highly utilised railway network. PhD thesis, ETH Zurich. 2009.
12. Schlechte T., Borndörfer R., Erol B., Graffagnino T., Swarat E. Micro-macro transformation of railway networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2011.
13. Jha K.C., Ahuja R.K., Şahin G. New approaches for solving the block-to-train assignment problem. *Networks*, 2008. Vol. 51. No. 1. Pp. 48–62.
14. Barnhart C., Jin H., Vance P. H. Railroad blocking: A network design application. *Oper. Res.*, 2000. Vol. 48. No. 4. Pp. 603–614.
15. Ahuja R.K., Jha K.C., Liu J. Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*, 2007. Vol. 37. No. 5. Pp. 404–419.
16. Köhler E., Möhring R.H., Skutella M. Traffic networks and flows over time. In Lerner, J., Wagner, D., and Zweig, K. A., editors, *Algorithmics of Large and Complex Networks: Design, Analysis, and Simulation*, volume 5515 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 166–196. Springer, 2009.
17. Irwin N., Cube H.V. Capacity restraint in multi-travel mode assignment programs. *Highway Research Board Bulletin*, 1962. No. 347. Pp. 258–287.
18. Wohl M. Notes on transient queuing behavior, capacity restraint functions, and their relationship to travel forecasting. *Papers in Regional Science*, 1968. Vol. 21. No. 1. Pp. 191–202.
19. Lieberherr J. Pritscher E. Capacity-restraint railway transport assignment at SBB-Passenger. In *Proceedings of the 12th Swiss Transport Research Conference*, 2012.

References

1. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Modelirovanie gruzovykh perezovok v transportnoi seti [Modeling of freight traffic in the transport network]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2016. No. 10. Pp. 182–184.
2. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Razvitie gorodskikh gruzovykh sistem s uchetom kontseptsii gorodskogo planirovaniya [Development of urban cargo systems taking into account the concept of urban planning]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Scientific papers collection of Angarsk State Technical University]*, 2016. Vol. 1. No. 1. Pp. 244–247.
3. Lebedeva O.A. Primenenie intellektual'nykh transportnykh sistem v oblasti upravleniia gruzovymi perezovkami [The use of intelligent transport systems in the field of freight traffic management]. *V sbornike: Razvitie teorii i praktiki avtomobil'nykh perezovok, transportnoi logistiki. sbornik nauchnykh trudov kafedry «Organizatsiya perezovok i upravlenie na transporte» v ramkakh Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Sibirskaya gosudarstvennaya avtomobil'no-dorozhnaya akademiya (SibADI) [In the collection: Development of the theory and practice of road transport, transport logistics. Proceedings of the Department "Organization of Transportation and Transport Management" in the framework of the International Scientific and Practical Conference. Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), 2016]*. Pp. 102–107.
4. Lebedeva O.A., Poltavskaya Yu.O., Gammaeva Z.N., Kondratenko T.V. Transportnaya infrastruktura kak osnopolagayushchii faktor effektivnogo funktsionirovaniya ekonomiki strany [Transport infrastructure as a fundamental factor in the effective functioning of the country's economy]. *[Collection of scientific works of the Angarsk State Technical University]*, 2018. Vol. 1. No. 15. pp. 125–130.
5. Poltavskaya Yu.O. Optimizatsiya transportnoi seti na osnove minimuma obshchikh zatrat na dostavku gruzov [Optimization of the transport network based on the minimum total costs for the delivery of goods]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2019. No. 13. Pp. 178–183.
6. Poltavskaya Yu.O. Metody sbora dannykh o prodolzhitel'nosti dvizheniya na marshrute i trebovaniya k ob'emnykh vyborke [Methods for collecting data on the duration of traffic on the route and requirements for the sample size]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2018. No. 12. Pp. 192–195.
7. Mikhailov A.Yu., Kopylova T.A. Sistema kriteriev otsenki transportno-perezadochnykh uzlov [System of criteria for assessing transport interchange hubs] *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2015. No. 7 (102). Pp. 168–174.

8. Gozbenko V.E., Ivankov A.N., Kolesnik M.N., Pashkova A.S. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoi seti s uchetom moshchnosti passazhiro- i gruzopotokov. Deponirovannaya rukopis' No. 330-V2008 17.04.2008 [Methods for forecasting and optimization of the transport network taking into account the capacity of passenger and cargo flows. Deposited manuscript No. 330-B2008 17.04.2008].

9. Gozbenko V.E., Kripak M.N., Ivankov A.N. Sovershenstvovanie transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev [Improvement of the transport and freight forwarding service of freight owners]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011. 176 p.

10. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*, 2018. Vol. 36. Pp. 427–433.

11. Caimi G. Algorithmic decision support for train scheduling in a large and highly utilised railway network. PhD thesis, ETH Zurich, 2009.

12. Schlechte T., Borndörfer R., Erol B., Graffagnino T., Swarat E. Micro-macro transformation of railway networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2011.

13. Jha K.C., Ahuja R.K., Sahin G. New approaches for solving the block-to-train assignment problem. *Networks*, 2008. Vol. 51. No. 1. Pp. 48–62.

14. Barnhart C., Jin H., Vance P. H. Railroad blocking: A network design application. *Oper. Res.*, 2000. Vol. 48. No. 4. Pp. 603–614.

15. Ahuja R.K., Jha K.C., Liu J. Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*, 2007. Vol. 37. No. 5. Pp. 404–419.

16. Köhler E., Möhring R.H., Skutella M. Traffic networks and flows over time. In Lerner J., Wagner D., and Zweig K. A. (eds.) *Algorithmics of Large and Complex Networks: Design, Analysis, and Simulation, volume 5515 of Lecture Notes in Computer Science*, pages 166–196. Springer, 2009.

17. Irwin N., Cube H.V. Capacity restraint in multi-travel mode assignment programs. *Highway Research Board Bulletin*, 1962. No. 347. Pp. 258–287.

18. Wohl M. Notes on transient queuing behavior, capacity restraint functions, and their relationship to travel forecasting. *Papers in Regional Science*, 1968. Vol. 21. No. 1. Pp. 191–202.

19. Lieberherr J., Pritscher E. Capacity-restraint railway transport assignment at SBB-Passenger. In *Proceedings of the 12th Swiss Transport Research Conference*, 2012.

Информация об авторах

Лебедева Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: kravhome@mail.ru

Information about the authors

Ol'ga A. Lebedeva – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Subdepartment of Management of Automobile Transport, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: kravhome@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).141-148

УДК 625.172

Анализ планирования технологических процессов производства путевых работ железнодорожного транспорта в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой

Т. Н. Асалханова¹, А. А. Осколков²✉

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ di_oskolkovaa@esrr.ru

Резюме

Разработка и реализация требований по определению и подтверждению надежности, эксплуатационной готовности, В статье рассматриваются проблемы, возникающие при планировании технологических процессов производства путевых работ, в том числе с учетом Положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений, а также при отражении видов планирования путевых работ в системе единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой. Для исследования проблем планирования проводился анализ внесения данных о планировании технологических процессов путевых работ дистанциями пути Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры. При проведении анализа выявлено, что в настоящее время планирование технологических процессов производства путевых работ в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой имеет много недостатков, так как предприятия выполняют один из критериев Положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений – трудозатраты по продуктивным запланированным рабочим заданиям по месячному плану должны составлять не менее 50 % от общих трудозатрат, рассчитанных на списочный состав бригады на дату планирования. Это приводит к некоторым формальностям при планировании. При этом не учитываются факторы, влияющие на элементы пути, которые фиксируются не только в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой, но и в других корпоративных информационных системах. В результате исследования предложена модель методики планирования путевых работ с использованием

предиктивной аналитики, визуализации маркеров безопасности, факторного анализа с учетом внедрения цифровых технологий в инфраструктурный комплекс и построения цифровой экосистемы компании.

Ключевые слова

единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой, организация производства, планирование, путевые работы, технологический процесс, корпоративные информационные системы, цифровые технологии

Для цитирования

Асалханова Т.Н. Анализ планирования технологических процессов производства путевых работ железнодорожного транспорта в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой / Т.Н. Асалханова, А.А. Осколков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 141–148. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).141-148

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.01.2021, поступила после рецензирования: 20.01.2021, принята к публикации: 21.02.2021

Analysis of the planning of technological processes for the production of railway track works in a single corporate automated infrastructure management system

T. N. Asalkhanova¹, A. A. Oskolkov²✉

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²The East-Siberian infrastructure Directorate, Irkutsk, the Russian Federation

✉ di_oskolkovaa@esrr.ru

Abstract

The article considers the problems that arise in planning of technological processes of production of track work, including taking into account the Situation on the organization of integrated services infrastructure of the economy of way and structures, reflection, planning of track work in the system of uniform corporate automated control system infrastructure. To study the problems of planning, the analysis of data on the planning of technological processes of track work by the distances of the East Siberian Directorate of Infrastructure was carried out. During the analysis, it was revealed that at present, the planning of technological processes for the production of track works in the unified corporate automated infrastructure management system has many disadvantages, since enterprises fulfill one of the criteria of Regulation b for the organization of integrated maintenance of infrastructure facilities, roads and structures – "Labor costs for productive planned work tasks according to the monthly plan must be at least 50% of the total labor costs calculated for the list composition of the team at the planning date", which leads to some formalities during planning. This does not take into account the factors that affect the elements of the path, which are recorded not only in the unified corporate automated infrastructure management system, but also in other corporate information systems. As a result of the study, a model of the methodology for planning track work using predictive analytics, visualization of security markers, factor analysis, taking into account the introduction of digital technologies in the infrastructure complex and building a digital ecosystem of the company is proposed.

Keywords

unified corporate automated infrastructure management system, production organization, planning, track work, technological process, corporate information system, digital technologies

For citation

Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A. Analiz planirovaniya tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva putevykh работ zheleznodorozhnogo transporta v edinoi korporativnoi avtomatizirovannoi sisteme upravleniya infrazhukturnoi [Analysis of planning of technological processes of production of railway track works in the unified corporate automated infrastructure management system]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.141–148.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).141-148

Article info

Received: 10.01.2021, Revised: 20.01.2021, Accepted: 21.02.2021

Введение

Основным документом по организации и технологии ремонтно-путевых работ является Типовой технологический процесс, которым устанавливается перечень и последовательность выполнения входящих в них отдельных технологических операций,

расстановка монтеров пути, машин и механизмов по месту работ и времени, исходя из условий достижения максимального темпа и наилучшего качества, наиболее эффективного использования «оконного» времени и обеспечения безопасности движения поездов и труда. На основании Типового технологиче-

ского процесса разрабатываются рабочие технологические процессы, отражающие местные особенности в работе, действующие на период ремонта конкретного объекта, в том числе с постановкой пути в проектное положение, на каждый участок на основе координатных методов с использованием высокоточной системы координат [1].

К особенностям технологических процессов производства работ по текущему содержанию верхнего строения пути относятся: выполнение работ в «окна» или короткие интервалы между поездами; значительный фронт работ; сезонность производства работ, вследствие чего ограничен период времени, в который выполняются шпалобалластные и земляные работы; производство работ в течение всего года на открытом воздухе, что ухудшает условия выполнения работ и соблюдение требований техники безопасности монтерами пути, снижает производительность труда при неблагоприятной погоде (сильные морозы зимой и высокая температура летом, неудовлетворительная видимость при туманах, метелях и др.) [1, 2].

Планирование технологических процессов производства путевых работ

Учитывая изложенные особенности, влияющие на организацию производства путевых работ, а также поддержание железнодорожного пути в технически исправном состоянии, в путевом хозяйстве разработаны виды планирования выполнения путевых работ, что отражено в нормативных документах ОАО «РЖД» [2–6]. К таким видам планирования относятся: годовое, месячное, недельное и суточное планирование [4].

В настоящее время планирование путевых работ осуществляется дистанциями пути в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой (ЕК АСУИ).

Тем не менее, в Положении об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений (далее – Положение) [6] и при практическом применении методики планирования выявляются недоработки, которые не позволяют эффективно выстроить систему организации производства путевых работ, чем обусловлены исследования в этом направлении деятельности структурных подразделений инфраструктурного комплекса [4, 7, 8].

Планированию технологических процессов производства путевых работ посвящено немало научных исследований учеными, разработчиками информационных систем, специалистами-практиками структурных подразделений дирекций инфраструктуры, в том числе такими авторами, как Г.Е. Андреев, В.П. Бельтюков, А.А. Васильев, З.Л. Крейнис, Н.И. Коваленко, М.А. Левинзон, И.Б. Лехно, В.С. Лысюк, В.В. Мишин, В.О. Певзнер,

Е.С. Свинцов, М.П. Смирнов, В.П. Сычев, Г.И. Тарнопольский, С.А. Телегин, В.И. Тихомиров, В.М. Филиппов, В.Я. Шульга, Ю.М. Щекотков, Г.К. Щепотин, Т.И. Шеронова, В.М. Янин и др.

Например, В.П. Бельтюков в своих исследованиях отметил несколько проблем в оптимизации системы управления путевым хозяйством, одна из которых – неэффективность методик планирования путевых работ, которые включали и включают несколько критериев. Такие критерии могут давать противоречивые варианты для принятия управленческих решений, они не учитывают также и то, что планы при фактическом выполнении работ значительно меняются, так как не прогнозируется техническое состояние пути, и не принимается во внимание разнообразие эксплуатационных условий, в том числе климатических и географических условий расположения дистанций пути. Это отмечают и другие исследователи [3, 9–11].

Технологические процессы производства путевых работ по текущему содержанию верхнего строения пути осуществляются на основе технологонормировочных карт и типовых норм времени, а планирование работ выполняется на основе данных из внутренних систем ЕК АСУИ и внешних систем, средств диагностики и мониторинга, которые автоматически передаются в ЕК АСУИ [6, 12].

В ходе исследования проведена оценка качества планирования работ в ЕК АСУИ по дистанциям пути Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры (ВС ДИ).

Все дистанции пути планируют свою деятельность в соответствии с годовыми адресными планами, сезонными работами, а также рассматривают плановые работы текущего содержания по предупреждению отказов технических средств, что находит отражение в ЕК АСУИ. Однако, кроме этого, существует текущая работа, которая достаточно часто приводит к невыполнению запланированных мероприятий из-за выявления неисправностей и отступлений не только самими дистанциями пути, но и другими хозяйствами, и средствами диагностики и мониторинга [13].

За 2019 г. и три месяца 2020 г. в ЕК АСУИ создано значительное количество инцидентов, из них в типовой системе инцидентов (ТСИ) зарегистрировано 83,7 % инцидентов от общего количества, а на внешние системы приходится – 16,3 % инцидентов. При этом вагонами путеизмерителями КВЛ-П выявлено 5 % неисправностей пути от общего количества инцидентов, остальными средствами диагностики, например, ЦНИИ-4, выявлено 2,3 % неисправностей, системой видеоспециальной инспекции железнодорожного пути (ВРЕЛЬС) – почти 3 %, а

также натурными осмотрами (КМО, ГО, РЦКУ, ПК) выявлен еще большой массив инцидентов.

Следовательно, ежемесячно на каждую дистанцию пути приходится в среднем до 30 % инцидентов от общего количества запланированных работ, которые не учитывались при их планировании [13].

На данный момент поступающий объем инцидентов в системе является критично большим, и устранить все неисправности дистанциями пути не представляется возможным. Поэтому здесь целесообразно применять систему рационального планирования, которая строится на предиктивной аналитике состояния пути и адресно-конкретизированного факторного анализа. Возможно, настал момент перехода от экспертной системы оценки количества инцидентов в ЕК АСУИ к машинному обучению, т. е. от дедуктивного метода, основанного на получении частного вывода из общего правила, гипотезы, к индуктивному, который базируется на определении общих закономерностей по частным эмпирическим данным.

«Барьерные места» при планировании путевых работ

Анализ ведения месячного планирования работ по дистанциям пути в ЕК АСУИ за 2019–2020 гг. в соответствии с нормативными документами ОАО «РЖД» выявил «барьерные места» в существующей методике планирования: 40–50 % от общего плана путевых работ составляют работы неосновного назначения. Это работы, связанные со снегоборьбой, смазыванием болтов и башмаков на стрелочных переводах, докручиванием гаек клеммных, закладных и стыковых болтов, шурупов, добивкой костылей, погрузочно-разгрузочными работами. Реализация же месячного планирования за февраль 2020 г. составила всего 10 % от доли общих трудозатрат за месяц.

Данное положение дел характеризует одну из проблем месячного планирования, которая заключается «в гонке» предприятий за показателем, указанным в положении – не менее 50 % запланированных продуктивных работ от списочного состава работников. Вследствие этого, для достижения норматива планирования дистанции включают в план много работ неосновного назначения, что в действительности вносит долю формальности планирования в соотношении 40–50 % от общего фонда времени по численности работников. Также, чтобы обеспечить 50 % запланированных работ от списочного состава, дистанции пути вынуждены на каждые рабочие сутки планировать полный объем продуктивных работ за исключением прочих. При этом план получается не 100 % актуальным, так как

невозможно учесть объем неотложных и первоочередных работ, которые возникнут в течение суток, недели и месяца.

Рассмотрим месячное планирование путевых работ на примере Горхонской дистанции пути – структурного подразделения ВС ДИ, где прочие работы за 2019–2020 гг. составили 41 %, к неотложным работам отнесены 25 % видов работ, что в сумме дает 66 %. В результате такого планирования остается только 34 % видов работ на плановые работы без учета влияния явочной численности монтеров пути, которая не прописана в Положении. При этом не приняты к учету все первоочередные работы содержания пути, возникшие в течение месяца. В итоге, в ЕК АСУИ сформирован месячный план, содержащий много работ текущего содержания с учетом 50 % запланированных работ от списочного состава работников дистанции, но с крайне низким процентом реализации необходимых видов работ.

Такое состояние дел характерно не только для рассмотренной дистанции пути. Дистанции пути пытаются без учета прочих работ распланировать работы в объеме каждого дня, чтобы добиться 50 % плановых работ.

Предложения по планированию путевых работ

Решением выявленных проблемных «барьерных мест» должны быть:

1. Учет всех накопленных в корпоративных информационных системах управления данными о состоянии пути, обязательное формирование факторного анализа по критериям, влияющим на путевое хозяйство (ЕК АСУИ, УРРАН, КАСАТ, КАС АНТ, ЕК АСУФР, ЕК АСУТР и др.).

2. Четкое взаимодействие всех хозяйств и средств диагностики и мониторинга при создании инцидентов (исключение дублирования инцидентов в ЕК АСУИ).

3. Включение в методику планирования путевых работ экономической составляющей по организации производства путевых работ [9–10], т. е. не только расчет нормативно-целевого бюджета в ЕК АСУИ, но и расчеты расходов на выполнение всех видов планирования в ЕК АСУФР и интеграции данных в ЕК АСУИ.

Для реализации решения необходимо внедрение цифровых технологий в части технологии BigData (Большие данные), предиктивного анализа, цифрового двойника, BIM (управление жизненным циклом линейных объектов инфраструктуры) и искусственного интеллекта [15]. В результате внедрения таких технологий каждая ступень планирования должна быть актуальна и иметь высокий уровень подтверждаемости производства работ. Например, в месячный план должны входить: работы годового плана (в объеме материалов «36 позиций»); мероприятия, связанные с сезонностью,

снижением отказов технических средств и улучшением балловой оценки, которые будут основываться на факторном анализе состояния пути (должен автоматически формироваться по результату логической обработки больших данных и искусственного интеллекта) – такой план в комплексе должен составлять не менее 40 % от явочного состава бригады. Это позволит осуществлять контроль на уровне службы пути, территориальных отделов инфраструктуры (ДИЗТЕР) и руководства дистанций пути.

В свою очередь, недельное планирование должно формироваться на основе месячного плана, прочих работ и предиктивных состояний пути, вычисленных из всех известных инцидентов с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей пути и иметь рубеж 68 % от списочного состава бригады. Суточный план, который создается на базе недельного плана и учитывает первоочередные, неотложные инциденты, выявленные после формирования недельного плана, а также новые расчетные предотказные состояния, должен иметь рубеж 70–80 % от списочного состава бригады с учетом плановых и внеплановых отсутствий работников (очередные отпуска, служебные командировки, административные отпуска и т. д.).

На каждом этапе планирования необходимо четко упорядочить задачи, которые стоят перед предприятием, чтобы добиться высокой эффективности на каждой ступени от годового до суточного планирования.

Для создания эффективной и рациональной системы планирования необходима реализация цифровой платформы предиктивного анализа данных, формирования комплексных задач устранения инцидентов в ступенчатой системе планирования и выработки рациональных мероприятий производства на основе цифрового моделирования и ожидаемой результативности в ЕК АСУИ [13–14].

В настоящее время планирование работ в ЕК АСУИ сводится к включению в план инцидентов по их крайним срокам, без учета комплексного развития инцидентов, того, что из ряда похожих инцидентов, есть действительно опасные, либо наиболее приоритетные, которые должны быть устранены в сжатые сроки, без моделирования процесса интенсивной дестабилизации пути. Именно для этого и нужна предиктивная аналитика состояния инфраструктуры.

На основе изложенного предлагаем модель построения методики планирования, которую необходимо создать на основе ЕК АСУИ с учетом интеграции данных из других корпоративных информационных систем, таких как УРРАН, КАСАТ, КАС АНТ, АС АПВО-2 и др. (рис. 1).

В модели методики планирования необходимо учитывать оценку логического имитационного развития неисправностей, рассчитывать вариантную модель комплексного сочетания неисправностей и текущего состояния пути, оценивать производные векторы зависимого развития всех элементов пути, создать адресно-конкретизированный факторный

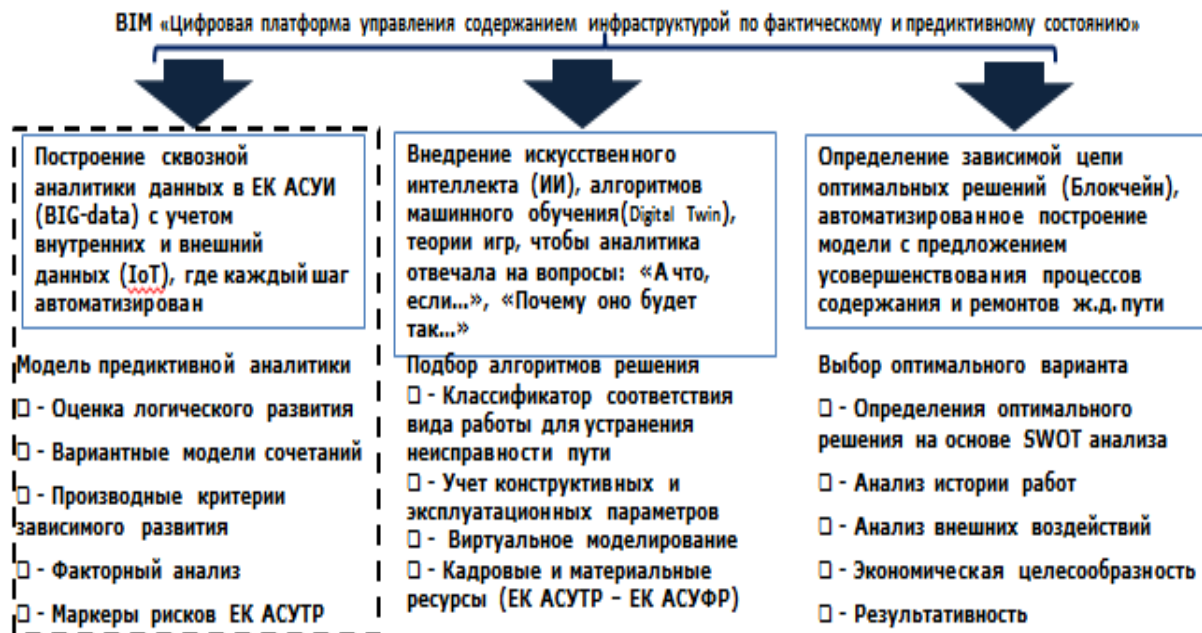


Рис. 1. Модель методики планирования

Fig. 1. Model planning techniques

анализ. Также необходимо определить наиболее эффективные варианты решений из классификатора соответствия вида работ – устраняемой неисправности, учесть конструктивные и эксплуатационные параметры и выбрать наиболее оптимальный вариант, основываясь на моделировании ожидаемых результатов с учетом экономической составляющей производства путевых работ.



Рис. 2. Планирование путевых работ на основе предиктивного анализа

Fig 2. Planning of road works based on predictive analysis

Предлагаем на основе внедрения искусственного интеллекта и предиктивной аналитики в модель методики планирования создать таблицу маркеров безопасности в ЕК АСУИ. Благодаря наглядности (визуализации), дорожный мастер, специалисты дистанции пути смогут быстро проанализировать маркеры безопасности с числовым критерием групп инцидентов и принять управленческое решение по технологическим процессам, которые должны использовать при производстве путевых работ, включить в план работы, которые необходимо выполнить в самые сжатые сроки, чтобы обеспечить безопасность (рис. 2).

Предиктивная аналитика – это аналитика, в основе методов и техник которой лежат инструменты статистики, логического интеллектуального анализа данных с максимальным применением вычислительных мощностей, позволяющих прогнозировать поведение или состояние исследуемого объекта и

принимать на основе этих данных оптимально-рациональные управленческие решения [16].

Задачу предиктивной аналитики невозможно решить без реализации цифровой платформы управления содержанием инфраструктуры, о чем в своих работах указывает Н.И. Коваленко [17].

Реализация цифровой платформы ВМ содержания и ремонтов инфраструктуры должна состоять из следующих связанных модулей:

- цифровая модель предиктивного состояния объектов инфраструктуры при использовании платформы BigData и интернета вещей IoT;

- цифровая модель определения алгоритмов эффективной технологии устранения выявленных проблем на основе ресурсов, оценки жизненного цикла верхнего строения пути, влияния всех элементов пути на его состояние, ожидаемого результата с учетом экономически выгодного варианта при использовании работы искусственного интеллекта, а также технологии машинного обучения Digital Twin;

- цифровая модель производства работ – от интеллектуального планирования окон до организации производства работ с учетом обязательного выполнения всех этапов технологического процесса Блокчейн (цифровая технология распределенного реестра позволит распространить информацию между участниками взаимосвязанных технологических процессов в рамках распределенной среды без участия операторов или какой-либо внешней организации) [18].

Заключение

Таким образом, используя предложенную модель планирования и организации технологических процессов путевых работ, можно разработать методику планирования путевых работ с учетом наибольшего количества показателей, факторов, которые влияют на изменение элементов пути. Такая модель планирования должна выстраиваться с учетом внедрения цифровых технологий, в том числе и технологии машинного обучения, в рамках цифровой экосистемы компании, которая позволит объединить все хозяйства холдинга, партнеров, клиентов [18].

Список литературы

1. Крейнис З.Л. Техническое обслуживание и ремонт железнодорожного пути: учебник. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. 453 с. URL: <http://umczdt.ru/books/35/230302/>.
2. Положение о системе ведения путевого хозяйства ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 31.12.2015 г. № 3212р.
3. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. приказом Минтранса России № 286 от 21.12.2010.
4. Правила и технология выполнения основных работ при текущем содержании пути: утв. МПС РФ от 30.06.1997 г. № ЦПТ-52.
5. Технические условия на работы по реконструкции и ремонту железнодорожного пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.01.2013 г. № 75р.
6. Положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.11.2019 г. № 2675р.
7. Бельтюков В.П. Оптимизация системы содержания верхнего строения железнодорожного пути / В.П. Бельтюков // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. Т. 13 № 2(47). С. 112–120.

8. Бельтюков В.П. Оптимизация системы содержания железнодорожного пути на основании прогнозирования изменения его состояния и затрат, связанных с его содержанием / В.П. Бельтюков // Путь XXI века : сб. науч. трудов III междунар. науч.-практич. конф., 20.02.2015. СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. С. 14–23.
9. Андреев А.В. Методика определения стоимости жизненного цикла конструкции пути с учетом прогнозирования технического состояния пути / А.В. Андреев // Путь XXI века : сб. науч. трудов междунар. науч.-методич. конф. СПб. : ПГУПС, 2013. С. 188–193.
10. Гапанович В.А. На основе оптимизации стоимости жизненного цикла / В.А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. 2013. № 6. С. 26–34.
11. Глубоков Н.Н., Мироненко Е.В. Система «Электронное путевое хозяйство» / Н.Н. Глубоков, Е.В. Мироненко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. № 3. С. 30–34.
12. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 16.11.2016 г. № 2288р.
13. Каташева А.П., Асалханова Т.Н., Осолков А.А. Сравнительный анализ планирования и фактического выполнения работ по текущему содержанию пути по Иркутск-Сортировочной дистанции пути / А.П. Каташева, Т.Н. Асалханова, А.А. Осолков // «Молодая наука Сибири»: электрон. науч. журн. 2020. № 2(8). URL: <http://mnv.irgups.ru/toma/>.
14. Ковенькин Д.А., Поздеев В.Н. Обоснованность критериев назначения ремонтов железнодорожного пути / Д.А. Ковенькин, В.Н. Поздеев // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 1. С. 438–441.
15. Насонов Г.Ф. Цифровая трансформация инфраструктуры / Г.Ф. Насонов // Автоматика. Связь. Информатика. 2019. № 4. С. 2–4.
16. Хасанов А.Р. Влияние предиктивной аналитики на деятельность компаний / А.Р. Хасанов // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 3 (106). С. 108–113.
17. Коваленко Н.И., Суворова Д.Р., Аноховская И.В. Применение системы ЕК АСУИ при планировании работ путевого хозяйства ОАО «РЖД» / Н.И. Коваленко, Д.Р. Суворова, И.В. Аноховская // Наука и технологии железных дорог. 2020. Т. 4. № 1 (13). С. 78–87.
18. Кадик Л. Особый подход / Л.Кадик // Пульс управления: электрон.журн. 2019. № 8. URL: <http://www.pult.gudok.ru/archive/contents.php?ID=1478534/>.

References

1. Kreinis Z.L. Technical maintenance and repair of the railway track: textbook-M.: FGBU DPO «Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport», 2019. 453 p. URL: <http://umczdt.ru/books/35/230302>.
2. Regulations on the system of track management of JSC “Russian Railways”: approved. Order of JSC “Russian Railways” dated 31.12.2015 No. 3212r.
3. Rules of technical operation of railways of the Russian Federation: approved by Order of the Ministry of Transport of Russia No. 286 dated 21.12.2010.
4. Rules and technology for performing basic work under the current content of the path : approved. The Ministry of Railways of the Russian Federation dated 30.06.1997, No. ATC-52.
5. Technical conditions for the reconstruction and repair of railway: by the order of JSC “RZD” from 18.01.2013 No.75r.
6. Provisions on the organization of complex service of objects of infrastructure of the economy of way and structures : approved. by the order of JSC “RZD” from 29.11.2019, No. 2675r.
7. Beltyukov V.P. Optimization of the system of maintenance of the upper structure of the railway track / V.P. Beltyukov // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei sosheniya. 2016. Vol. 13. No. 2(47). Pp. 112–120.
8. Beltyukov V.P. Optimization of the system of detention of the railway on the basis of forecasting changes its condition and the costs associated with its content / V.P. Beltyukov // Path of the XXI century : collection of scientific works. papers III Intern. scientific.-practical. Conf. 20.02.2015. SPb. : FGBOU VPO PGUPS, 2015. Pp. 14–23.
9. Andreev A.V. Methodology for determining the cost of the life cycle of the track structure taking into account the forecasting of the technical condition of the track / A.V. Andreev // Path of the XXI century: collection of scientific works of the international scientific and methodological conference-St. Petersburg: PGUPS, 2013. Pp. 188–193.
10. Gapanovich V.A. Based on the optimization of life cycle cost / V.A. Gapanovich // Railway transport. 2013. No. 6. Pp. 26–34.
11. Action N.N., Mironenko E.V. “Electronic putevoe khozyaystvo” / N.N. Action, E.V. Mironenko // Proceedings of Rostov state University of Railways. 2019. No. 3. Pp. 30–34.
12. Instructions for current maintenance of railway track : approved. by the order of JSC “RZD” from 16.11.2016, No. 2288r.
13. Katasheva A.P., Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A. Comparative analysis of planning and actual execution of works on current maintenance of track in Irkutsk-Sorting track / A.P. Katasheva, T.N. Asalkhanova, A.A. Oskolkov // “Young science of Siberia”: the electron. scientific journal. 2020. № 2(8). URL: <http://mnv.irgups.ru/toma/>, free. Title from the screen. Yaz. rus., eng.
14. Kovenkin D.A., Pozdeyev V.N. Validity of criteria for the purpose of repairs of the railway track / D.A. Kovenkin, V.N. Pozdeyev // Transport infrastructure of the Siberian region. 2016. Vol. 1. Pp. 438–441.
15. Nasonov G.F. Digital transformation of infrastructure / G.F. Nasonov // Avtomatika. Connection. Computer science. 2019. No. 4. Pp. 2–4.
16. Khasanov A.R. Influence of predictive analytics on the activities of companies / A.R. Khasanov // Strategic decisions and risk management. 2018. № 3 (106). Pp. 108–113.

17. Kovalenko N.I., Suvorov D.R., Rohovska I.V. System Application EC ASUI in planning of track facilities of “RZHD” / N.I. Kovalenko, D.R. Suvorova, I.V. Unkovskaya // Science and technology of railways. 2020. Vol. 4. № 1 (13). Pp. 78–87.

18. Kadik L. Special approach. / L. Kadik // Control panel: electron. Zhurnal. 2019. No. 8. URL: <http://www.pult.gudok.ru/archive/contents.php?ID=1478534/>.

Информация об авторах

Асалханова Татьяна Николаевна – канд. экон. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: asalhanova_tn@irgups.ru

Осколков Андрей Александрович – начальник сектора информатизации Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры, г. Иркутск, e-mail: di_oskolkovaa@esrr.ru

Information about the authors

Tatyana N. Asalkhanova – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department Road and Track Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: asalhanova_tn@irgups.ru

Andrey A. Oskolkov – Head of the Informatization Sector of the East Siberian Infrastructure Directorate, Irkutsk, e-mail: di_oskolkovaa@esrr.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).148-155

УДК 625.1

Влияние микро- и макрогеометрии пути на поперечную устойчивость железнодорожного пути

М. А. Мыльникова ✉

Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Российская федерация

✉ mylnikova.ma93@gmail.com

Резюме

В статье рассматриваются факторы, влияющие на поперечную устойчивость бесстыкового железнодорожного пути, такие как износ рельсов, поездная нагрузка и режимы движения поездов, неровности пути, в частности отступления в плане, неравномерность распределения температурных полей по поверхности рельса и в его сечении. Наиболее подробно описано исследование воздействия поездной нагрузки на поперечную устойчивость пути. В работе приводится обоснование расчетной модели 3D поезда для проведения моделирований в программном комплексе «Универсальный механизм». Предложен способ определения рекомендуемого шага интегрирования с применением методов спектрального анализа. Представлены результаты проведенных исследований воздействия поездной нагрузки на поперечную устойчивость пути при движении поезда по участкам пути с нарушениями микрогеометрии пути и без них. Приведен способ расчета дополнительной поперечной силы, возникающей при движении поезда по отступлению в плане. Автором статьи предложен способ определения интенсивности изменения уклона отвода отступления в плане, позволяющий определить, какое из отступлений является опасным и требует дополнительного постоянного контроля. Обозначены дальнейшие направления исследований.

Ключевые слова

факторы нарушения поперечной устойчивости пути, поездная нагрузка, максимально поперечные силы, расчетная модель

Для цитирования

Мыльникова М. А. Влияние микро- и макрогеометрии пути на поперечную устойчивость железнодорожного пути / М. А. Мыльникова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 148–155. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).148-155

Информация о статье

поступила в редакцию: 09.11.2020, поступила после рецензирования: 20.11.2020, принята к публикации: 01.12.2020

The influence of railway track micro- and macro-geometry on the railway track transverse stability

М. А. Myl'nikova ✉

Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, the Russian Federation

✉ mylnikova.ma93@gmail.com

Abstract

The article considers the factors that affect the transverse stability of a continuous welded railway track. These factors are rail wear, train load and modes of train movement, and track irregularities, in particular, deviations in the plan, uneven distribution of

temperature fields over the surface of the rail and in its cross-section. The research of the impact of train load on the transverse stability of the railway track is described in most detail. The article provides a rationale for the 3-D train design model for simulations in the “Universal mechanism” software package. A method of determining the recommended integration step by using spectral analysis techniques is proposed. The results of conducted studies of the impact of the train load on the transverse stability of the track are presented. In this case the train moves along the track sections with and without perturbations of the track micro-geometry. The paper provides a method of calculating the additional transverse force that occurs when the train moves along a deviation in the plan. The author of the article proposes a method of determining the intensity of changes in the offset slope of the deviation in the plan, which allows one to determine which of the deviations is dangerous and requires additional constant monitoring. Further directions of research are indicated.

Keywords

factors of violation of the transverse stability of the track, train load, the maximum transverse forces, calculation model

For citation

Myl'nikova M. A. Vliyaniye mikro- i makrogeometrii puti na poperechnuyu ustoichivost' zheleznodorozhnogo puti [The influence of railway track micro- and macro-geometry on the railway track transverse stability]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.148–155.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).148-155

Article info

Received: 09.11.2020, Revised: 20.11.2020, Accepted: 01.12.2020

Введение

Наиболее актуальными и важными процессами при содержании и эксплуатации железнодорожного пути на сегодняшний день являются нарушения поперечной устойчивости бесстыкового железнодорожного пути.

Данный вопрос изучается учеными из разных стран [1–4]. Многие объединяются во мнении, что причинами возникновения неблагоприятных ситуаций является множество неконтролируемых факторов, провоцирующих нарушения поперечной устойчивости и в том числе возникновение температурного выброса пути. К таким факторам относятся: износ рельсов, поездная нагрузка и режимы движения поездов [5, 6], собственные воздействия рельса, вызванные способами изготовления, укладки, содержания, ремонта конструкции и составляющих ее деталей [7], отступления в плане и интенсивность их развития [8, 9], неравномерность распределения температурных полей по поверхности рельса и в его сечении [10].

Воздействие поездной нагрузки на железнодорожный путь

Воздействие поездной нагрузки на железнодорожный путь исследуется на кафедре пути и железнодорожного строительства Уральского государственного университета путей сообщения в программном комплексе «Универсальный механизм» (далее – ПК УМ) [11–13].

Возможности проведения расчетов модели в ПК УМ верифицирована [14, 15].

В статье приведено влияние поперечных сил от прохода поезда на возникновение опасных сечений с точки зрения поперечной устойчивости, в которых требуется установка бализ [16–18].

Использование системы мониторинга за напряженным состоянием рельсовых плетей при помощи

бализы позволит прогнозировать возможные температурные выбросы бесстыкового пути, контролировать полносоставность поездов и равномерность распределения нагрузки как для каждого вагона, так и для всего состава.

Предлагаемая система работает автоматизировано [19]. Выполнена проверка и работоспособность заложенных в системе алгоритмов путем создания компьютерных расчетов. На данный момент планируется произвести цикл испытаний продолжительностью от одного капитального ремонта до другого, в процессе которых необходимо рассчитать рискованные ситуации при выбросах пути и представить возможный количественный диапазон этих параметров, проверить работоспособность алгоритмов в ситуации, близкой к нарушению стабильности и устойчивости пути. На основании этого дополнить алгоритмы блоками, характеризующими рискованные ситуации, и верифицировать алгоритмы с учетом дополнений.

Бесперебойная работа системы мониторинга за напряженным состоянием рельсовых плетей будет обеспечена после определения места установки каждой бализы и закрепления устройств.

Для этого необходимо учитывать ориентацию относительно солнца, ветра и расположения путей в выемках и насыпях.

Потеря устойчивости бесстыкового пути зависит в том числе от температуры закрепления рельсовых плетей. Поэтому при определении мест установки бализ важно учитывать температуру закрепления рельсовой плети, место и время ее измерения. Этот фактор важно учитывать по причине возможной погрешности и изменения температуры закрепления плети при эксплуатации пути, в том числе из-за неучтенного неравномерного распределения температурных полей по поверхности и сечению рельса.

Следующим этапом при определении мест закрепления бализы должен быть анализ интенсивности развития отступлений в плане.

Силы от движения поезда также рассматриваются в качестве фактора, который может служить одним из параметров нарушения устойчивости пути. Повышенные боковые силы, передаваемые колесами подвижного состава на рельсы, чаще всего возникают по причине недостаточно свободного разворота тележек, в том числе из-за неисправностей вагонов. При этом сход с рельсов скорее возможен из-за вкатывания гребня колеса на головку рельса, а не из-за сдвига путевой решетки. Поэтому для каждого конкретного участка должны быть проведены отдельные исследования в ПК УМ с учетом плана и профиля линии, режима движения поезда, грузонапряженности линии.

Определение достаточного количества вагонов и шага интегрирования для проведения компьютерного моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм»

На начальном этапе для расчетов модели была выбрана тележка модели 18-100, которая подкатывается под все грузовые четырехосные магистральные вагоны (и в том числе цистерны) с осевыми нагрузками до 230 кН, в соответствии с приказом № 41 «О нормах допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1 520 (1 524) мм».

Далее была определена достаточная длина поезда. Для этого производились моделирования и анализ движения 3D поездов, состоящих из одного, двух, трех, четырех, пяти, шести, семи, восьми, девяти и десяти 3D вагонов.

Моделирование происходило поочередно по участку длиной 1 750 м. На участке располагались кривая радиусом 1 200 м, с обеих сторон от кривой находились прямые длиной не менее 200 м. Длина круговой кривой составляла 1 166,64 м, длины переходных кривых – 90 м. При расчетах модели была использована осевая нагрузка 23 т/ось. Скорость 80 км/ч.

Сравнивались значения максимальных поперечных сил, возникающих на контакте «колесо – рельс».

Анализ результатов показал, что силовое воздействие от предыдущих и последующих колесных пар не учитывается при моделировании движения одного и двух 3D вагонов.

Результаты поочередного моделирования движения поездов, состоящих из трех, четырех, пяти, шести, семи, восьми, девяти и десяти 3D вагонов показали, что значения максимальных поперечных сил в среднем отличаются между собой на 245 Н. Это составляет около 2,5 % от средней поперечной силовой нагрузки на контакте «колесо – рельс» при движении подвижного состава для заданных условий. При этом зависимость между значениями максимальных поперечных сил и количеством вагонов носит волновой характер с длиной волны, равной 5 вагонам (рис. 1).

Таким образом, для дальнейших расчетов модели достаточно длины поезда в 5 вагонов. Это позволит учесть большее силовое воздействие от соседних колесных пар.

Первоначально для определения рекомендуемого шага интегрирования расчетной модели, учитывающего точность расчета и время интегрирования, был выбран шаг моделирования 25 см, чтобы произ-

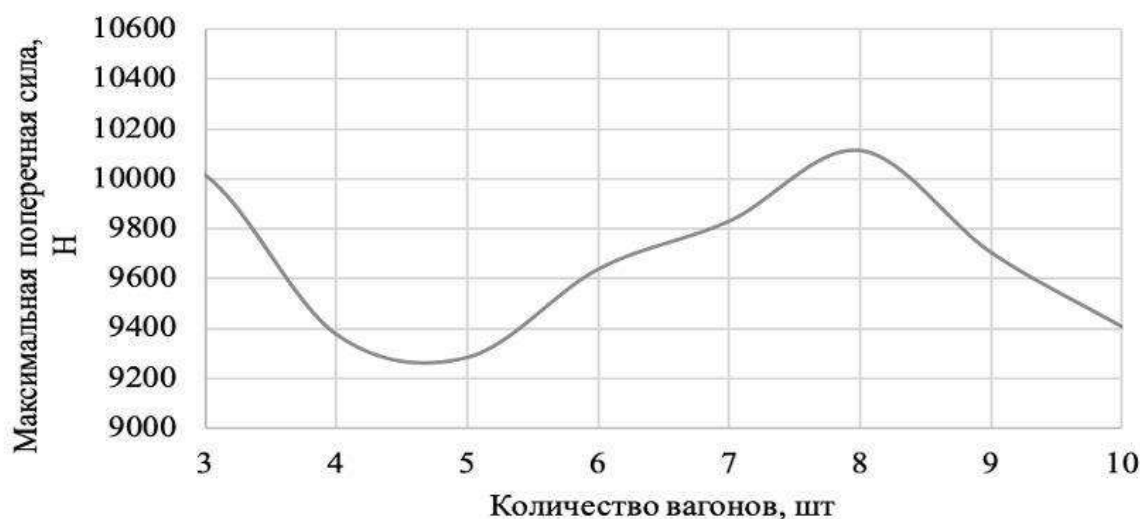


Рис. 1. Зависимость величины максимальной поперечной силы от количества вагонов
Fig. 1. Dependence of the magnitude of the maximum transverse force on the number of railcars

водить расчеты по оси каждой шпалы и в междушпальном ящике при эпюре шпал 2 000 шт/км. Идея заключалась в том, что в этих местах возникают удерживающие силы трения подошвы шпалы о балласт, силы трения боковой поверхности шпалы о балласт и силы торцевого сопротивления сдвигу рельсошпальной решетки в балласте, которые могут стать удерживающим фактором с точки зрения нарушения устойчивости пути.

Ожидание отследить зависимость между значениями максимальных поперечных сил, местом их возникновения и учитывать силы сопротивления при шаге интегрирования 25 см не подтвердилось.

Таким образом, было принято решение уменьшить шаг интегрирования до 1 см и поочередно произвести расчеты при шаге интегрирования 25 и 1 см. Далее построить зависимости поперечных сил от времени движения поезда. После выявить и сравнить цикличность колебаний по основной гармонике путем проведения спектрального анализа (рис. 2).

Исследования происходили со следующими допущениями:

1. Полученные зависимости поперечных сил от времени движения поезда описаны волновым процессом. Процесс носит гармонический характер.

2. Критерием определения основной гармоники является коэффициент корреляции. Гармоника с наибольшим коэффициентом корреляции – основная.

3. Рассматривать требуется прямолинейный участок. Это обусловлено тем, что для сравнения длин волн колебательных процессов, необходимо выявить постоянный параметр, относительно которого производится сравнение. При движении поезда по пе-

реходной кривой имеется много переменных параметров (радиус, возвышение наружного рельса, длина участка и т. д.). На прямолинейном участке и в пределах круговой кривой аналогичные параметры остаются постоянными. При различных скоростях движения в круговых кривых радиусы, длина кривой и возвышение наружного различные. Таким образом, при сравнении длин волн колебательного процесса на переходных и круговых кривых задача становится многокритериальной. Для первых исследований шага интегрирования достаточно определить параметры колебательного процесса на прямолинейном участке. На множество возникающих вопросов относительно выявления основной гармонике колебательного процесса в криволинейных участках ответ будет найден в рамках дальнейших исследований.

В рамках проведенных исследований с принятыми допущениями установлено, что для проведения моделирования рекомендуемый шаг интегрирования составляет 5 см.

Определение вида вагона и тележки колесной пары

Для определения выбора вида вагона было проведено моделирование движения:

– четырехосного полувагона 12-132 (длина полувагона 13,92 м, длина базы 8,65 м, нагрузка 23 т/ось);

– локомотива ЧС-1 (длина локомотива 15,54 м, длина базы 8,17 м, нагрузка 21,5 т/ось);

– четырехосной цистерны (длина цистерны 10,8 м, длина базы 7,8 м, нагрузка 21,375 т/ось).

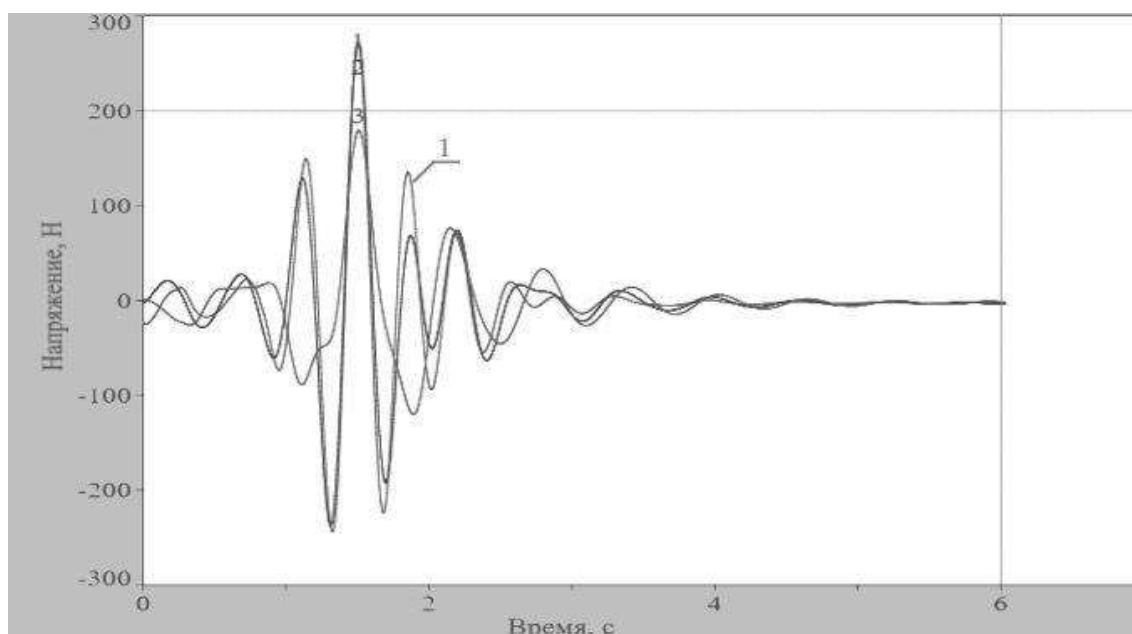


Рис. 2. Гармонические составляющие сложного периодического сигнала
Fig. 2. Harmonic components of a complex periodic signal

В ходе моделирования рассматривались значения возникающих максимальных поперечных сил при движении 3D вагона со скоростью 90 км/ч по участку протяженностью 1 300 м. На участке располагались кривая радиусом 1 000 м и две прямые длиной 100 м с разных сторон от кривой. Ограничение скорости 90 км/ч было обусловлено выбором тележки модели 18-100, которая подкатывается под все грузовые четырехосные магистральные вагоны (и в том числе цистерны) с осевыми нагрузками до 230 кН.

Далее представлены результаты моделирования для второй оси первой колесной пары. Именно под этой осью возникали максимальные поперечные силы.

Результаты моделирования показали, что погрешность между максимальными значениями поперечных сил составляет 5 % (0,046 т/ось) при сравнении сил, возникающих при движении полувагона и локомотива, 3,8 % (0,034 т/ось) – цистерна и локомотив и 8,7 % (0,080 т/ось) – полувагон и цистерна, т. е. разница между приложенной нагрузкой во всех случаях составляет меньше 1 т.

Для дальнейших расчетов были выбраны четырехосные полувагоны 12-132. Длина полувагона 13,92 м, длина базы 8,65 м, нагрузка 23 т/ось.

Влияние микрогеометрии пути на величину поперечных сил, возникающих при движении подвижного состава

Для учета микрогеометрии пути было проведено поочередное моделирование движения поезда с постоянной скоростью 80, 100 и 120 км/ч по кривым, имеющим радиус 1 200, 1 500, 2 000, 2 500 и 3 000 м. Кривые были выбраны для отдельных участков Сургутской дистанции пути Свердловской железной дороги. Выбор скоростей обусловлен «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», а именно тем фактором, что одним из перспективных направлений является

движение высокоскоростного подвижного состава и введение тяжеловесного движения поездов.

Были детально изучены максимальные поперечные силы на контакте «колесо – рельс» и места их возникновения. Анализ этих параметров показал, что наибольшие поперечные силы от прохода подвижного состава возникают в начале круговой кривой и в конце входной переходной кривой. Приведены результаты расчетов, по которым видно, что значения максимальных поперечных сил уменьшаются с увеличением радиуса круговой кривой и снижением скорости движения поездов (рис. 4).

В рамках дальнейших исследований планируется произвести расчеты модели для различных режимов движения поезда. Предварительные исследования показали, что силы, возникающие при тяге, холостом ходу и торможении, отличаются и различные режимы движения по-разному влияют на возникновение наибольших поперечных сил.

Влияние нарушений макрогеометрии пути на возникновение дополнительных сил от движения подвижного состава

Было выполнено моделирование движения 3D поезда с аналогичной осевой нагрузкой, скоростями движения и радиусами круговых кривых по участкам пути с отступлениями в плане, поочередно располагающимися в переходных кривых и круговой кривой (рис. 4).

В плане было принято отступление II степени. Такие отступления в плане являются наиболее распространенными и для них не требуется ограничение скоростей. Предварительно было произведено моделирование, результаты которого показали, что случаи совпадения направления отступления в плане и направления круговой кривой более опасно, чем случаи их разнонаправленности. Было принято решение проводить дальнейшее моделирование в

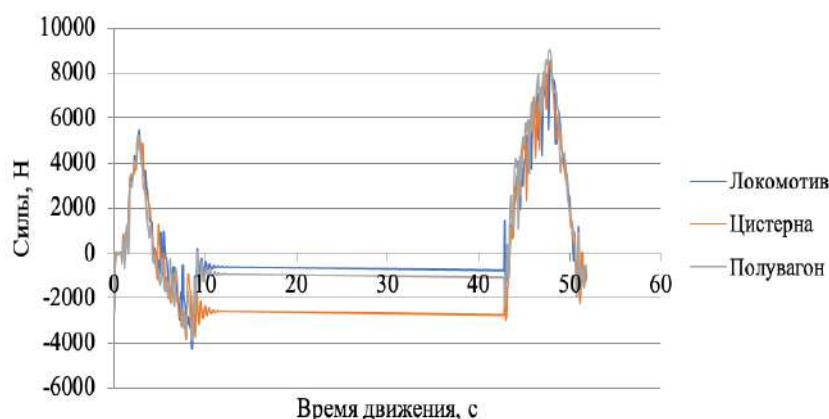


Рис. 3. Зависимость величины максимальной поперечной силы от времени движения подвижного состава для разных видов подвижной единицы (для второй оси первой колесной пары)

Fig. 3. Dependence of the magnitude of the maximum transverse force on the time of movement of the rolling stock for different types of rolling units (for the second axle of the first wheelset)

условиях совпадения их направлений.

Исследования показали, что наибольшие поперечные силы возникают на участке с отступлением или сразу за ним. При увеличении скоростей движения значения максимальных поперечных сил от прохода подвижного состава по отступлению в плане возрастают на 33 % в случае, если отступление находится в начале входной переходной кривой, и на 28 % – при расположении отступления в плане в конце выходной переходной кривой.

Сравнение результатов расчетов, выполненных на основе модели без нарушения геометрии пути и с ее нарушением, показало, что значения максимальных поперечных сил в среднем возрастают на 150 %. Это объясняется тем, что возникает дополнительная поперечная сила от отступления в плане H_p [12]. При этом если отступление в плане находится в круговой кривой, то значения максимальных поперечных сил в среднем возрастают в 10 раз. Предположительно это происходит из-за того, что в круговой кривой параметры макрогеометрии являются неизменными. При этом когда поезд заходит на измененный параметр микрогеометрии, то возникают большие резонансные силы. Эти силы в переходной кривой могут компенсироваться изменениями радиуса и возвышения, а в круговой кривой возможно их совместное взаимодействие с центробежной силой. За счет этого движение становится резко нестабильным. Для точного подтверждения или опровержения выдвинутой гипотезы необходимо проводить натурные исследования экспериментального полигона, где есть возможность исследовать реальные значе-

ния сил. При этом продолжительность исследований должна быть не менее чем от одного капитального ремонта до другого, чтобы проверить множество факторов и учесть их влияние.

Также исследования влияния макрогеометрии пути на возникновение дополнительных сил H_p от движения подвижного состава показало, что H_p составляет до 37 % от максимальных поперечных сил, возникающих при движении поезда по участкам без нарушений геометрии пути, для отступлений в плане, расположенных в прямой.

Важно отметить, что дополнительные силы H_p провоцируют дальнейшее развитие отступлений в плане при каждом проходе подвижного состава.

Заключение

Таким образом, хочется отметить, что хоть и имеется большое количество факторов, влияющих на поперечную устойчивость пути, часть из них, к примеру, поездную нагрузку, возможно изучать и прогнозировать их поведение при расчетах в программных комплексах, проведении испытаний на полигоне и дальнейшем аналитическом анализе полученных данных.

Для проведения моделирования в ПК УМ рекомендуется рассчитывать 5 соединенных 3D вагонов, шаг интегрирования – 5 см, при учете движения поезда с постоянной скоростью не менее 80 км/ч. Также в расчетах учитывать макро- и микрогеометрию пути.

Автор в рамках дальнейших исследований планирует более подробно раскрыть влияние нагрузки

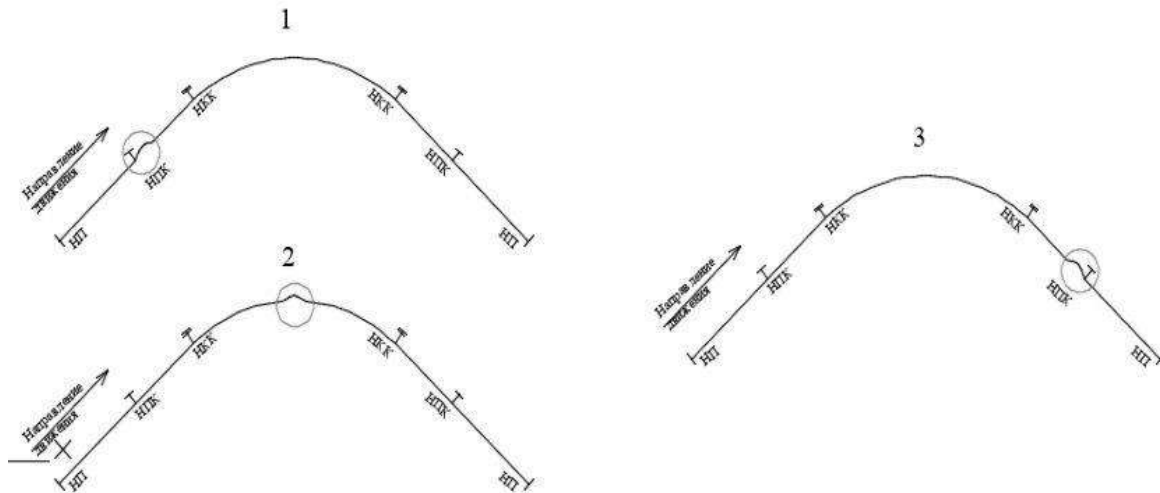


Рис. 4. Расположение отступления в плане:

1 – в начале входной переходной кривой;

2 – в середине круговой кривой

3 – в конце выходной переходной кривой

Fig. 4. Location of the deviation in the plan:

1 – at the beginning of the input transition curve; 2 – in the middle of the circular curve;

3 – at the end of the output transition curve

на поперечную устойчивость пути, что имеет большое значение для исследования инфраструктуры железных дорог.

Список литературы

1. Коган А.Я. Поперечные горизонтальные силы, возникающие от действия продольных температурных сил в рельсовых плетях бесстыкового пути и передаваемые на подшпальное основание / А.Я. Коган // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 5. С. 10–13.
2. Суслев О.А. Функциональная безопасность эксплуатации бесстыкового пути: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / Суслев Олег Александрович. М., 2017.
3. Мильников М.М. Оценка стабильности криволинейных участков пути в программном комплексе Pathcurve / М.М. Мильников, Ю.М. Кравченко // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. № 2(30). С. 19–28.
4. Лысюк В.С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблемы износа колес и рельсов / В.С. Лысюк. М.: Транспорт, 1997. 188 с.
5. Стоянович Г.М., Пупатенко В.В. Проблемы и перспективы укладки и содержания бесстыковой конструкции пути на Восточном полигоне ОАО «РЖД» // Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы: матер. Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием : В 3 т. Под редакцией С.М. Гончарука. 2015. С. 14–29.
6. Шахуняц, Г.М. Железнодорожный путь / Г.М. Шахуняц. Учеб. для студентов и аспирантов вузов железнодорожного транспорта. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: Транспорт, 1987. 479 с.
7. Новакович В.И. Об устойчивости бесстыкового пути / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, Н.И. Залавский // Журнал «Путь и путевое хозяйство». 2013. № 11. С. 19.
8. Мильникова М.А. Определение наиболее опасных мест выброса бесстыкового пути с учетом влияния отступлений в плане на его устойчивость / М.А. Мильникова // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2017. № 5. С. 192–195.
9. Мильникова М.А. Бализа как способ контроля за напряженным состоянием бесстыкового пути и движением поездов / М.А. Мильникова, С.Ю. Кияткина // Инновационный транспорт. 2018. № 2 (28). С. 39–43.
10. Скутина М.А. Влияние изменения температуры пути по поверхности и сечению рельса на устойчивость бесстыкового пути // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 81–85.
11. Скутин Д.А. Определение мест возникновения наибольших поперечных сил при движении подвижного состава по кривой // Вестник УрГУПС. 2017. № 2(34). С. 101–110.
12. Аккерман Г.Л., Скутин Д.А. Оценка поперечной устойчивости рельсошпальной решетки в балластной призме с применением геосинтетиков // Проектирование развития региональной сети железных дорог: сб. науч. тр. / под ред. В.С. Шварцфельда. 2015. № 3. С. 8–17.
13. Мильников М.М., Скутин А.И. Разработка модели возникновения поперечных сил в балластном слое под воздействием внешних нагрузок // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 4 (68). С. 220–230.
14. Исламов А.Р. Исследование сопряжения элементов продольного профиля железнодорожного пути посредством имитационного моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Исламов Айдар Рафатович. Санкт-Петербург, 2014.
15. Мильникова М.А. Мониторинг напряженного состояния бесстыкового пути при помощи бализы: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Мильникова Мария Александровна. Санкт-Петербург, 2019.
16. Мильникова М.А. Способ определения выброса плетей бесстыкового железнодорожного пути / М.А. Мильникова, Г.Л. Аккерман // Патент Россия №2687852, 2019.
17. Skutina M.A. Control over transverse shifts of rail sleeper lattice which impact on deformation of ballast layer / G.L. Akkerman, M.A. Skutina // Procedia Engineering. 2017. С. 181–185.
18. Скутина М.А. Прогнозирование выброса и разрыва рельсовой плети с использованием бализ, экспериментальное определение скорости изменения температурно-напряженного состояния рельсовых плетей / М.А. Скутина // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2016. № 4. С. 360–365.
19. Мильникова М.А. Организация мониторинга за напряженным состоянием бесстыкового пути / М.А. Мильникова, Г.Л. Аккерман // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2 (38). С. 50–56.

References

1. Kogan A.Ya. Poperechnye gorizontaľnyye sily, vznikayushchie ot deistviya prodol'nykh temperaturnykh sil v rel'sovykh pletyakh besстыkovogo puti i peredavaemye na podshpal'noe osnovanie [Transverse horizontal forces arising from the action of longitudinal temperature forces in the rail strings of a continuous welded track and transmitted to the sub-sleeper foundation]. *Vestnik VNIIZHT [Vestnik of the Railway Research Institute]*, 2011. No. 5. Pp. 10–13.
2. Suslov O.A. Funktsional'naya bezopasnost' ekspluatatsii besстыkovogo puti: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.06 [Functional safety of operation of a continuous welded track: D. Sc. (Engineering) diss.: 05.22.06]. Moscow, 2017.
3. Myl'nikov M.M., Kravchenko Yu.M. Otsenka stabil'nosti krivolineinykh uchastkov puti v programmnom komplekse Pathcurve [Evaluation of the stability of curved sections of the track in the Pathcurve software package]. [*Herald of the Ural State University of Railway Transport*], 2016. No. 2 (30). Pp. 19–28.

4. Lysyuk V.S. Prichiny i mekhanizm skhoda kolea s rel'sa. Problemy iznosa kolei i rel'sov [Reasons and mechanism of the wheel derailment. Problems of wear of wheels and rails]. Moscow: Transport Publ., 1997. 188 p.
5. Stoyanovich G.M., Pupatenko V.V. Problemy i perspektivy ukladki i sodержaniya besstykovoi konstruktssii puti na Vos-tochnom poligone OAO «RZhD» [Problems and prospects of laying and maintenance of continuous welded track structure on the Eastern Polygon of «Russian Railways» OAO]. *Povyshenie effektivnosti transportnoi sistemy regiona: problemy i perspektivy: mater. Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem : V 3 t. [In the collection: Improving the efficiency of the transport system in the region: problems and prospects materials of the all-Russian scientific and practical conference with international participation: In 3 volumes]*. In Goncharuk S.M. (ed.), 2015. Pp. 14–29.
6. Shakhnyants G.M. Zheleznodorozhnyi put'. Ucheb. dlya studentov i aspirantov vuzov zheleznodorozhnogo transporta. Izd. 3-e, pererab. i dop. [Railway track. A textbook for students and postgraduates of railway transport universities. 3rd ed., revised and enlarged]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.
7. Novakovich V.I., Karpachevskii G.V., Zalavskii N.A. Ob ustoychivosti besstykovogo puti [On the stability of the continuous welded track]. *Put' i putevoe khozyaistvo [Railway track and facilities]*, 2013. No. 11. Pp. 19.
8. Myl'nikova M.A. Opredelenie naibolee opasnykh mest vybrosa besstykovogo puti s uchedom vliyaniya otstuplenii v plane na ego ustoychivost' [Determination of the most dangerous places of the continuous welded track distortion with regard to the influence of deviations in the plan for its sustainability]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog [Designing the development of the regional railway network]*, 2017. No. 5. Pp. 192–195.
9. Myl'nikova M.A., Kiyatkina S.Yu. Baliza kak sposob kontrolya za napryazhennym sostoyaniem besstykovogo puti i dvizheniem poezdov [Balise as a means of controlling the stress state of the continuous welded track and train traffic]. *Innovatsionnyi transport [Innovative transport]*, 2018. No. 2 (28). Pp. 39–43.
10. Skutina M.A. Vliyanie izmeneniya temperatury po poverkhnosti i secheniyu rel'sa na ustoychivost' besstykovogo puti [Influence of temperature changes on the surface and cross-section of the rail on the stability of a continuous welded track]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2017. No. 1 (52). Pp. 81–85.
11. Skutin D.A. Opredelenie mest vozniknoveniya naibol'shikh poperechnykh sil pri dvizhenii podvizhnogo sostava po krivoi [Determining the places of occurrence of the greatest transverse forces when moving a rolling stock along a curve]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta [Herald of the Ural State University of Railway Transport]*, 2017. No. 2(34). Pp. 101–110.
12. Akkerman G.L., Skutin D.A. Otsenka poperechnoi ustoychivosti rel'soshpal'noi reshetki v ballastnoi prizme s primeneniem geosintetkov [Estimation of the transverse stability of the rail-sleeper grid in a ballast prism using geosynthetics]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog: sb. nauch. tr. [The development of a regional network of railways: a collection of research works]*. In Sarsfield V. S. (ed.), 2015. No. 3. Pp. 8–17.
13. Myl'nikov M. M., Skutin A.I. Razrabotka modeli vozniknoveniya poperechnykh sil v ballastnom sloe pod vozdeistviem vneshnikh nagruzok [Development of a model for the occurrence of transverse forces in a ballast layer under the influence of external loads]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2020. No. 4 (68). Pp. 220–230.
14. Islamov A.R. Issledovanie sopryazheniya elementov prodol'nogo profilya zheleznodorozhnogo puti posredstvom imitatsionnogo modelirovaniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.06 [Research of conjugation of elements of a longitudinal profile of a railway track by means of simulation modeling: an author's abstract of the Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.06]. Saint Petersburg, 2014.
15. Myl'nikova M.A. Monitoring napryazhennogo sostoyaniya besstykovogo puti pri pomoshchi balizy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.06 [Monitoring of the stress state of the continuous welded track with the help of a balise: abstract of the Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.06]. Saint Petersburg, 2019.
16. Myl'nikova M.A., Akkerman G.L. *Sposob opredeleniya vybrosa pletei besstykovogo zheleznodorozhnogo puti [A method for determining the discharge of lashings of a non-jointed railway track]*. Patent Russia No. 2687852, 2019.
17. Skutina M.A., Akkerman G.L. Control over transverse shifts of rail sleeper lattice which impact on deformation of ballast layer. *Procedia Engineering*, 2017. Pp. 181–185.
18. Skutina M.A. Prognozirovanie vybrosa i razryva rel'sovoi pleti s ispol'zovaniem baliz, eksperimental'noe opredelenie skorosti izmeneniya temperaturno-napryazhennogo sostoyaniya rel'sovykh pletei [Prediction of distortion and breakage of the rail string using balises, experimental determination of the rate of change of temperature and stress state rail strings]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog [Design for the development of regional railway networks]*, 2016. No. 4. Pp. 360–365.
19. Myl'nikova M.A., Akkerman G.L. Organizatsiya monitoringa za napryazhennym sostoyaniem besstykovogo puti [Organization of monitoring of the strained state of the continuous welded track]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Herald of the Ural State University of Railway Transport]*, 2018. No. 2 (38). Pp. 50–56.

Информация об авторах

Мильникова Мария Александровна – канд. техн. наук, ассистент кафедры пути и железнодорожного строительства, Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: mylnikova.ma93@gmail.com

Information about the authors

Mariya A. Myl'nikova – Ph. D. in Engineering Science, assistant of the Subdepartment of Railway Track and Railway Construction, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, e-mail: mylnikova.ma93@gmail.com

Влияние параметров плана на устойчивость балластной призмы железнодорожного пути

М. М. Мыльников✉

Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ mmmynikov@ya.ru

Резюме

Устойчивость рельсошпальной решетки железнодорожного пути во многом зависит от условий эксплуатации. Часто на практике не удается содержать путь в условиях, предъявляемых нормативными требованиями. В этой связи природа поведения отдельных элементов пути под подвижными нагрузками остается неизученным вопросом. Для изучения механизма образования усилий в элементах верхнего строения пути при движущихся поездных нагрузках рассматривается действующий участок железнодорожной линии. По имеющейся проектной документации строится компьютерная модель перегона длиной около 11 км, которая отражает основные плановые проектные решения с учетом современных требований железнодорожного строительства. Осуществляется компьютерное моделирование нагружений от движущегося подвижного состава из пяти груженных полувагонов. Определяются величины поперечных сил на протяжении всего экспериментального участка с заданным шагом. По результатам моделирования определена зависимость возникающей поперечной силы от радиуса круговой кривой. Для второй серии экспериментов определено фактическое реальное положение рельсовых нитей в плане. Используются аэрофотоснимки высокой четкости, по которым построена цифровая модель железнодорожного пути на рассматриваемом экспериментальном участке. Положение оси пути аппроксимировано – подобраны такие параметры плана пути (радиусы кривых, длины прямых вставок, круговых и переходных кривых), которые наиболее близки к фактическому плановому положению пути. Определены значения точек, в которых путь отклоняется в плане от оси пути. Такие значения рихтовок определены на протяжении всего пути и внесены в компьютерную модель. Выполнено компьютерное моделирование нагружений подвижным составом с постоянной скоростью. По результатам эксперимента определены значения поперечных сил на контакте «колесо – рельс», выявлены зависимости возникающей поперечной силы от радиусов криволинейных участков с учетом фактических отступлений в плане.

Ключевые слова

железнодорожный путь, устойчивость пути, поперечные силы, вертикальные нагрузки, компьютерное моделирование, план пути

Для цитирования

Мыльников М. М. Влияние параметров плана на устойчивость балластной призмы железнодорожного пути // М. М. Мыльников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 156–164. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).156-164

Информация о статье

поступила в редакцию: 09.11.2020, поступила после рецензирования: 22.11.2020, принята к публикации: 07.12.2020

The influence of parameters of the plan on the railways ballast section stability

М. М. Mylnikov✉

The Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, the Russian Federation

✉ mmmynikov@ya.ru

Abstract

The stability of the railway track depends by the operating conditions. Often, when in practice, it is not possible to maintain the track to the conditions imposed by regulatory requirements. In this regard, the behavior of some railway elements under moving loads remains an unstudied question. The operable section of the railway line has been considered to study the mechanism of force formation in the elements of the track upper structure under moving train loads. The computer model of a railway haul of about 11 km long is built according to the available design documentation. This model reflects the main planned design solutions, considering modern railway construction requirements. The computer simulation of loads from a moving rolling stock, consisting of five loaded gondola cars is performed. The values of transverse forces are determined throughout the entire experimental section with a given pitch. The dependence of the resulting transverse force on the radius of the circular curve has been determined according to the simulation results. For the second series of experiments, the actual position of the rails in the plan is determined.

High-definition aerial photographs are used to construct a digital model of the railway track for the experimental section under review. The position of the track axis is approximated. It means that the selected parameters of the track in the plan (radii of curves, lengths of straight inserts, circular and transition curves) are most close to the actual planimetric position of the track. The values of the points at which the track deviates from the track axis in the plan are determined. These straightening values are determined throughout the entire track and are entered into the computer model of the track. Computer simulation of rolling stock loads at a constant speed is performed. The values of the transverse forces at the “wheel – rail” contact were determined according to the results of the experiment. The dependences of the resulting transverse force on the radius of curved sections are revealed, considering the actual deviations in the plan.

Keywords

railway track, the track stability, transverse forces, vertical loads, computer simulation, track plan

For citation

Myl'nikov M. M. Vliyanie parametrov plana na ustoychivost' ballastnoi prizmy zheleznodorozhnogo puti [The influence of parameters of the plan on the railways ballast section stability]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 156–164. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).156-164

Article Info

Received: 09.11.2020, Revised: 22.11.2020, Accepted: 07.12.2020

Введение

Стабильная и бесперебойная работа железнодорожного пути зависит от множества факторов, в том числе и от слаженности работы составляющих элементов пути. Балластный слой – одно из ключевых звеньев верхнего строения пути. В частности от работы балласта в конечном итоге зависит работа рельсошпальной решетки и, как следствие, пути в целом. Ключевая задача балластной призмы – обеспечение стабильного положения рельсовых нитей и перераспределение поездных нагрузок на нижнее строение пути. Стоит заметить, что величина воздействий, возникающих в элементах пути, будет зависеть не только от тяжести перевозимого груза, но и от условий эксплуатации пути. Однако действующая нормативная база, регулирующая эксплуатацию железной дороги, сформирована таким образом, что предъявляемые нормы справедливы для путей, находящихся в исправном состоянии и соответствующим требованиям Правил технической эксплуатации [1] и других действующих норм [2–4]. Величины отклонений от нормы, при которых допускается эксплуатация пути, регламентируются, но на практике оказывается, что к моменту очередного ремонта элемент пути становится полностью изношенным.

Такая ситуация складывается, например, с балластным слоем, когда к началу капитального ремонта пути щебень оказывается загрязнен почти полностью [5–8], при том, что допускаемая загрязненность по нормам составляет до 30 % [3]. Помимо внешних загрязнителей от перевозимых грузов щебень активно загрязняется от естественного износа. Отдельные зерна щебенки истираются, измельчаются на более мелкие фрагменты. Происходит процесс уменьшения фракции щебня, лежащего в пути [9]. Природа ослабления щебня формируется еще на стадии изготовления балластного материала, ввиду повсеместного использования добываемыми пред-

приятиями устаревших технологий производства работ [10]. Это приводит к тому, что в равной степени большая часть эксплуатируемого пути подвержена дополнительному фактору ослабления устойчивости. С другой стороны, действующими нормами, регулирующими применение балластного материала в железнодорожной отрасли [11], до сих пор не предъявляются твердые требования по несущей способности балластного материала [12]. Учитывая, что балласт в процессе эксплуатации находится под воздействием значительных вибродинамических нагрузок и при этом техническое состояние балластного материала отличается от нормативного – это осложняет прогнозирование стабильного состояния железнодорожного пути в целом.

Таким образом, имея ввиду, что путь может эксплуатироваться со значительными отклонениями от нормы, необходима проработка вопроса возникновения воздействий в элементах при состояниях пути, отличающихся от нормативных.

Воздействия в элементах пути

Работа пути и подвижного состава описывается «Методикой воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности». От поездных нагрузок в элементах верхнего строения пути образуются напряжения [13]. Величины допускаемых напряжений, при которых путь может работать стабильно, нормируются [14]. Если напряжения превышают допустимые нормы, то считается, что конструкция пути может претерпеть деформации. Нарушение конструкции в свою очередь может привести к крушениям и авариям. Возникновение напряжений в элементах пути происходит по причине воздействия на путь вертикальных и поперечных нагрузок от поездов. Наиболее опасными являются поперечные воздействия, поскольку они способствуют возникновению поперечного сдвига рельсошпальной решетки, что является прямой

угрозой безопасности движения поездов.

Сила, стремящаяся удержать рельсошпальную решетку в балласте, зависит от возможностей сопротивления шпалы о балластный материал (сила трения) и вертикальной нагрузки, прижимающей шпалу к балласту в вертикальной плоскости [15]. В свою очередь на сдвигающую силу будут влиять следующие факторы: скорость движения поезда, параметры плана линии (величина радиусов криволинейных участков пути), отступления в плане (неровности поверхности катания) [16]. Удерживающая сила – постоянная величина для конкретного экипажа и участка пути. Сдвигающая сила может варьироваться. При тяжелых условиях эксплуатации (кривые малых радиусов) или же при эксплуатации пути при условиях, отличающихся от нормативных, может произойти ситуация, когда величина сдвигающей силы превзойдет удерживающую и наступит момент потери устойчивости – крушение или авария. Для того чтобы избежать таких ситуаций необходимо иметь представление о том, каким образом в количественном исчислении влияет тот или иной фактор на величину сдвигающей силы.

Компьютерное моделирование поперечных усилий на контакте «колесо – рельс» для проектного плана линии

Для определения поперечных сил, возникающих в пути, выбран участок Южно-Уральской железной дороги (рис. 1), на котором в недавнем времени был выполнен капитальный ремонт пути.

Силы от прохода подвижного состава определялись в программном комплексе Универсальный механизм [17] (рис. 2). В качестве подвижной нагрузки

использовался экипаж из пяти груженых полувагонов. Измерялись суммарные поперечные нагрузки на первой колесной паре. Время и шаг моделирования задавались из расчета получения измерений каждые 5–10 см пути, т. е. с достаточно высокой точностью.

Порядок проведения эксперимента по компьютерному моделированию поперечных нагрузок в контакте «колесо – рельс» был следующим. На первом этапе была поставлена цель – определить нагрузки для пути, находящегося в исходном нормативном состоянии, том, которое было предусмотрено проектными решениями. Для этого была проанализирована проектная документация рассматриваемого участка, а именно, рассмотрен проектный план пути. Величины прямых участков и параметров кривых участков пути были оформлены в модель макрогеометрии пути.

Суммарная длина участка составила 10 595 м. На участке имелось восемь круговых кривых, одна из которых была составная из трех радиусов, и девяти прямых. Радиусы кривых варьировались от 630 м до 2 200 м. Прямые вставки в отдельных случаях составляли 82 м, но как правило были более 300 м. Влияние значений отметок продольного профиля не рассматривалось, таким образом моделировалась ситуация движения по площадке, однако проектные возвышения наружного рельса при необходимости учитывались. Скорость подвижного состава задавалась постоянной и составляла 60 км/ч. Полученные значения поперечных сил на протяжении участка моделирования показаны (рис. 3).

Закономерно увеличивается величина поперечной силы при движении экипажа по кривой. На гра-

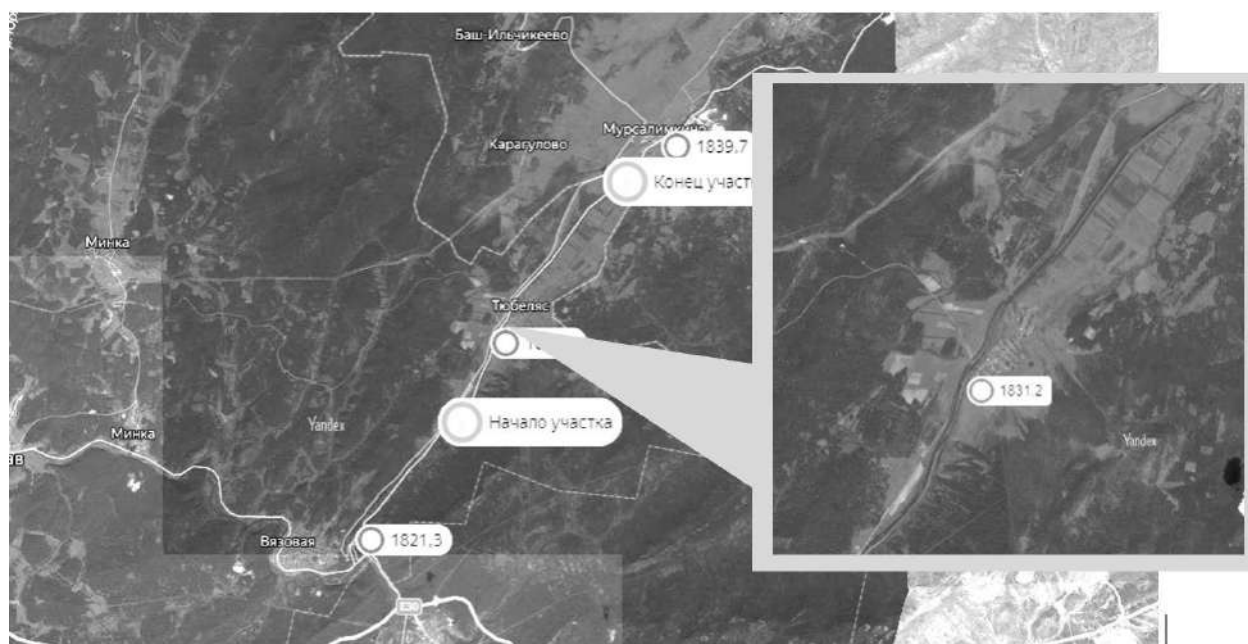


Рис. 1. Экспериментальный участок
Fig. 1. Experimental area

фике заметно, что величина силы коррелирует с величиной радиуса кривого участка. Для более детального анализа приведена зависимость возникающей поперечной силы от радиуса криволинейного участка пути (рис. 4).

Из рисунка видно, что величина отношения значения поперечной силы от радиуса составляет порядка 4,7. Это означает, что уменьшение радиуса

кривой на каждые 100 м приводит к увеличению поперечного усилия, возникающего в элементах пути до 0,47 кН, что усугубляет возможность пути препятствовать внешним нагрузкам. В дальнейшем ставилась цель сравнить полученные проектные значения возникающих усилий с теми, которые фактически образуются в пути в момент эксплуатации.

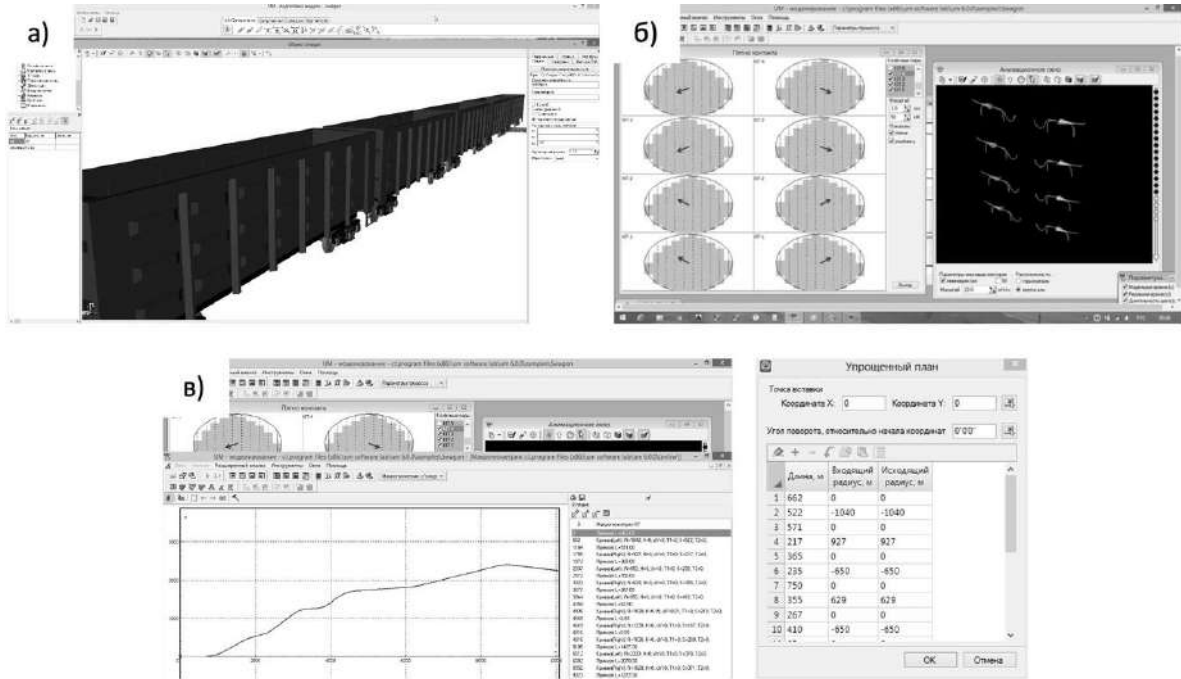


Рис. 2. Компьютерное моделирование:

a – модель подвижного состава; б – макрогеометрия пути; в – силы на контакте «колесо – рельс»

Fig. 2. Computer simulation:

a – rolling stock model; b – track macrogeometry; c – “wheel – rail” contact forces



Рис. 3. Значения поперечных сил первого этапа эксперимента (проектный план)

Fig. 3. Values of the transverse forces of the first stage of the experiment (project plan)

Компьютерное моделирование поперечных усилий на контакте «колесо – рельс» при фактическом состоянии пути

Для второй серии экспериментов необходимо было определить фактические значения положения рельсошпальной решетки в плане. Для этого для рассматриваемого участка получены аэрокосмические снимки высокой четкости (рис. 5). Разрешение

снимков позволяло определить отдельные элементы пути, а значит и построить цифровую модель пути по рельсовым нитям. Для решение этой задачи был использован программный комплекс «Топоматик Робуг – Железные дороги» [18]. Путем аппроксимации фактического планового положения рельсов (рис. 6) определены параметры плана пути: длины прямых вставок и характеристики криволинейных

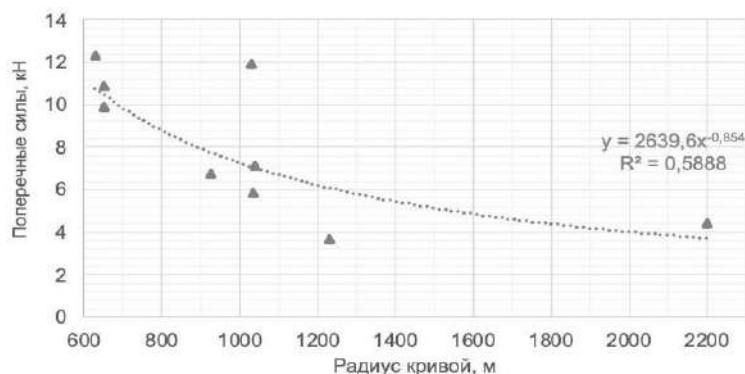


Рис. 4. Зависимость возникающей поперечной силы от радиуса кривой (проектный план)

Fig. 4. Dependence of the resulting transverse force by the radius of the curve (project plan)



Рис. 5. Фрагмент аэрофотоснимка высокой четкости экспериментального участка

Fig. 5. Fragment of a high-definition aerial photo of the experimental area

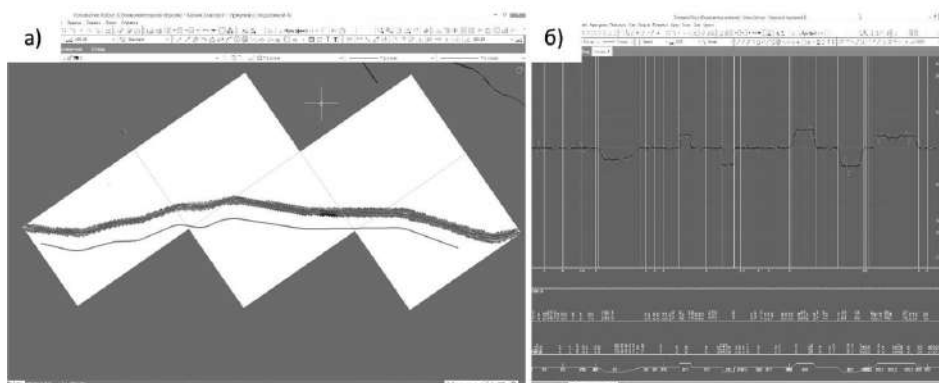


Рис. 6. Обработка данных фактического плана экспериментального участка:

a – аппроксимация планового положения рельсошпальной решетки; *б* – определение рихтовок пути

Fig. 6. Processing of the data of the actual plan of the experimental section:

a – approximation of the planimetric position of the rail-sleeper grid;

b – determination of the alignment of the track

участков: уточнены величины радиусов и длин переходных кривых. Так величины отклонения радиусов от проектных значений в отдельных случаях составляют 100–200 м, но в среднем не превышают 50 м. Также были определены величины рихтовок – величины отклонения рельсовых нитей в плане. Рихтовки были отмечены в характерных точках – в наиболее удаленных от проектной оси местах.

По результатам анализа участка были составлены ведомости элементов плана, а также ведомость рихтовок. Полученные значения использовались для уточнения исходных данных компьютерного моделирования, а именно, параметры плана участка моделирования стали соответствовать фактическому

положению рельсошпальной решетки на участке. Рихтовки в свою очередь были указаны в разделе неровности параметров интегрирования модели пути. Далее было произведено моделирование прохода по участку подвижного состава с параметрами скорости и нагрузки как при первом эксперименте. Результаты колебания поперечных усилий представлены (рис. 7), показаны полученные зависимости возникающей поперечной силы от радиуса криволинейного участка пути (рис. 8).

Детальное сравнение значений возникающей поперечной силы от нагрузки подвижного состава на отдельных элементах экспериментального участка показывает, что при пути с неисправностями значе-

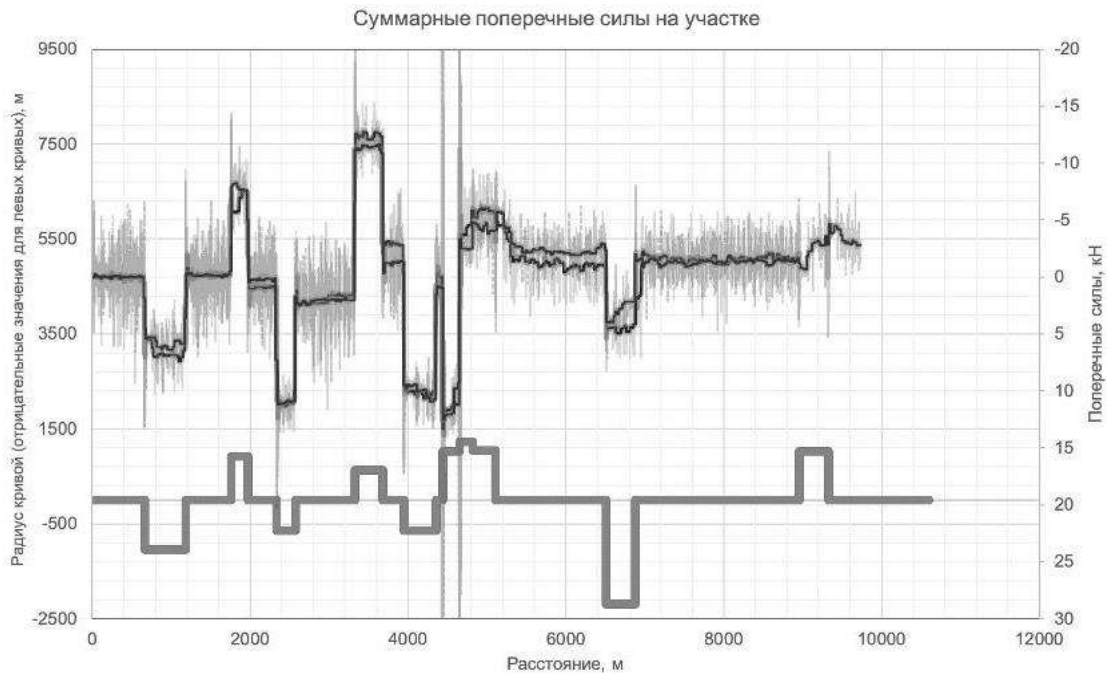


Рис. 7. Значения поперечных сил первого этапа эксперимента (фактический план)

Fig. 7. Values of the transverse forces of the first stage of the experiment (actual plan)

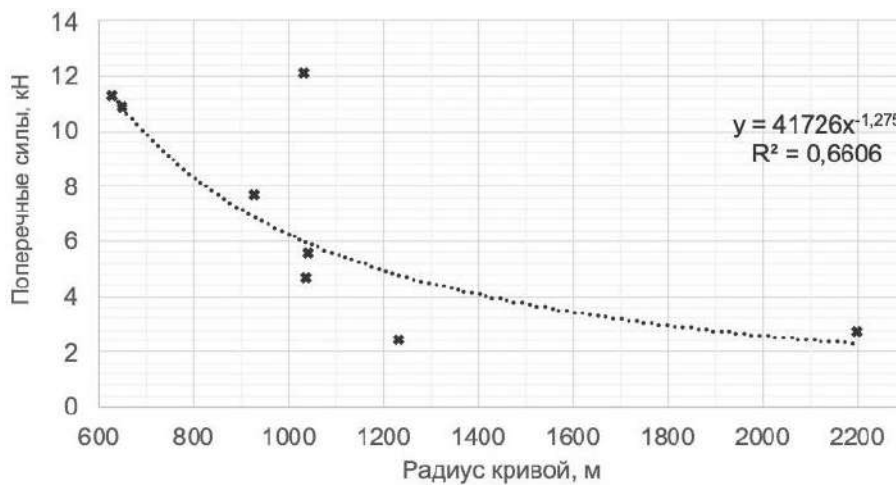


Рис. 8. Зависимость возникающей поперечной силы от радиуса кривой (фактический план)

Fig. 8. Dependence of the resulting transverse force by the radius of the curve (actual plan)

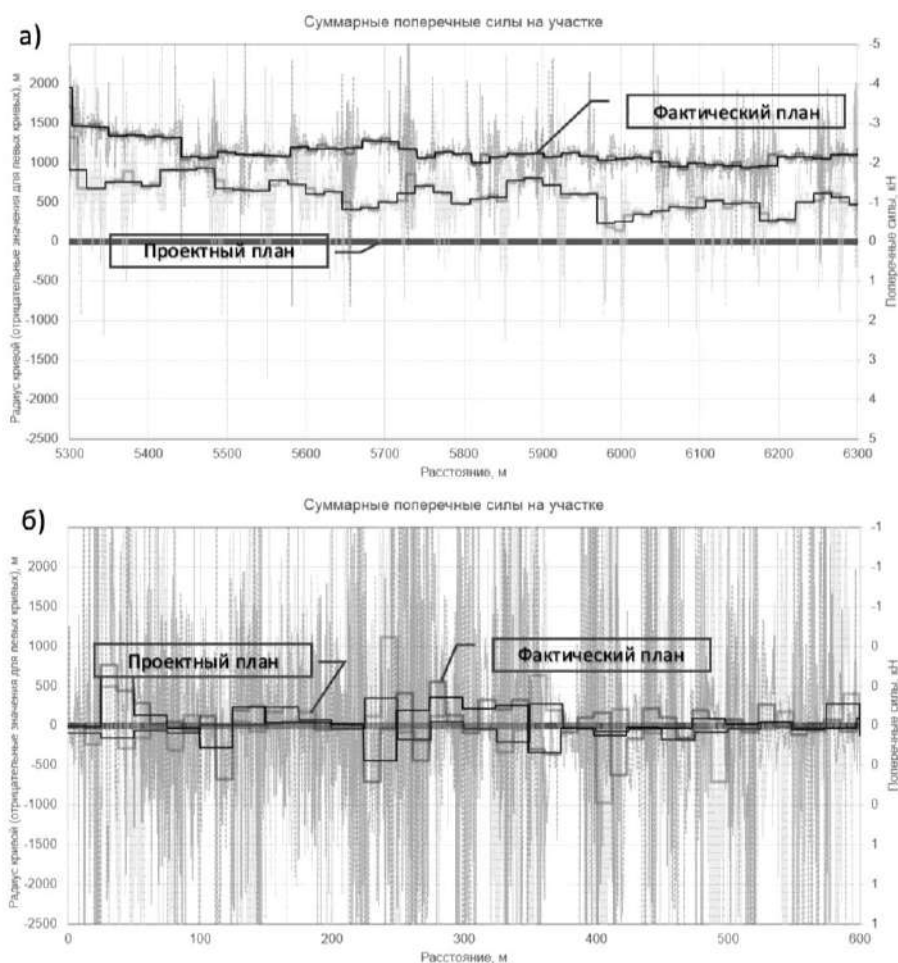


Рис. 9. Сравнение поперечных сил при проектном и фактическом плане пути:

a – участок ПК 53+00 – ПК 63+00; *б* – участок ПК 0+00 – ПК 6+00

Fig. 9. Comparison of transverse forces in the design and actual track plan:

a – section PK 53+00 – PK 63+00; *b* – section PK 0+00 – PK 6+00

ние сдвигающей поперечной силы может значительно увеличиваться (рис. 9). Так на прямом участке ПК 0+00 – ПК 6+00 значение поперечной силы на пути с отступлениями в плане составляет 115 % по сравнению со значениями пути при проектном положении рельсовых нитей, а на участке ПК 53+00 – ПК 63+00 это расхождение достигает уже 190 %. В криволинейных участках пути тенденция такова, что при уменьшении радиуса пути как правило значение поперечной силы увеличивается.

Заключение

Создание условий для обеспечения устойчивости пути как способности бесперебойно воспринимать поездные нагрузки и перерабатывать их – важная эксплуатационная задача, которая на практике не всегда может быть решена вовремя. Конечно, при проектировании элементов пути учитываются риски возможных маловероятных исходов, путем заклады-

вания различных повышающих коэффициентов запаса. Тем не менее понимание природы возникновения таких рисков, т.е. факторов усугубляющих эксплуатационное состояние элементов пути – позволит снизить неопределенность в вопросе поперечной устойчивости пути, что может не только положительно сказаться на стабильной работе пути, но и создать предпосылки для снижения эксплуатационных расходов на его содержание.

Полученные зависимости возникающих поперечных сил от внешних нагрузок подвижного состава, зависящих от параметров плана пути, – первый шаг к пониманию природы возникновения боковых усилий при отягчающих, но естественных обстоятельствах эксплуатации, таких как рихтовка. Автор продолжает работу в данном направлении с целью рассмотрения более полного спектра скоростей обращения подвижного состава и исследования криволинейных участков с другими параметрами плана пути.

Список литературы

1. Приказ Минтранса России «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (с изменениями на 9 февраля 2018 года)» от 21 декабря 2010 г. № 286 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. 2011 г. № 12. с изм. и допол. в ред. от 25 декабря 2018 г.
2. СП 238.1326000.2015 Железнодорожный путь // cntd.ru: профессиональные справочные системы «Техэксперт» URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200124323> (дата обращения: 09.03.2021).
3. Распоряжение ОАО «РЖД» «Об утверждении и введении в действие Положения о системе ведения путевого хозяйства ОАО «РЖД» от 31 декабря 2015 № 3212р // Документ опубликован не был.
4. Распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 N 2544р «Об утверждении и введении в действие Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути» // Документ опубликован не был.
5. Скутин А.И., Мылников М.М. О качестве щебня в балластной призме железных дорог // РСП Эксперт. 2018. №6-7 (110-111). С. 30–31.
6. Макагонов Р.А., Цигипов А.Д. Оценка загрязненности балласта на путях 3–4 класса // Современные наукоёмкие инновационные технологии. Уфа: АЭТЕРНА, 2018. С. 76–79.
7. Абрашитов А.А., Зайцев А.А., Семак А.В., Шаврин Л.А. Оценка источников загрязнения балластного слоя из гранитного щебня и моделирование разрушения и истирания ча-стиц щебня при динамическом нагружении // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. М.: 2017. С. 184–187.
8. Anbazhagan P., Bharatha T.P., Amarajeevi G. Study of Ballast Fouling in Railway Track Formations // Indian Geotechnical Journal. 2012. № 2. С. 87–99.
9. Железнодорожный путь: учебник / Е.С. Ашпиз, А.И. Гасанов, Б.Э. Глюзберг и др.; под ред. Е.С. Ашпиза. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. 544 с.
10. Скутин А.И. О качестве щебня, применяемого в транспортном строительстве // Инновационный транспорт. 2019. № 1(31). С. 25–28.
11. ГОСТ «Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия» от 09 июля 2015 № 7392-2014 // Официальное издание. М.: Стандартинформ. 2015 г.
12. Колос А.Ф., Осипов Г.В., Клищ С.А., Леус А.С., Каминный О.А. Исследование прочностных свойств щебня, применяемого для балластного слоя железнодорожного пути // Научные исследования: ключевые проблемы III тысячелетия. М.: Проблемы науки, 2018.
13. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. трансп./ В.В. Виноградов, А.М. Никонов, Т.Г. Яковлева и др.; под ред. В.В. Виноградова и А.М. Никонова. М.: Маршрут, 2003. 486 с.
14. ЦПТ-52/14 Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утвержденная МПС России 16 июня 2000 г.
15. Железнодорожный путь / Т.Г. Яковлева, Н.И. Карпушенко, С.И. Клинов, Н.Н. Путря, С.П. Смирнов; под ред. Т.Г. Яковлевой. М.: Транспорт. 1999. 405 с.
16. Железнодорожный путь: учебник для студентов и аспирантов вузов железнодорожного транспорта / Г.М. Шахунянц. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1987. 479 с.
17. Манчестерские тесты для моделирования рельсовых экипажей // umlab.ru: Программный комплекс Универсальный механизм (UM). URL: <http://www.umlab.ru/download/docs/rus/part10.pdf> (дата обращения: 09.03.2021).
18. Сертификат соответствия № RA.RU.AB86.H001126 «Топоматик Robur – Железные дороги» от 19 сентября 2020 г.

References

1. Prikaz Mintransa Rossii «Ob utverzhdanii Pravil tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii (s izmeneniyami na 9 fevralya 2018 goda)» ot 21 dekabrya 2010 g. No. 286 [The order of the Ministry of Transport of the Russian Federation “On Approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation (as amended on February 9, 2018)” dated December 21, 2010 No. 286] // *Byulleten' normativnykh aktov federal'nykh organov ispolnitel'noi vlasti. 2011 g. No. 12. s izm. i dopol. v red. ot 25 dekabrya 2018 g.* [*Bulletin of normative Acts of federal executive bodies, 2011, No. 12 with amendments and additions from December 25, 2018*].
2. SP 238.1326000.2015 Zheleznodorozhnyi put' // cntd.ru: professional'nye spravochnye sistemy «Tekhekspert» [SP 238.1326000.2015 Railway track. Cntd.ru: professional reference systems “Techexpert”] [Electronic media]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200124323> (Accessed: March 09, 2021).
3. Rasporyazhenie OAO «RZhD» «Ob utverzhdanii i vvedenii v deistvie Polozheniya o sisteme vedeniya putevogo khozyaistva OAO «RZhD» ot 31 dekabrya 2015 No. 3212r / [The order of “Russian Railways” OAO “On approval and introduction of the Regulation on the system of track management of “Russian Railways” OAO dated December 31, 2015 No. 3212r]. The document was not published.
4. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 14.12.2016 N 2544r «Ob utverzhdanii i vvedenii v deistvie Instruksii po ustroystvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti» [The order of «Russian Railways” OAO of 14.12.2016 N 2544r “On the approval and introduction of the Instructions for the device, laying, maintenance and repair of the joint-free track”]. The document was not published.
5. Skutin A.I., Myl'nikov M.M. O kachestve shchebnya v ballastnoi prizme zheleznykh dorog [On the quality of crushed stone in the ballast prism of railways]. *RSP Ekspert [The RSP Expert]*, 2018. No. 6-7 (110-111), pp. 30–31.
6. Makagonov R.A., Tsigipov A.D. Otsenka zagryaznennosti ballasta na putyakh 3–4 klassa [Assessment of ballast pollution on the paths of 3-4 classes] // *Sovremennye naukoemkie innovatsionnye tekhnologii [Modern science-intensive innovative technologies]*. Ufa: AETERNA Publ., 2018. Pp. 76–79.

7. Abrosimov A.A., Zaitsev A.A., Semak, V.A., Shavrin L.A. Otsenka istochnikov zagryazneniya ballastnogo sloya iz granitnogo shchebnya i modelirovanie razrusheniya i istiraniya chastits shchebnya pri dinamicheskom nagruzhenii [Evaluation of sources of contamination of the ballast layer of crushed granite and simulation of fracture and abrasion of particles of crushed rock under dynamic loading] // *Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti* [Modern problems of design, construction and operation of railway journey]. Moscow: 2017. Pp. 184–187.
8. Anbazhagan P., Bharatha T.P., Amarajeevi G. Study Fouling of Ballast in Railway Track Formations // *Indian Geotechnical Journal*, 2012. No. 2. Pp. 87–99.
9. Ashpiz E.S., Khasanov A.I., Gluzberg B.E. et al.; Zheleznodorozhnyi put': uchebnik [Railway track: a textbook]. In Ashpiz E.S. (ed.) Moscow: FGBOU "Training centre for education in railway transport" Publ., 2013. 544 p.
10. Skutin A.I. O kachestve shchebnya, primenyaemogo v transportnom stroitel'stve [On the quality of crushed stone used in transport construction] // *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2019. No. 1(31), pp. 25–28.
11. GOST «Shcheben' iz plotnykh gornykh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya» ot 09 iyulya 2015 No. 7392-2014 // Ofitsial'noe izdanie [GOST "Crushed stone from dense rocks for the ballast layer of the railway track. Technical conditions" dated July 09, 2015 No. 7392-2014. Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2015.
12. Kolos A.F., Osipov G.V., Klishch S.A., Leus A.S., Kaminyk O.A. Issledovanie prochnostnykh svoystv shchebnya, primenyaemogo dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti [Investigation of the strength properties of crushed stone used for the ballast layer of the railway track] // *Nauchnye issledovaniya: klyuchevye problemy III tysyacheletiya* [Scientific research: key problems of the III millennium]. Moscow: Problemy nauki Publ., 2018.
13. Vinogradov V.V., Nikonov A.M., Yakovleva T.G. et al. Raschet i proektirovanie zheleznodorozhnogo puti: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov zh.-d. transp. [Calculations and design of the railway track: a textbook for railway transport university students]. In Vinogradov V.V. and Nikonov A.M. (eds.) Moscow: Marshrut Publ., 2003. 486 p.
14. TsPT-52/14 Metodika otsenki vozeistviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utverzhennaya MPS Rossii 16 iyunya 2000 g. [TSPT-52/14 A methodology for assessing the impact of rolling stock on the track according to the conditions for ensuring its reliability, approved by the Ministry of Transport of Russia on June 16, 2000].
15. Yakovleva T.G., Karpushchenko N.I., Klinov S.I., Putrya N.N. et al. Zheleznodorozhnyi put' [The railway track]. In Yakovlev T.G. (ed.) Moscow: Transport Publ., 1999. 405 p.
16. Shakhunyan G.M. Zheleznodorozhnyi put': uchebnik dlya studentov i aspirantov vuzov zheleznodorozhnogo transporta. Izd. 3-e, pererab. i dop. [The railway track: a textbook for students and postgraduates of railway transport universities. Third edition, revised and enlarged]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.
17. Manchesterskie testy dlya modelirovaniya rel'sovykh ekipazhei. Umlab.ru: Programmnyi kompleks Universal'nyi mekhanizm (UM). [Manchester tests for modeling rail crews. Umlab.ru: Universal Mechanism (UM) Software Package [Electronic media]. URL: <http://www.umlabor.ru/download/docs/rus/part10.pdf> (Accessed: March 09, 2021).
18. Sertifikat sootvetstviya No. RA.RU.AB86.N001126 «Topomatik Robur – Zheleznye dorogi» ot 19 sentyabrya 2020 g. [A certificate of conformity No. RA. RU. AB86. N001126 "Topomatik Robur – Railways" dated September 19, 2020].

Информация об авторах

Мыльников Максим Михайлович – аспирант кафедры пути и железнодорожного строительства, Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: mmmynikov@ya.ru

Information about the authors

Maksim M. Myl'nikov – Ph.D. student of the Subdepartment of Road and Railway Construction, the Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, the Russian Federation, e-mail: mmmynikov@ya.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).164-169

УДК 656.222.4

Организация планирования диспетчерской работы на участках с подталкивающим движением

М. Н. Еременко, А. Д. Доможирова, Р. Ю. Упырь ✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ upyry.roman@gmail.com

Резюме

В статье описывается результат изучения проблемы планирования поездной работы на участках, имеющих горно-перевальный характер пути с использованием подталкивающей либо кратной тяги. Большинство действующих железнодорожных линий было спроектировано еще в конце XIX в. По ряду причин такие линии имеют сложный профиль пути и требуют дополнительных тяговых ресурсов. Рассматривается горно-перевальный участок железной дороги, количество локомотивов, а также локомотивных бригад подталкивающего движения, задействованных на данном участке. Для организации движения поездов дежурно-диспетчерским персоналом применяются различные приемы регулирования. В данной работе исследуется прием подвода поездопотока к техническим станциям в отношении экстраполяции на участки с подталкиванием. Определены формулы времени, которое затрачивают локомотивные бригады на станции постановки «толкачей», проанализированы их составляющие и выделено ключевое значение, на которое необходимо делать упор при планировании поездной работы на участках с подталкивающим движением. Установлены границы оптимальных участков планирования подвода поездопотока к станции постановки толкачей для достижения наиболее эф-

фактивных решений дежурно-диспетчерским персоналом. Обозначены три зоны (красная, желтая, зеленая), в рамках которых степень планирования отличается своими особенностями. При этом отмечено, что планирование за рамками зеленой зоны создает излишнюю нагрузку на работу дежурно-диспетчерского аппарата. Результаты исследования могут применяться для определения размеров диспетчерских кругов, имеющих подталкивающее движение, а также для подготовки дежурно-диспетчерского персонала.

Ключевые слова

подталкивающее движение, толкач, горно-перевальный участок, планирование диспетчерской работы, зоны планирования

Для цитирования

Еременко М. Н. Организация планирования диспетчерской работы на участках с подталкивающим движением / М. Н. Еременко, А. Д. Доможирова, Р. Ю. Упырь // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 164–169. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).164-169

Информация о статье

поступила в редакцию: 25.12.2020, поступила после рецензирования: 26.01.2021, принята к публикации: 03.02.2021

Organization of dispatching planning on sections with pusher engine traffic

M. N. Eremenko, A. D. Domozhirova, R. Yu. Upyr' ✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ upyr.roman@gmail.com

Abstract

The article describes the result of studying the problem of planning train operation on sections that have a mountain-pass nature of the track using pusher engines or a double heading. Most of the existing railway lines were designed at the end of the XIX century. For a number of reasons, such lines have a complex track profile and require additional traction resources. The article considers the Irkutsk – Slyudyanka section of the East Siberian railway, and notes the number of locomotives, as well as locomotive pushing teams, involved in this section. To organize the movement of trains, the dispatcher staff uses various methods of regulation. This paper explores the method of acceptance of the train traffic supply to technical stations regarding extrapolation to sections where pusher engines are used. The authors determine formulas of the time spent by locomotive crews at the "pusher engine" interpositioning station, analyze their components, and highlight the key value that should be emphasized when planning train operation on sections with pusher engine traffic. The article determines the boundaries of optimal planning sections for the train flow supply to the pusher engine interpositioning station, in order to achieve the most effective solutions by the duty dispatcher staff. There are three zones (red, yellow, and green) where the degree of planning is different. At the same time, it is noted that planning outside the green zone creates an excessive load on the work of the duty dispatcher unit. The conclusions made in this article can be used to determine the size of dispatching areas with pusher engine traffic, as well as to train dispatching personnel on duty.

Keywords

pusher engine traffic, pusher engine, mountain-pass section, dispatching planning, planning zones

For citation

Eremenko M. N., Domozhirova A. D., Upyr' R. Yu. Organizatsiya planirovaniya dispetcherskoi raboty na uchastkakh s podtalkivaiushchim dvizheniem [Organization of dispatching planning on sections with pusher engine traffic]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 164–169. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).164-169

Article info

Received: 25.12.2020, Revised: 26.01.2021, Accepted: 03.02.2021

Введение

Линии современных железных дорог проложены маршрутами, определенными еще в конце XIX в. [1]. Отдельные участки перестраивались позднее. За отсутствием современной техники, а также имеющихся на тот момент инженерных решений строительство железнодорожных линий велось в основном ручным трудом. Инженеры того времени не могли себе позволить прокладывать трассы через горные массивы напрямую из-за необходимости

избегать большого объема земляных работ, который бы усложнил строительство и привел бы к удорожанию проекта. В результате этого некоторые железнодорожные линии проходят в обход гор через так называемые горно-перевальные участки, они имеют затяжные подъемы и спуски, зачастую в условиях горного серпантина вписанные в кривые малого радиуса.

Все перечисленные условия в значительной мере затрудняют движение поездов. При достижении

максимальных тяговых возможностей локомотива на таких участках применяют частичное или полное подталкивание либо двойную тягу.

В большинстве случаев участки с подталкиванием имеют небольшую протяженность, и применение дополнительных локомотивов ограничивается несколькими единицами. Однако есть участки с достаточно продолжительным подъемом, введенные в середине XX в. взамен железных дорог, содержание которых стоило очень дорого из-за большого наличия искусственных сооружений (мостов, галерей, туннелей). Количество содержащихся для подталкивания локомотивов серии ЗЭС5К на данных участках при насыщенном графике достигает до 29 ед. в сутки. При этом для обеспечения непрерывной работы участка подталкивания в сутки работают порядка 50 локомотивных бригад подталкивающего движения [2].

Применение такого количества подталкивающих локомотивов, а также локомотивных бригад ставит актуальную проблему их эффективного и рационального использования. Оперативное регулирование работы участка, продуманный подвод поездов позволяют избежать затруднений, связанных с преодолением горно-перевального участка и повысить качественные и количественные показатели [3–7].

Особенности диспетчерского регулирования на участках подталкивания

На сегодняшний день в диспетчерском регулировании успешно применяется прием подвода поездопотока к техническим станциям, регулирующий очередность пропуска транзитных и разборочных поездов. Данный прием также применяется и на участках подталкивания для корректировки подвода поездов к станции постановки толкачей [8]. К примеру, в результате отказа технических средств затрудняется возврат подталкивающих локомотивов. В этом случае целесообразно пропускать легковесные поезда, не требующие подталкивания.

Оперативное планирование ограничивается рядом причин: вероятность отказа технических средств с каждым перегоном увеличивается, поэтому на больших расстояниях тяжелее с достаточно высокой точностью прогнозировать время прибытия поезда; при возрастании границ планирования увеличивается нагрузка на дежурно-диспетчерский персонал, что ведет к снижению точности планирования и ухудшению выполнения других обязанностей.

Определение оптимальных границ планирования подвода поездов является ключевым элементом в работе дежурно-диспетчерского персонала.

Для определения границ планирования необходимо рассмотреть время, затрачиваемое локомотивной бригадой на станции постановки подталкивающих локомотивов – T_{cn} . Оно включает в себя несколько составляющих (1)

$$T_{cn} = t_{nl} + t_{ожм} + t_{мо} + t_{ожп} + t_{np}, \quad (1)$$

где t_{nl} – время от явки локомотивной бригады до приемки локомотива; $t_{мо}$ – время на маневровые операции; $t_{ожп}$ – время ожидания поезда; t_{np} – время операций на прицепку локомотива и отправление поезда; $t_{ожм}$ – время ожидания маневровых передвижений –

$$t_{ожм} = N_m I, \quad (2)$$

где N_m – количество маневровых полурейсов с пересечением главных путей; I – межпоездной интервал.

Переменные $t_{ожп}$, t_{nl} , $t_{мо}$, t_{np} определяются исходя из местных условий по технологическим картам.

Ключевым значением в данной формуле является $t_{ожп}$. В случае, если поезд прибывает на станцию до готовности толкача ($t_{ожп} < 0$), то возникает простоя поезда. При $t_{ожп} = 0$ возникает идеальная ситуация, при которой нет никаких потерь, данные ситуации являются теоретическими и на практике невозможны. В случае же $t_{ожп} > 0$ возникает простоя подталкивающего локомотива. Очевидно, что экономические потери при этом гораздо меньше, чем при простое поезда, поэтому при планировании стоит не допускать ситуаций $t_{ожп} < 0$. Эффективное использование подталкивающих локомотивов строится на принципе: $t_{ожп} \rightarrow \min$.

При этом время T_{cn} регламентируется нормативными документами и составляет в основном $T_{cn} \leq 2$ часа. После этого времени возникает «пересидка» локомотивной бригады, что указывает на неэффективное планирование поездной работы. Время T_{cn} определяется из формулы (3):

$$T_{cn} = T_{лб} - N_m (t_x^n + t_x^s + t_{об}) - (N_m - 1)t_{oc} - T_{сд}, \quad (3)$$

где $T_{лб}$ – время работы локомотивной бригады; N_m – количество толчков за время работы; t_x^n, t_x^s – время хода локомотива в режиме подталкивания и возвращения соответственно; $t_{об}, t_{oc}$ – время на станции оборота и станции постановки толкачей соответственно; $T_{сд}$ – время сдачи локомотива локомотивной бригадой.

Разграничение зонами участка планирования

Для эффективного планирования подхода поездов необходимо определиться с оптимальными гра-

ницами [9–11]. Предлагается разделить участок на три зоны, отличающиеся для удобства цветом (рис.).

Красная зона ограничивается соседней станцией к станции постановки подталкивающих локомотивов. До этой зоны дежурно-диспетчерским персоналом при возникновении какой-либо внештатной ситуации может быть принято оперативное решение регулирования подвода поездов. После поступления поезда в «красную» зону регулирование невозможно. Таким образом, граница красной зоны определяется временем хода по перегону.

Станцией прилегающей к станции постановки подталкивающих локомотивов – станция А (см. рис.) ограничивается нижний предел желтой зоны. В этой зоне дежурно-диспетчерским аппаратом должно быть принято точное решение о постановке конкретному поезду определенного «толкача». Так как эффективное планирование работы подталкивающих локомотивов базируется на $t_{ожп} \rightarrow \min$, то верхняя граница «желтой» зоны определяется графически пересечением линии хода поезда и суммы $t_x + t_{ожп}$, где $t_{ожп}$ (при принятом $T_{сн} \leq 2$) находится по формуле (4):

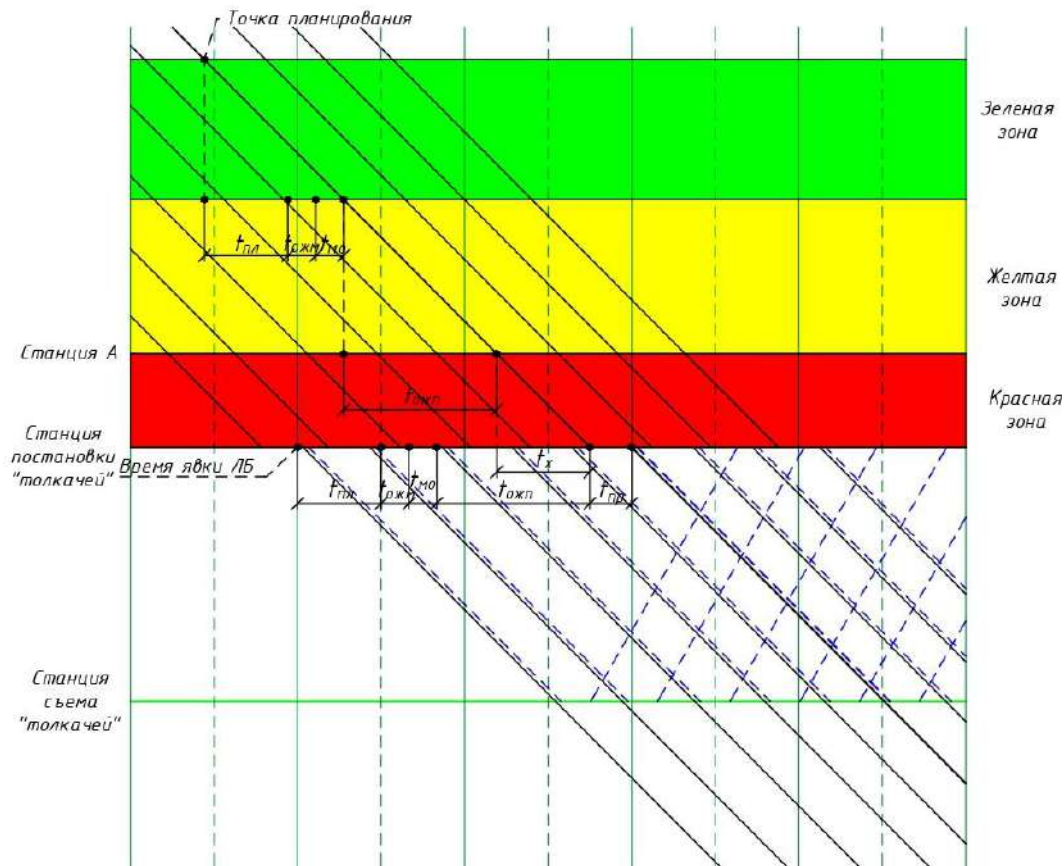
$$t_{ожп} = 2 - (t_{пл} + t_{ожм} + t_{мо} + t_{пр}). \quad (4)$$

Верхнюю границу зеленой зоны предлагается ограничить временем $T_{сн} = 2$. Графически она определяется пресечением линии хода поезда и суммы $t_x + t_{ожп} + t_{пл} + t_{ожм} + t_{мо} + t_{пр}$. В зеленой зоне происходит наиболее эффективное планирование подвода поездов к станции подталкивания с возможностью оперативного регулирования в случае возникновения внештатных ситуаций в движении поездов. При этом осуществлять планирование за верхним пределом «зеленой» зоны не имеет смысла, так как снижается точность предполагаемого исхода.

Предлагаемое разделение на зоны определяет оптимальные границы планирования подхода поездов к станции постановки подталкивающих локомотивов. Это разделение можно использовать для определения размеров диспетчерских кругов, а также для подготовки дежурно-диспетчерского персонала.

Заключение

Таким образом, планирование диспетчерской работы на участках с подталкиванием имеет свои ключевые особенности, которые необходимо учитывать при работе дежурно-диспетчерского персонала.



Разграничение зонами участка планирования
Division of the planning section by zones

Содержание большого количества локомотивов и локомотивных бригад подталкивающего движения требует особого внимания к их рациональному и эффективному использованию. От подвода поездов к станции постановки «толкачей» зависит работа всего участка в целом [12–17]. При этом ключевыми значениями, которые необходимо брать во внимание, являются время, затрачиваемое локомотивной бригадой на станции постановки подталкивающих локомотивов – T_{cn} , и его составляющая – время ожидания поезда ($t_{ожп}$). Для эффективного использования имеющихся тяговых ресурсов, а также максимального заполнения графика движения поездов, снижения простоев поездов определен ключевой принцип планирования диспетчерской работы на участках подталкивания $t_{ожп} \rightarrow \min$.

Планирование поездной работы предполагает определенные оптимальные границы, в рамках ко-

торых оно показывает свой максимально эффективный результат при оптимальной нагрузке на дежурно-диспетчерский аппарат. Предлагается разделить границы планирования на три зоны:

- красную, в которой регулирование уже невозможно;
- желтую, до нижней границы которой должно быть принято решение о регулировке;
- зеленую, планирование в которой является наиболее оптимальным решением.

От эффективных решений, принятых дежурно-диспетчерским аппаратом в рамках оперативного регулирования работы, зависит большинство эксплуатационных показателей. Взвешенные и хорошо обдуманые регулировочные приемы в значительной мере улучшают работу как отдельно взятого участка, так и всей железной дороги.

Список литературы

1. История железнодорожного транспорта России : учебное пособие / А.В. Гайдамакин, В.В. Лукин, В.А. Четвергов и др. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2012. 312 с.
2. Упырь Р.Ю. Исследование эксплуатационной надежности электровозов в подталкивании при движении на участке «Большой Луг – Слюдянка» // Студенческая весна – 2005 : сб. докл. студентов и аспирантов. Иркутск :Изд-во ИрГУПС, 2006. С. 203–207.
3. Широков А.П., Жевнова И.Д. Пропуск поездопотока по участкам со сложным планом и профилем железнодорожного пути на дальневосточном регионе // Инновации в науке. 2018. № 7 (83). С. 29–31.
4. Шапкин И.Н., Вдовин А.Н. Совершенствование системы планирования перевозочной работы // Железнодорожный транспорт. 2019. № 9. С. 9–14.
5. Левин Д.Ю. Системное управление перевозочным процессом на железнодорожном транспорте. М. : ИНФРА-М, 2018. 311 с.
6. Иванов П.А. Организация перевозочного процесса в условиях роста объемов на лимитирующих направлениях // Железнодорожный транспорт. 2014. № 3. С. 11–15.
7. Упырь Р.Ю., Гончарова Н.Ю., Еременко М.Н. Тяжеловесное движение – резерв увеличения провозной способности // Железнодорожный транспорт. 2020, № 7. С. 10–13.
8. Панин В.В., Прокофьева Е.С., Рубцов Д.В. Оперативное управление эксплуатационной работой на полигонном уровне // Бюл. Объедин. учен. совета ОАО РЖД. 2017. № 2. С. 57–64.
9. Uryu R., Domojirova A. About of railway sustainability on the train diagram // Elsevier. SSRN. URL: <https://ssrn.com/abstract=3556382> (дата обращения 14.10.2020).
10. Залогова О.И. Еременко М.Н. Нестандартные ситуации в работе дежурного по станции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы межвуз. науч.-практ. конф. Иркутск, 2019. Т. 1. С. 8–12.
11. Ковалев К.Е. Метод распределения функций и зон управления между оперативным персоналом крупных участковых станций : дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2015. 194 с.
12. Валеев Н.А. Факторы управления затратами локомотивного комплекса // Экономика железных дорог. 2014. № 12. С. 36–42.
13. Ермакова Л.В. Влияние различных факторов на работу локомотивных бригад // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. : материалы межвуз. науч.-практ. конф. Иркутск, 2016. Т. 1. С. 59–64.
14. Мачерет Д.А., Валеев Н.А. Улучшение использования локомотивного парка – важный резерв экономии эксплуатационных затрат // Экономика железных дорог. 2015. № 12. С. 14–18.
15. Некрашевич В.И., Ковалёв В.Н., Сальченко В.Л. Месячное нормирование парка локомотивов грузового движения // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2012. № 5. С. 24–31.
16. Пермикин В.Ю. Сурин А.В., Ковалев И.А. Увязка локомотивных бригад и составов на станции на основе оптимизационных задач // Инновационный транспорт. 2018, № 2. С. 48–52.
17. Власенский А.А. Проблемы управления локомотивами и локомотивными бригадами на полигонах большой протяженности // Наука и техника. 2014. № 2. С. 92–94.

References

1. Gaidamakin A.V., Lukin V.V., Chetvergova V.A. et al.; Istoriya zheleznodorozhnogo transporta Rossii: uchebnoe posobie [The history of the railway transport in Russia: a textbook]. In Gaidamakin A.V., Chetvergova V.A. (eds.) Moscow: FGBOU “Educational and methodological center for education in railway transport” Publ., 2012. 312 p.

2. Upyr' R.Yu. Issledovanie ekspluatatsionnoi nadezhnosti elektrovozov v podtalkivani pri dvizhenii na uchastke «Bol'shoi Lug – Slyudyanka» [Research of operational reliability of electric locomotives in pushing when moving on the section “Bol'shoi Lug-Slyudyanka”]. *Studencheskaya vesna – 2005: sb. dokladov studentov i aspirantov po rezul'tatam konferentsii [Student spring – 2005: collection of reports of students and postgraduates on the results of the conference]*. Irkutsk: The Irkutsk State Transport University Publ., 2006. Pp. 203–207.
3. Shirokov A.P., Zhevnova I.D. Propusk poezdopotoka po uchastkam so slozhnym planom i profilem zheleznodorozhnogo puti na dal'nevostochnom regione [Handling train traffic on sections with a complex plan and profile of the railway track in the region of Far East]. *Innovatsii v nauke [Innovations in science]*, 2018. No. 7 (83). Pp. 29–31.
4. Shapkin I.N., Vdovin A.N. Sovershenstvovanie sistemy planirovaniya perevozhnoy raboty [Improving the system of planning transportation work]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, 2019. No. 9. Pp. 9–14.
5. Levin D.Yu. Sistemnoe upravlenie perevozhnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte: monografiya [The systematic management of a transportation process on railway transport: a monograph]. Moscow, 2018. Ser. Scientific thought.
6. Ivanov P.A. Organizatsiya perevozhnogo protsessa v usloviyakh rosta ob'emov na limitiruyushchikh napravleniyakh [Organization of the transportation process in terms of growth on the limiting directions]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, 2014. No. 3. Pp. 11–15.
7. Upyr' R.Yu., Goncharova N.Yu., Eremenko M.N. Upyr' R.Yu., Goncharova N.Yu., Eremenko M.N. Tyazhelovesnoe dvizhenie – rezerv uvelicheniya provoznoi sposobnosti [Heavy-weight traffic is the provision for the increase of the carrying capacity]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, 2020, Number 7. Pp. 10–13.
8. Panin V.V., Prokof'eva E.S., Rubtsov D.V. Operativnoe upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi na poligonnom urovne [Operational management of operational work at the polygon level]. *Byulleten' Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO RZhD [The bulletin of the joint scientific Council of Russian Railways]*, 2017. No. 2. Pp. 57–64.
9. Upyr' R., Domozhirova A. On the railway sustainability on the train diagram (March 18, 2020) [Electronic media]. URL: <https://ssrn.com/abstract=3556382>.
10. Zalogova O.I. Eremenko M.N. Nestandartnye situatsii v rabote dezhurnogo po stantsii [Non-standard situations in the work of the station attendant]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*. Irkutsk: IRGUPS Publ., 2019. Vol. 1. Pp. 8–12.
11. Kovalev K.E. Metod raspredeleniya funktsii i zon upravleniya mezhdru operativnym personalom krupnykh uchastkovykh stantsii: diss. kand. tekhn. nauk: 05.22.08 [A method of distribution of functions and control zones between operational personnel of large district stations. Ph. D. (Engineering) diss.: 05.22.08]. PGUPS Publ., Saint Petersburg, 2015. 194 p.
12. Valeev N.A. Faktory upravleniya zatratami lokomotivnogo kompleksa [Factors of cost management of the locomotive complex]. *Ekonomika zheleznikh dorog [The railway economics]*, 2014. No. 12. Pp. 36–42.
13. Ermakova L.V. Vliyaniye razlichnykh faktorov na rabotu lokomotivnykh brigad [Influence of various factors on the work of locomotive crews]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*. Irkutsk: IRGUPS Publ., 2016. Vol. 1. Pp. 59–64.
14. Macheret D.A., Valeev N.A. Uluchsheniye ispol'zovaniya lokomotivnogo parka – vazhnyi rezerv ekonomii ekspluatatsionnykh zatrat [Improving the use of the locomotive fleet is an important reserve for saving operating costs]. *Ekonomika zheleznikh dorog [The railway economics]*, 2015. No. 12. Pp. 14–18.
15. Nekrashevich V.I., Kovalev V.N., Salchenko V.L. Mesyachnoe normirovaniye parka lokomotivov gruzovogo dvizheniya [Monthly normalization of the fleet of locomotives of cargo traffic]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [The bulletin of the research institute of railway transport]*, 2012. No. 5. Pp. 24–31.
16. Permikin V.Yu., Surin A.V., Kovalev I. A. Uvyazka lokomotivnykh brigad i sostavov na stantsii na osnove optimizatsionnykh zadach [Linking locomotive crews and trains at the station on the basis of optimization problems]. *Innovatsionnyi transport [Innovative transport]*, 2018. No. 2. Pp. 48–52.
17. Vlasenskii A.A. Problemy upravleniya lokomotivami i lokomotivnymi brigadami na poligonakh bol'shoi protyazhennosti [Problems of managing locomotives and locomotive crews on long-distance polygons]. *Nauka i tekhnika [Science and technology]*, 2014. No. 2. Pp. 92–94.

Информация об авторах

Еременко Михаил Николаевич – аспирант кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: aspirantirgups@yandex.ru

Доможирова Алёна Дмитриевна – аспирант кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: domojirova.a@gmail.com

Упырь Роман Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: upyrroman@gmail.com

Information about the authors

Mikhail N. Eremenko – Ph.D. student of the Subdepartment of Operational Work, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: aspirantirgups@yandex.ru

Alena D. Domozhirova – Ph.D. student of the Subdepartment of Operational Work, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: domojirova.a@gmail.com

Roman Yu. Upyr' – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Assoc. Prof. at the Subdepartment of Operational Management, Irkutsk State Transport University, email: upyrroman@gmail.com

Исследование механических воздействий на силовые шины выпрямительно-инверторного преобразователя-4000-2М электровозов 2 (3, 4)ЭС5К

Ю. А. Давыдов, О. О. Мухин, В. В. Заболотный✉

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ zabolotnyy_vv@mail.ru

Резюме

В 2020 году в рамках контракта жизненного цикла заключенного между поставщиком локомотивов АО «Рослокомотив» и ОАО «Российский железные дороги» в эксплуатационные локомотивные депо продолжается поставка электровозов серии «Ермак» производства ООО «Производственной компании «Новочеркасский электровозостроительный завод». Зачастую при разработке и проектировании новых локомотивов тяжело определить реальные эксплуатационные механические воздействия на узлы и элементы оборудования локомотивов, работающих в разных условиях эксплуатации, ввиду чего в рамках жизненного цикла локомотивов предусмотрена их модернизация с целью повышения надежности и срока службы. За период эксплуатации новых локомотивов выявлен один из недостатков электровозов серии 2(3, 4)ЭС5К с поосным регулированием силы тяги – излом силовой токоведущей шины выпрямительно-инверторных преобразователей ВИП-4000-2М в местах контакта шин к выводам ВИП. В настоящее время приняты меры по доработки конструкции шинного монтажа, однако, полностью исключить проблему не удалось. Разработана САД и САЕ-модель шинного монтажа ВИП, проведен модальный и гармонический анализ с применением метода конечных элементов программного комплекса Solid Works Simulation. В статье приведены результаты модального и гармонического расчетов силовой токоведущей шины ВИП. Определены собственные частоты конструкции шинного монтажа ВИП, по амплитудно-частотной характеристике найдены максимальные напряжения, возникающие в конструкции. Результаты исследования в программном комплексе САПР подтвердили возникновение неисправностей шин ВИП-4000-2М. Предложена модернизация, позволяющая снизить концентрацию напряжений в конструкции и исключить риск возникновения механических неисправностей силовых шин.

Ключевые слова

контракт жизненного цикла, силовая шина, выпрямительно-инверторный преобразователь, САД-модель, САЕ-модель, модальный анализ, гармонический анализ, вибрация

Для цитирования

Давыдов Ю. А. Исследование механических воздействий на силовые шины выпрямительно-инверторного преобразователя-4000-2М электровозов 2 (3, 4)ЭС5К / Ю. А. Давыдов, О. О. Мухин, В. В. Заболотный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 170–177. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).170-177

Информация о статье

поступила в редакцию: 13.03.2021, поступила после рецензирования: 20.03.2021, принята к публикации: 23.03.2021

Research of mechanical effects on power buses of a reversible converter-4000-2M OF electric locomotives 2 (3, 4) ES5K

Yu. A. Davydov, O. O. Mukhin, V. V. Zabolotnyi✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ zabolotnyy_vv@mail.ru

Abstract

In 2020, within the framework of the life cycle contract concluded between the locomotive supplier Roslokomotiv AO and Russian Railways OAO, the supply of electric locomotives of the series «Ermak» produced by «Production Company «Novocherkassk Electric Locomotive Plant» OOO. Often, when developing and designing new locomotives, it is difficult to determine the real operational mechanical effects on the components and elements of equipment of locomotives operating in different operating conditions. Which is why, within the life cycle of locomotives, their modernization is envisaged in order to increase reliability and service life. During the period of operation of the new locomotives, one of the shortcomings of series 2(3, 4) ES5K electric locomotives with axial traction control was revealed – a break in the power current-conducting bus of the reversible converters RIP-4000-2M at the points of contact of the buses to the terminals of the reversible converter. At present, measures have been taken to refine the construction design of the bus mounting, however, it was not possible to completely eliminate the problem. A CAD and CAE-model of the bus mounting of the reversible converters was developed, a modal and harmonic analysis was carried out using the finite element method of the Solid Works Simulation software package. The article presents the results of

modal and harmonic calculations of the power current-conducting bus of the reversible converters. The natural frequencies of the bus mounting construction design of the high-voltage power supply were determined, the maximum stresses arising in the structure were found from the amplitude-frequency characteristic. The results of the study in the CAD software complex confirmed the occurrence of malfunctions of the reversible converter-4000-2M buses. A modernization is proposed that allows one to reduce the concentration of stresses in the construction design and to eliminate the risk of mechanical failures in the power buses.

Keywords

life cycle contract, power bus, reversible convertor, CAD-model, CAE-model, modal analysis, harmonic analysis, vibration

For citation

Davydov Yu. A., Mukhin O. O., Zabolotnyi V. V. Issledovanie mekhanicheskikh vozdeystvii na silovye shiny vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya-4000-2M elektrovozov 2 (3, 4)ES5K [Research of mechanical effects on power buses of a reversible converter-4000-2M of electric locomotives 2 (3, 4) ES5K]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 170–177. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).170-177

Article Info

Received: 13.03.2021, Revised: 20.03.2021, Accepted: 23.03.2021

Введение

В рамках контракта жизненного цикла, заключенного между ОАО «Российские железные дороги» и АО «Рослокомотив», продолжается поставка в эксплуатационные локомотивные депо железных дорог новых локомотивов серии 2, (3, 4)ЭС5К производства ООО «Производственная компания «Новочеркасский электровозостроительный завод» [1, 2].

Выпускаемая продукция локомотивостроительного завода должна обеспечивать установленные параметры надежности и соответствовать ГОСТ Р 55364-2012 «Электровозы. Общие технические требования» [3, 4].

При проектировании локомотивов недостаточно ограничиваться только статическим линейным и нелинейным анализами конструкции, необходимо проводить исследование линейной динамики конструкции. Однако реальные эксплуатационные нагрузки и воздействия на отдельные узлы и элементы локомотивов сложно предсказать только в рамках проектирования.

Так контрактом жизненного цикла предусмотрен комплекс работ по улучшению технико-экономических характеристик тягового подвижного состава путем замены его составных частей на более совершенные [1, 2].

В ходе эксплуатации новых электровозов зафиксированы многократные изломы токоведущих силовых шин выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) в местах крепления их к силовым контактам (рис. 1). Для устранения данного недостатка завод модернизировал конструкцию путем установки металлических фланцев (рис. 1). Однако данное мероприятие в полной мере не оправдало ожидания.

Моделирование силовой токоведущей шины выпрямительно-инверторного преобразователя

С целью исследования механических воздействий на объект при эксплуатации локомотивов раз-

работана CAE-модель в программном комплексе «SolidWorks Simulation» (рис. 2) [5–8]. Конструкция состоит из шины, двух планок для ограничения перемещения конструкции, прикрепленных к шине через текстолитовые изоляторы [9].

Для упрощения исследования сделаны следующие допущения: модель представляет собой цельную связанную конструкцию без болтовых соединений (в связи с отсутствием дефектов в данном узле); коэффициент демпфирования принят 0,01; использована жесткая связь в местах заделки; материал токоведущей шины – алюминий, изоляторов – текстолит, планок – железо (в соответствии с реальными материалами устройства).

Модальный и гармонический анализы конструкции

Перед оценкой надежности по критерию максимального напряжения в конструкции целесообразно провести модальный анализ в «Simulation» [5–8, 10–13].

Известно, что в соответствии с пунктом 4.5 ГОСТ Р 55364-2012 оборудование электровоза должно быть рассчитано для работы при вибрационных нагрузках по группам механического исполнения М25, М26, М27 [4]. Токоведущая шина относится к группе М25 по ГОСТ 30631-99 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим воздействующим факторам при эксплуатации» [14]. В соответствии с Приложением Б ГОСТ 30631-99 максимальная амплитуда ускорения при вибрационных воздействиях для группы М25 составляет 10 м/с^2 [12–16].

По результатам частотного анализа получено 50 значений собственных частот (мод) конструкции (рис. 3), которым соответствуют значения коэффициента массового участия k , характеризующего вкладом массы в колебания изделия [17, 18]. На графике собственные частоты конструкции соответствуют точкам резкого возрастания коэффициента массового

участия по всем осям координат (рис. 3). Частоты 19,2 Гц, 36,9 Гц, 144,9 Гц, 158,3 Гц наиболее близки к реальным частотам вибрации в локомотиве и соответствуют наибольшим коэффициентам массового участия – 0,41 по оси z , 0,24 по оси z , 0,27 по оси x и

0,33 по оси y (рис. 3) [12, 13, 16]. Полученные частоты при совпадении с частотой вынужденных колебаний могут вызвать резонанс в конструкции силовой шины [19, 20].

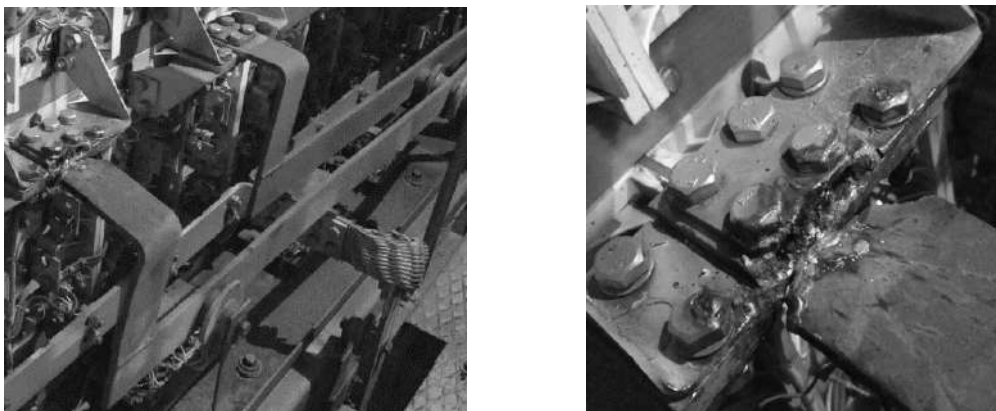


Рис. 1. Дефекты шины в месте крепления
Fig. 1. Defects of the bus at the attachment point

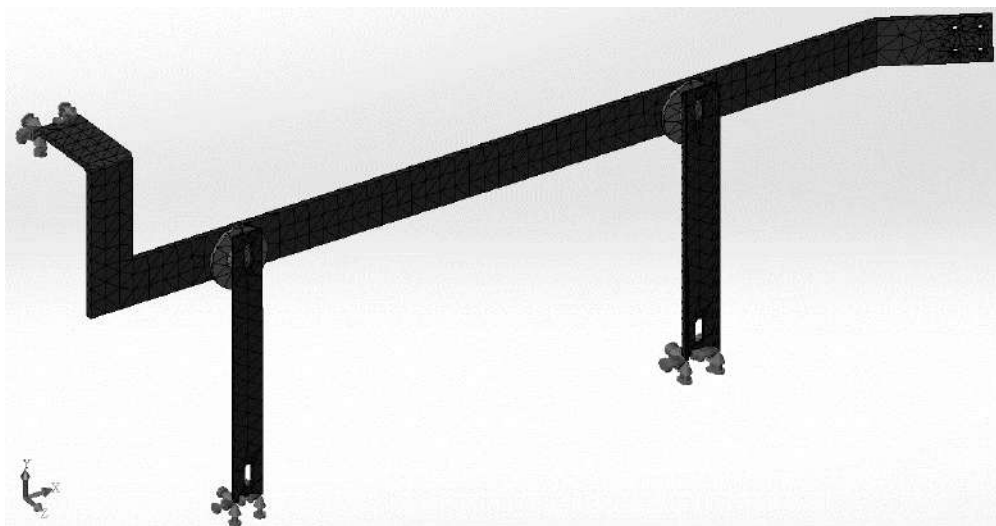


Рис. 2. САЕ-модель токоведущей шины выпрямительно-инверторного преобразователя
Fig. 2. CAE-model of the current-conducting bus of the reversible converter

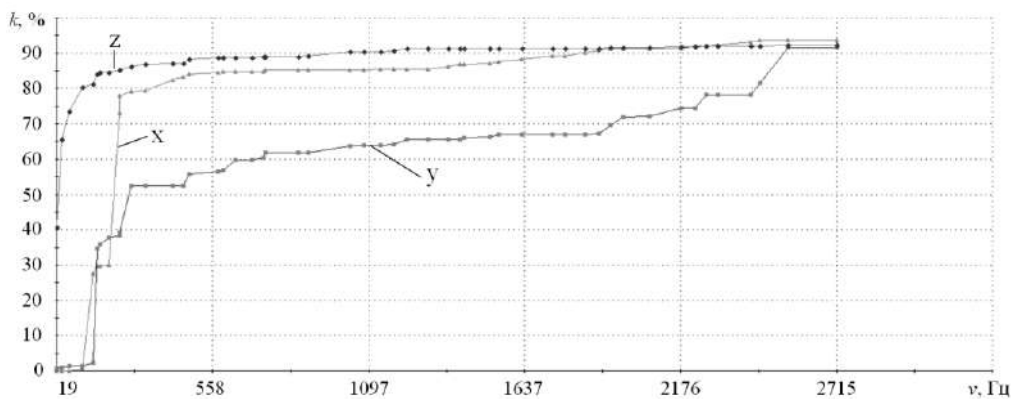


Рис. 3. График зависимости частоты от коэффициента массового участия
Fig. 3. The graph of the dependence of the frequency on the mass participation factor

Далее представлены графики форм колебания при резонансных частотах (рис. 4) [19]. Наибольшее негативное влияние на крепления силовой токоведущей шины к выводу ВИП оказывает форма колебания при частоте 158,3 Гц (рис. 4, *з*) в результате того, что металлические планки, фиксирующие конструкцию, при вибрации в данном направлении создают момент по оси *y* и перемещение шины по оси *z* [5–8].

Гармонический расчет конструкции при частоте колебаний 158,3 Гц подтверждает возникновение опасного механического воздействия на место крепления алюминиевой шины к выводу ВИП (рис. 5, *б*) [5–8, 21]. Максимальные напряжения концентрируются в месте крепления.

Представлена амплитудно-частотная характеристика (далее – АЧХ) по оси *z*, где амплитуда представляет собой напряжение в пяти точках в местах крепления токоведущей шины (рис. 6). Максимальные пики амплитуды напряжения соответствуют значениям собственных частот модального анализа [19, 23].

При резонансной частоте 158,3 Гц максимальное

напряжение составляет 58 МПа. Данная нагрузка является критической для токоведущей шины из алюминия [22]. Стоит отметить, что в реальных условиях протекающий по шине ток в месте контакта вызывает повышенный нагрев шины [9].

В результате нагрева механические свойства в отношении предела текучести снижаются [22, 24]. Представляется целесообразным провести модернизацию конструкции путем увеличения жесткости планок крепления.

Модернизация креплений силовой токоведущей шины выпрямительно-инверторного преобразователя

Для увеличения жесткости конструкции проведена замена используемых плоских планок на планки с угловым профилем 40×40×4 мм (рис. 7). При этом график зависимости частоты от коэффициента массового участия принимает вид (рис. 8). Частота 158,3 Гц для такой конструкции больше не является резонансной частотой. Зона резонанса по оси *y* сместилась на частоту 443,7 Гц, коэффициент при этом составляет 0,19.

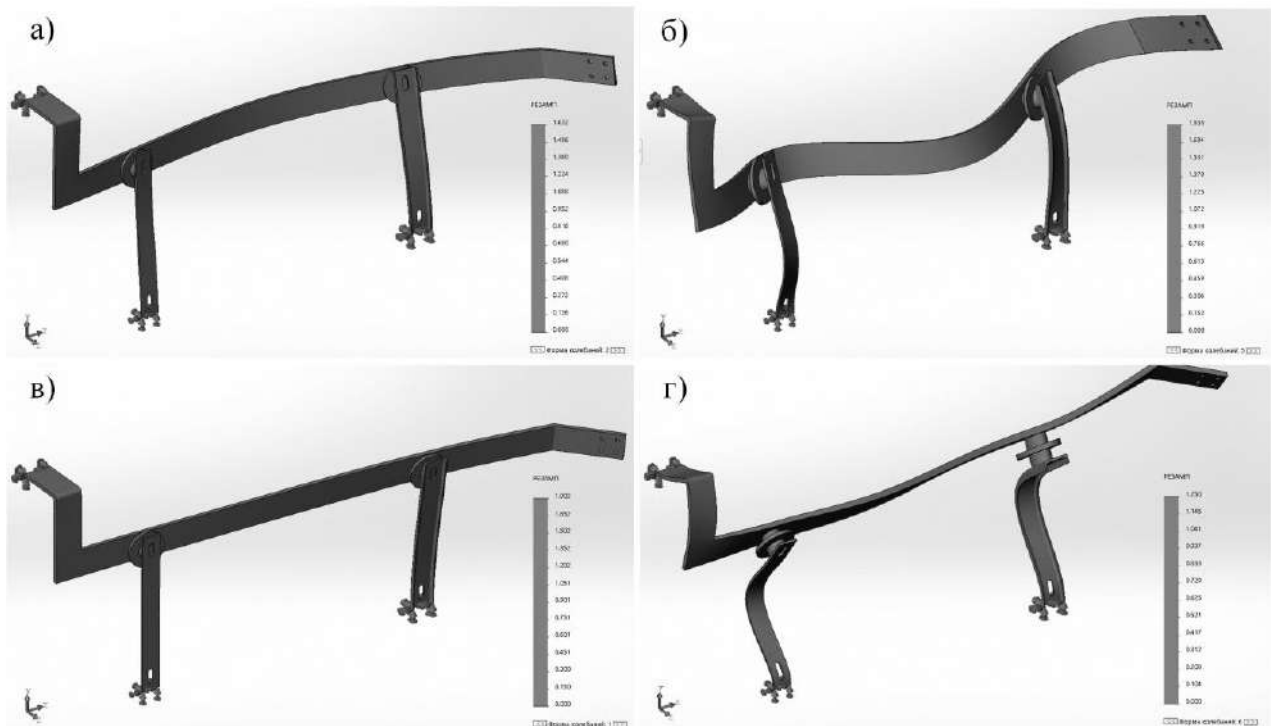


Рис. 4. Графики форм колебания при собственных частотах:

a – частота колебаний 19,19 Гц, коэффициент массового участия 0,41 по оси *z*; *б* – частота колебаний 144,9 Гц, коэффициент массового участия 0,27 по оси *x*; *в* – частота колебаний 36,9 Гц, коэффициент массового участия 0,24 по оси *z*; *г* – частота колебаний 158,3 Гц, коэффициент массового участия 0,33 по оси *y*

Fig. 4. Graphs of vibration modes at natural frequencies:

a – vibration frequency 19,19 Hz, mass participation factor is 0,41 along the *z*-axis; *b* – vibration frequency 144,9 Hz, mass participation factor is 0,27 along the *x*-axis; *c* – the oscillation frequency is 36,9 Hz, mass participation factor is 0,24 along the *z*-axis; *d* – vibration frequency 158,3 Hz, mass participation factor is 0,33 *y*-axis

График напряжений и формы колебания модернизированной конструкции при частоте 158,3 Гц принимает вид (рис. 9), при этом максимальное напряжение составляет менее 3 МПа и является не критическим для конструкции [22, 24]. При увеличении жесткости конструкции напряжения становятся меньше предела текучести алюминия [19, 20, 22, 24].

Представлена АЧХ САЕ-модели с планками для

крепления токоведущей шины 40×40×4 мм (рис. 10). Максимальные пики амплитуды напряжения возникают при частотах 30,8 Гц, 72,5 Гц, 157,5 Гц, 175,5 Гц, 219,3 Гц и при соответствующих им напряжениях 2 МПа, 4 МПа, 9 МПа, 7 МПа, 11 МПа [19, 21]. Полученные значения напряжения ниже, чем у модели со штатными планками для крепления шины ВИП.

Таким образом, применение планок для крепле-

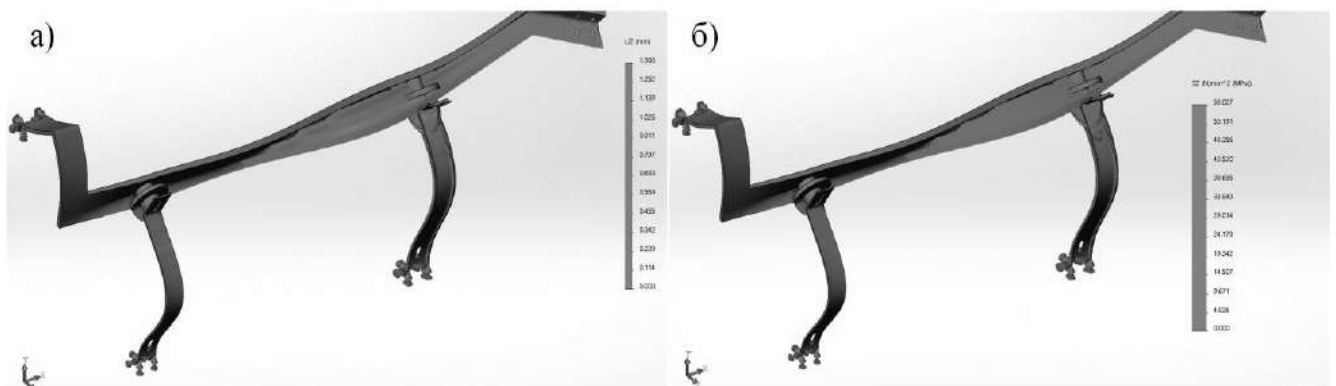


Рис. 5. Результаты гармонического расчета при опасной частоте колебания 158,3 Гц:
а – график перемещений по оси z; б – график напряжений по оси z

Fig. 5. Results of harmonic calculation at a dangerous oscillation frequency of 158,3 Hz:
a – a graph of displacements along the z-axis; b – graph of stresses along the z-axis

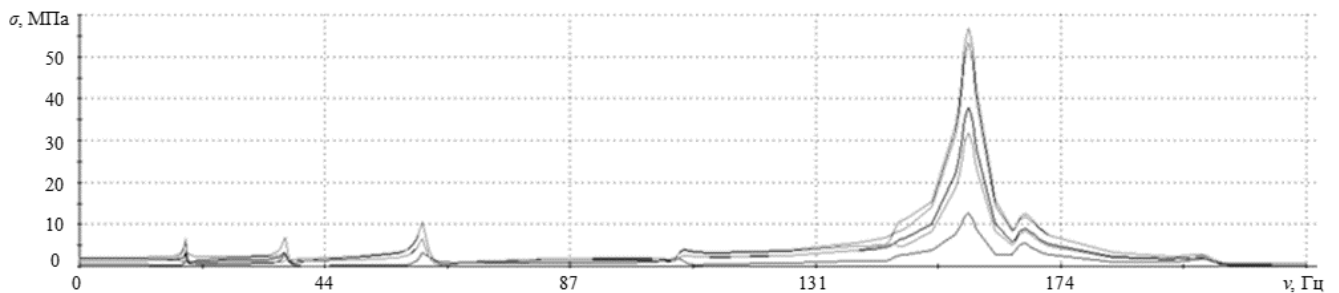


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика конструкции
Fig. 6. Frequency response of the construction design

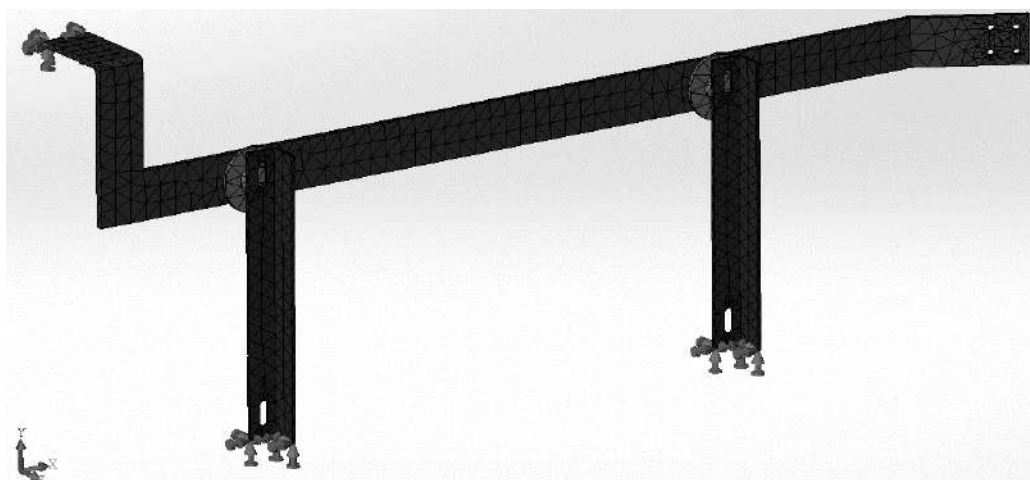


Рис 7. САЕ-модель с планками для крепления токоведущей шины 40×40×4 мм
Fig 7. CAE-model with strips for fixing the current- conducting bus 40×40×4 mm

ния с угловым профилем 40×40×4 мм позволит снизить механические напряжения в местах контакта токоведущей шины к выводам ВИП в 5 раз, исключить случаи излома шины. Кроме того, для замены штатных планок на планки с угловым профилем не требуется производить дополнительные монтажные работы – крепление планок с угловым профилем производится аналогично штатным. Стоимость модернизации для одной нижней шины составляет

800 руб., при этом для замены планок всех секций локомотива 3ЭС5К потребуется 4 800 руб.

Заключение

По результатам модального и гармонического анализов токоведущей шины ВИП сделан вывод о возникновении в эксплуатации недопустимых предельных напряжений в конструкции, вызванных вибрационными нагрузками. В результате чего



Рис. 8. График зависимости частоты от коэффициента массового участия измененной конструкции
Fig. 8. Graph of the dependence of frequency on the mass participation factor of a modified construction design

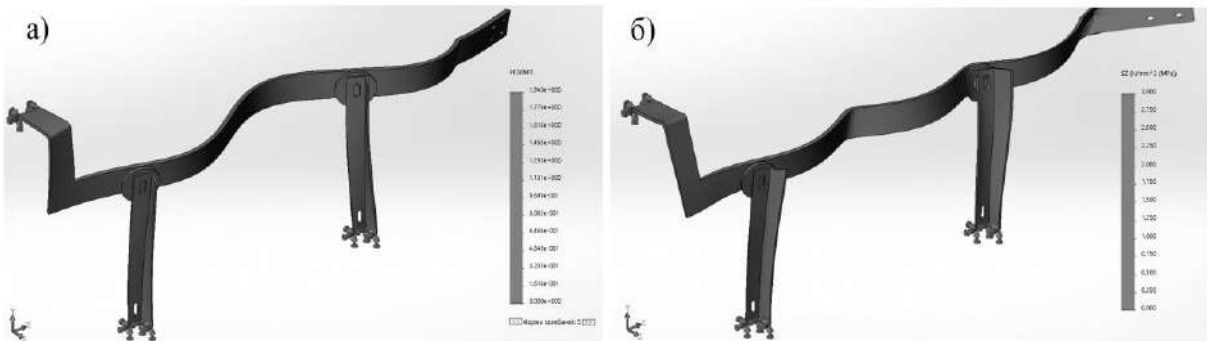


Рис. 9. Результаты расчета при частоте колебаний 158,3 Гц:
a – график формы колебания по оси *z*; *b* – график напряжений по оси *z*
Fig. 9. Calculation results at a vibration frequency of 158,3 Hz:
a – a graph of the waveform along the *z*-axis; *b* – a graph of stresses along the *z*-axis

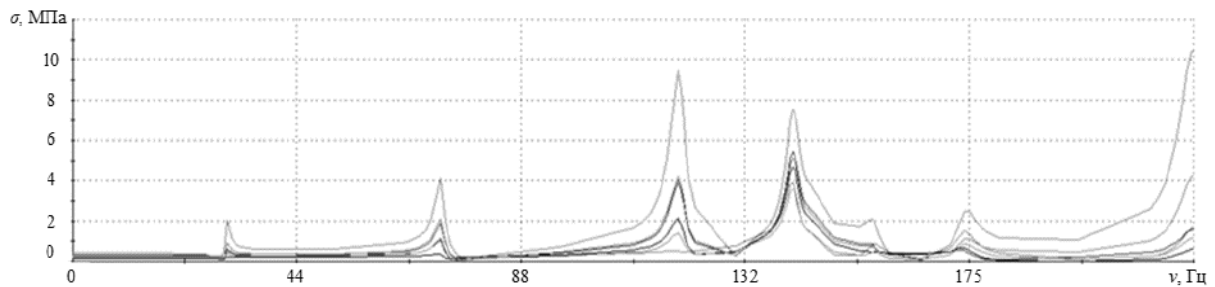


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика измененной конструкции
Fig. 10. Frequency response of a modified construction design

предложено провести модернизацию крепления токоведущей шины ВИП путем применения, вместо штатных планок крепления шины планки с угловым профилем 40×40×4 мм, что позволит исключить

случаи излома шин в местах контакта к выводам ВИП, повысив при этом прочность конструкции в 5 раз, при низкой стоимости модернизации.

Список литературы

1. Всерьез и надолго // Train and Brain : электрон. журн. URL: <https://trainandbrain.ru/maintheme/vseriezinadolgo> (дата обращения 18.10.2020).
2. ГОСТ 31539-2012 Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения. Введ. 2014-01-01. 14 с.
3. ГОСТ 33943-2016 Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Термины и определения. Введ. 2017-09-01. 40 с.
4. ГОСТ Р 55364-2012. Электровозы. Общие технические требования. М. : Изд-во стандартов, 2012. 62 с.
5. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. СПб. : БХВ-Петербург, 2012. 445 с.
6. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов. Задачи, методы, рекомендации. М. : ДМК-Пресс, 2015. 562 с.
7. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М. : ДМК-Пресс, 2019. 566 с.
8. Kurowski Paul M. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2020 // Design Generator Inc. 2020. 604 с. ISBN 978-1-63057-325-6.
9. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К, 4ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Кн. 1. Описание и работа. Электрические схемы. Новочеркасск, 2006. 251 с.
10. Справка по SolidWorks. Критерий максимального напряжения. URL: solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/cworks/c_Maximum_Stress_Criterion_2.htm (дата обращения 18.10.2020).
11. Справка по SolidWorks. Модальный анализ временной диаграммы. URL: http://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/cworks/c_Modal_Time_History_Analysis.htm?verRedirect=1 (дата обращения 20.10.2020).
12. Вибрации в технике. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / И.И. Блехман и др. М. : Машиностроение, 1979. 351 с.
13. Блехман И.И. Вибрационная механика. М. : Физматлит, 1994. 391 с.
14. ГОСТ 30631-99. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации. М. : ИПК Изд-во стандартов, 1999. 36 с.
15. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения. М. : ИПК Изд-во стандартов, 1980. 73 с.
16. Челомей В.Н. Диментберга Ф.М., Колесникова К.С.. Вибрации в технике: Колебания машин, конструкций и их элементов: справочник в 6 т. М. : Машиностроение, 1980. 544 с.
17. Справка по SolidWorks. Массовое участие. URL: http://help.solidworks.com/2012/russian/SolidWorks/cworks/IDH_HELP_LIST_MASS_PARTICIPATION.htm (дата обращения 01.10.2020).
18. Биргера И.А. Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания : справочник. Т. 2. М. : Машиностроение, 1968. 831 с.
19. Ходжаев К.Ш. Резонансные и нерезонансные случаи в задаче о возбуждении механических колебаний // Прикладная математика и механика. 1968. Т. 32, № 1. С. 85–100.
20. Erofeev V.I. Plehov A.S., Titov D.U. Electromechanic installations vibration acceleration protection system // International Conference on Informatics, Networking and Intelligent Computing. Shenzhen, 2014. С. 75–77.
21. Справка по SolidWorks. Гармонический анализ. URL: http://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/cworks/c_Harmonic_Analysis.htm?verRedirect=1 (дата обращения 05.12.2020).
22. Биргер И.А. Шор Б.Ф., Шнейдерович Р.М. Расчет на прочность деталей машин. М. : Машиностроение, 1966. 616 с.
23. Кононенко В.О. Нелинейные колебания механических систем. Киев : Наук. думка, 1980. 382 с.
24. Краткий справочник для инженеров и студентов: Высшая математика. Теоретическая механика. Сопротивление материалов / А.Д. Полянин и др. М. : Международная программа образования, 1996. 432 с.

References

1. Vser'ez i nadolgo – Train and Brain. [For the long haul – Train and Brain] [Electronic media]. URL: <https://trainandbrain.ru/maintheme/vseriezinadolgo>.
2. GOST 31539-2012 Tsikl zhiznenniy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Terminy i opredeleniya [GOST 31539-2012 Life cycle of railway rolling stock. Terms and definitions], 2014-01-01, 14 p.
3. GOST 33943-2016 Nadezhnost' zheleznodorozhnogo tyagovogo podvizhnogo sostava. Terminy i opredeleniya [GOST 33943-2016 Reliability of railway traction rolling stock. Terms and definitions], 2017-09-01. 40 p.
4. GOST R 55364-2012. Elektrovozy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [GOST R 55364-2012. Electric locomotives. General technical requirements]. Moscow: IPK Izdate'stvo standartov Publ., 2012. 62 p.
5. Alyamovskii A.A. SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskie zadachi [SolidWorks Simulation. How to solve practical problems]. St. Petersburg: «BKHV-Petersburg» Publ., 2012. 445 p.
6. Alyamovskii A.A. SolidWorks Simulation. Inzhenernyi analiz dlya professionalov. Zadachi, metody, rekomendatsii [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals. Problems, methods, recommendations]. Moscow: «DMK-Press» Publ., 2015. 562 p.
7. Alyamovskii A.A. Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: «DMK-Press» Publ., 2019. 566 p.

8. Kurowski P.M. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2020. Design Generator Inc. Publ., 2020. 604 p.
9. Электровоз магистрал'nyi 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). Рукoвoдствo пo экcплуaтaции. Книгa 1. Oпиcaниe и рaбoтa. Элeктричeскиe cкeммы [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). An operation manual. Book 1. Description and work. Electrical diagrams]. Novocheboksak, 2006. 251 p.
10. Spravka po SolidWorks. Kriterii maksimal'nogo napryazheniya [Help on SolidWorks. Maximum voltage criterion] []. URL: solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/cworks/c_Maximum_Stress_Criterion_2.htm.
11. Spravka po SolidWorks. Modal'nyi analiz vremennoi diagrammy [Help on SolidWorks. Modal analysis of the timing diagram] [Electronic media]. URL: http://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/cworks/c_Modal_Time_History_Analysis.htm?verRedirect=1. Accessed: ???
12. Blekhan I.I. et al. Vibratsii v tekhnike, T. 2. Kolebaniya nelineynykh mekhanicheskikh sistem [Vibrations in technology, Vol. 2. Oscillations of nonlinear mechanical systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 351 p.
13. Blekhan I.I. Vibratsionnaya mekhanika [Vibration mechanics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1994. 391 p.
14. GOST 30631-99. Obshchie trebovaniya k mashinam, priboram i drugim tekhnicheskim izdeliyam v chasti stoikosti k mekhanicheskim vneshnim voz-deystvuyushchim faktoram pri ekspluatatsii [General requirements for machines, devices and other technical products in terms of resistance to mechanical external factors during operation]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 36 p.
15. GOST 24346-80. Vibratsiya. Terminy i opredeleniya [Vibration. Terms and definitions]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1980. 73 p.
16. Chelomei V.N., Dimentberg F.M., Kolesnikov K.S. Vibratsii v tekhnike: Kolebaniya mashin, konstruksii i ikh elementov: spravochnik v 6-ti t [Vibrations in technology: Oscillations of machines, structures and their elements: a reference book in 6 volumes]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 544 p.
17. Spravka po SolidWorks. Massovoe uchastie [Help for SolidWorks. Mass participation]. URL: http://help.solidworks.com/2012/russian/SolidWorks/cworks/IDH_HELP_LIST_MASS_PARTICIPATION.htm.
18. Birger I.A., Panovko Ya.G. Prochnost', ustoychivost', kolebaniya. Spravochnik v 3-kh t. T. 2. [Strength, stability, fluctuations. A reference book in 3 volumes. Vol. 2]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. 831 p.
19. Khodzhaev K.Sh. Rezonansnye i nerezonansnye sluchai v zadache o vozbuzhdenii mekhanicheskikh kolebaniy [Resonant and nonresonant cases in the problem of excitation of mechanical vibrations]. *Prikladnaya matematika i mekhanika [Applied Mathematics and Mechanics]*, 1968. Vol. 32. No. 1. Pp. 85–100.
20. Erofeev V.I., Plekhov A.S., Titov D.U. Electromechanic installations vibration acceleration protection system. *International Conference on Informatics, Networking and Intelligent Computing (16–17 November 2014, Shenzhen)*, 2014. Pp. 75–77.
21. Spravka po SolidWorks. Garmonicheskii analiz [Help on SolidWorks. Harmonic analysis] [Electronic media]. URL: http://help.solidworks.com/2021/russian/SolidWorks/Cworks/c_Harmonic_Analysis.htm?verRedirect=1.
22. Birger I.A., Shor B.F., Shneiderovich R.M. Raschet na prochnost' detalei mashin [Strength calculation of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1966. 616 p.
23. Kononenko V.O. Nelineinye kolebaniya mekhanicheskikh sistem [Nonlinear vibrations of mechanical systems]. Kiev: Nauk. Dumka Publ., 1980. 382 p.
24. Polyani A.D. et al. Kratkii spravochnik dlya inzhenerov i studentov: Vysshaya matematika. Teoreticheskaya mekhanika. Soprotivlenie materialov [A short guide for engineers and students: Higher mathematics. Theoretical mechanics. Resistance of materials]. Moscow: International Education Program Publ., 1996. 432 p.

Информация об авторах

Давыдов Юрий Анатольевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: puch@festu.khv.ru.

Мухин Олег Олегович – аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: muhinoo@mail.ru.

Заболотный Владимир Владимирович – аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: zabolotnyy_vv@mail.ru.

Information about the authors

Yurii A. Davydov – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: puch@festu.khv.ru.

Oleg O. Mukhin – Ph.D. student of the Subdepartment of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: muhinoo@mail.ru.

Vladimir V. Zabolotnyi – Ph.D. student of the Subdepartment of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: zabolotnyy_vv@mail.ru.

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).177-183

УДК 625.031.3

Модель генератора эквивалентных вертикальных неровностей железнодорожного пути

Э. Л. Михайлов✉

Восточно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Иркутск, Российская Федерация

✉ DomatDynamics@yandex.ru

Резюме

В статье рассматриваются варианты математического моделирования реальных неровностей рельсового пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Предложена методика генерации эквивалентных вертикальных неровностей рельсового пути с помощью формирующих фильтров в системе математического моделирования Matlab Simulink. Методика позволяет на основе известной автокорреляционной функции вертикальной неровности при ее линейаризации определять передаточные функции фильтров. Обеспечивается генерация возмущений динамической системы в вертикальной плоскости для любых скоростей движения поездов без пересчета передаточных функций. В качестве исходного случайного сигнала применяется генератор белого шума, который, проходя формирующие фильтры, преобразуется в случайный сигнал с заданными спектральными характеристиками, эквивалентными по своему воздействию на динамическую систему реальной неровности пути. В целях применения классического преобразования Лапласа для непрерывного сигнала предложен способ линейаризации корреляционной функции. Каскад формирующих фильтров обеспечивает пропуск максимальных амплитуд на частотах, соответствующих длинам волн (100; 50; 25; 12,5; 6,25). В статье проведен анализ спектральных характеристик выходного сигнала формирующих фильтров, который показал, что построенные на основе линейаризованной корреляционной функции фильтры достаточно точно моделируют неровность рельсового пути. Достоинство предложенной в статье модели заключается в простоте схемных решений и применении стандартных аналоговых блоков моделирования пакета Matlab Simulink, что позволяет использовать предложенную модель совместно с моделью исследуемой динамической системы (грузового вагона) непосредственно в пакете Matlab Simulink.

Ключевые слова

эквивалентная неровность, рельсовый путь, преобразование Лапласа, вертикальные возмущения, математическое моделирование, спектральная плотность

Для цитирования

Михайлов Э. Л. Модель генератора эквивалентных вертикальных неровностей железнодорожного пути / Э. Л. Михайлов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 177–183. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).177-183

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.03.2021, поступила после рецензирования: 17.03.2021, принята к публикации: 20.03.2021

The model of a generator of equivalent vertical irregularities of the railway track

E. L. Mikhailov✉

The East Siberian Railway, a branch of Russian Railways OAO, Irkutsk, the Russian Federation

✉ DomatDynamics@yandex.ru

Abstract

The article discusses options of the mathematical modeling of real railway track irregularities in the vertical and horizontal planes. A method for generating equivalent vertical irregularities of a railway track using shaping filters in the Matlab Simulink mathematical modeling system is proposed. The technique makes it possible to determine the transfer functions of the filters on the basis of the known autocorrelation function of the vertical irregularity during its linearization. Generation of perturbations of the dynamic system in the vertical plane for any train speeds without recalculation of transfer functions is provided. As an initial random signal, a white noise generator is used, which, passing through the shaping filters, is converted into a random signal with specified spectral characteristics, which are equivalent in their effect on the dynamic system to the real track irregularity. In order to apply the classical Laplace transform for a continuous signal, a method for linearizing the correlation function is proposed. The cascade of shaping filters provides the passage of maximum amplitudes at frequencies corresponding to wavelengths (100; 50; 25; 12.5; 6.25). The article analyzes the spectral characteristics of the output signal of the shaping filters, which showed that the filters built on the basis of the linearized correlation function accurately simulate the irregularity of the railway track. The advantage of the model proposed in the article consists in the simplicity of circuitries and the use of standard analog blocks of modeling the Matlab Simulink package, which makes it possible to use the proposed model together with the model of the dynamic system under study (freight railcar) directly in the Matlab Simulink package.

Keywords

equivalent irregularity, railway track, Laplace transform, vertical perturbations, mathematical modeling, spectral density

For citation

Mikhailov E. L. Model' generatora ekvivalentnykh vertikal'nykh nerovnostei zheleznodorozhnogo puti [The model of a generator of equivalent vertical irregularities of the railway track]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 177–183. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).177-183

Article info

Received: 10.03.2021, Revised: 17.03.2021, Accepted: 20.03.2021

Введение

Математические модели реальных неровностей пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях – это набор составляющих, описывающих воздействия на динамическую модель вагона со стороны пути.

С 1996 г. действует Руководящий документ РД 32.68 96 (РД), разработанный Научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, г. Москва), в котором предлагаются методики моделирования случайных возмущений от неровностей железнодорожного пути, которые используются при исследовании новых конструкций вагонов [1].

Некоторыми авторами (В.Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И.А. Машенко) предложено использование полигармонических моделей вертикальных составляющих возмущения, основанных на результатах амплитудно-частотного анализа реальных записей показаний вагона-путеизмерителя [2–4].

В составе некоторых программных комплексов, предназначенных для моделирования динамики механических систем, применяется несколько вариантов моделей возмущающих воздействий. В программном комплексе «Универсальный механизм» (УМ) наряду с возможностью самостоятельного задания неровностей путевой структуры существует возможность загрузки записей неровностей рельсовых нитей, зарегистрированных по результатам измерений реальной геометрии рельсового пути [5–7].

Методика моделирования

Достаточно подробно в работах [8–11] исследованы характеристики возмущений, вызывающих колебания подвижного состава, подробно изложена методика получения случайного процесса возмущения и применения его к моделям динамического анализа тележек вагонов. Алгоритмы получения возмущений $\eta(t)$ построены на основе заданной корреляционной функции или спектральной плотности эквивалентной геометрической неровности пути $G_\eta(\omega)$.

В работе [8] предложена корреляционная функция

$$R_{\eta_l}(x_\tau) = S_{\eta_l}^2 \sum_k a_{\eta_k}^2 e^{-(\alpha_{\eta_k})^2 (x_\tau)^2} \cos(2\pi\beta_{\eta_k} x_\tau), \quad (1)$$

где x_τ [м] – сдвиг максимума взаимной корреляционной функции относительно начала координат; η_k – доля дисперсии $S_{\eta_l}^2$ случайного процесса, приходящаяся на k -ю составляющую корреляционной функции ($k = 1, 2, \dots$), причем $\sum_k a_{\eta_k}^2 = 1$; β_{η_k}

[м^{-1}] и α_{η_k} [м^{-1}] – частота максимума и относительный коэффициент затухания k -й составляющей корреляционной функции.

Для случая многомерного возмущения в работах предложены методики генерации случайных про-

цессов с помощью формирующих фильтров [12–14]. Согласно [15] формирующим фильтром называется динамическая система, преобразующая случайные величины белого шума в случайный процесс $\eta(t)$ с заданными статистическими характеристиками. Белый шум представляет собой стационарный случайный процесс с постоянной спектральной плотностью S_0 , его корреляционная функция представляется следующим образом:

$$K_\eta(\tau) = 2\pi S_0 \delta(\tau), \quad (2)$$

где $\delta(\tau)$ – дельта-функция Дирака.

Если учесть, что $\eta(t)$ – гауссовский процесс с нормированным условием ($S_0 = \text{const}$, математическое ожидание $M\eta(t) = 0$), то спектральную плотность процесса можно представить в виде произведения двух комплексно сопряженных сомножителей $S_\xi(\omega) = S(i\omega) S(-i\omega)$.

Тогда передаточная функция примет вид:

$$W(p) = \frac{S(p)}{\sqrt{S_0}}. \quad (3)$$

Т. е. для определения передаточной функции формирующего фильтра требуется найти преобразование Лапласа корреляционной функции случайного процесса:

$$S(p) = L[R_{\eta_l}(x_\tau)] = \int_0^\infty R_{\eta_l}(x_\tau) e^{-px_\tau} dx_\tau. \quad (4)$$

Для этого функция оригинала $R_{\eta_l}(x_\tau)$ должна иметь ограниченный порядок возрастания, т. е. удовлетворять условию

$$R_{\eta_l}(x_\tau) < ae^{bx_\tau}, \text{ при } x_\tau > 0, a > 0, b > 0. \quad (5)$$

В силу того, что в составе корреляционной функции (1) экспонента имеет квадратичную зависимость от сдвига максимума взаимной корреляционной функции относительно начала координат $\exp[-(\alpha_{\eta_k})^2 (x_\tau)^2]$, условие (5) не выполняется и преобразование Лапласа или Z-преобразование в дискретном виде без линеаризации исходной функциональной зависимости осуществить невозможно.

Линеаризацию корреляционной функции предлагается произвести введением дополнительных весовых коэффициентов G_k :

$$R_{\eta_l}^*(x_\tau) = S_{\eta_l}^2 \sum_k a_{\eta_k}^2 e^{-(\alpha_{\eta_k} G_k)^2 x_\tau} \cos(2\pi\beta_{\eta_k} x_\tau), \quad (6)$$

которые находятся из следующего уравнения:

$$\int_0^L e^{-(\alpha_{\eta_k})^2 (x_\tau)^2} dx_\tau - \int_0^L e^{-(\alpha_{\eta_k} G_k)^2 x_\tau} dx_\tau = 0. \quad (7)$$

Произведя интегрирование в пределах, где функция с заданной точностью сходится к нулю (от

0 до $L = 1,5$ км), получаем уравнение следующего вида, где функция $\text{erf}(X) = \int_0^X e^{-(x_\tau)^2} dx_\tau$:

$$\frac{\sqrt{\pi} \cdot \text{erf}\left(L \cdot \sqrt{\alpha_{\eta_k}}\right)}{2 \cdot \sqrt{\alpha_{\eta_k}}} + \frac{e^{-L \cdot \alpha_{\eta_k}^2 \cdot G_k^2} - 1}{\alpha_{\eta_k}^2 \cdot G_k^2} = 0. \quad (8)$$

В работе [8] (Приложение В) приведены значения параметров аналитического выражения корреляционных функций случайных процессов неровностей пути из пяти слагаемых, при подстановке которых в уравнение (8) находим весовые коэффициенты G_k .

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчета весовых коэффициентов линеаризации корреляционных функций

Table 1. Initial data and results of calculation of linearization weights of correlation functions

Вид неровности рельсов	Результат		
	k	L_{η_k} , м	G_k
Вертикальная левая $S^2 = 27 \text{ мм}^2$	1	100	22,669
	2	50	10,622
	3	25	7,7064
	4	12,5	7,3302
	5	6,25	6,7183
Вертикальная правая $S^2 = 26,2 \text{ мм}^2$	1	100	21,397
	2	50	10,622
	3	25	7,7064
	4	12,5	7,3302
	5	6,25	6,7183

Сравнение графиков свидетельствует о том, что синхронность затухания графиков корреляционной функции сохраняется, что является одной из важных характеристик адекватности модели. Вместе с тем недостает нелинейности затухания волн длиной 25 м, что на сдвиге x_τ до 70 м проявляется в снижении амплитуд, а в более дальних периодах (x_τ в пределах от 70 до 200 м) волны указанной частоты становятся более выраженными. Приведенный анализ говорит о том, что на основании линеаризованной корреляционной функции возможно построить достаточно приемлемое описание динамических свойств формирующего фильтра во временной области.

Найдем в соответствии с (3), (4) спектральную плотность случайного процесса в виде преобразования Лапласа $S(p) = L[R_{\eta_l}(x_\tau)]$ для каждой k -ой гармоники корреляционной функции. Учитывая, что $S_0 = 1$ выражение примет вид передаточной функцией формирующего фильтра для k -ой гармоники случайного процесса, где $C = (G_k \cdot \alpha_{\eta_k})^2$

$$W(p) = \frac{a_{\eta_k} \cdot p + a_{\eta_k} \cdot C}{p^2 + 2 \cdot C \cdot p + 4\pi^2 \beta_{\eta_k}^2 + C^2}. \quad (9)$$

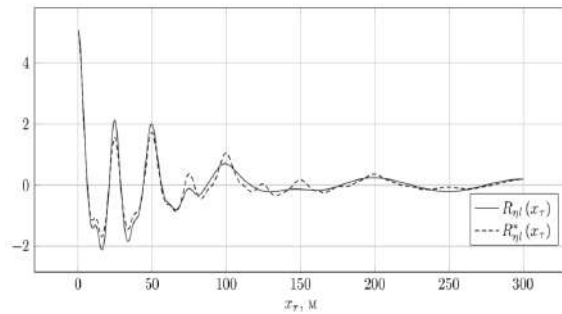


Рис. 1. График исходной (—) и линеаризованной (---) корреляционной функции
Fig. 1. Plot of the original (—) and linearized (---) correlation function

Вычислим пять передаточных функций для левой и правой рельсовой нити и сформируем каскад формирующих фильтров по предложенной схеме (рис. 3). На выходе каскада дополнительно установлен низкочастотный фильтр Баттерворта (Lowpass) [16] с частотой среза 2 рад/с, который обеспечивает достаточную гладкость выходного сигнала и исключает излишние шумы при использовании сгенерированных возмущений в задачах исследования динамической системы «железнодорожный состав – путь».

Результаты моделирования

Модель генератора эквивалентных вертикальных неровностей левого и правого рельса разработана в пакете Matlab Simulink [17, 18]. Как видно из графика спектральной плотности, формирующий фильтр обеспечивает пропуск максимальных амплитуд на частотах, соответствующих длинам волн (1/100; 1/50; 1/25; 1/12,5; 1/6,25) (см. табл. 1).

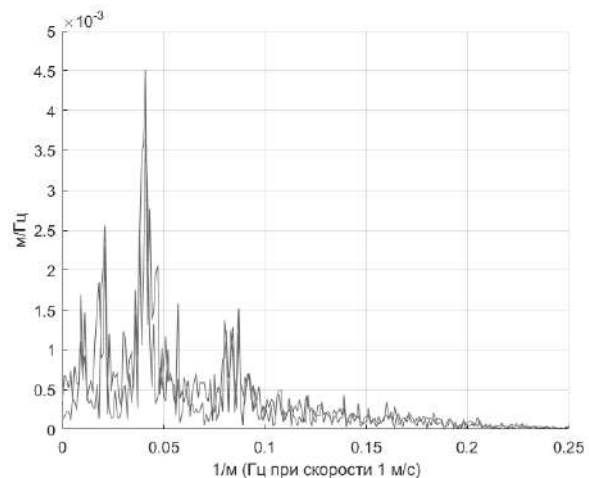


Рис. 2. График амплитудного спектра
Fig. 2. Amplitude spectrum graph

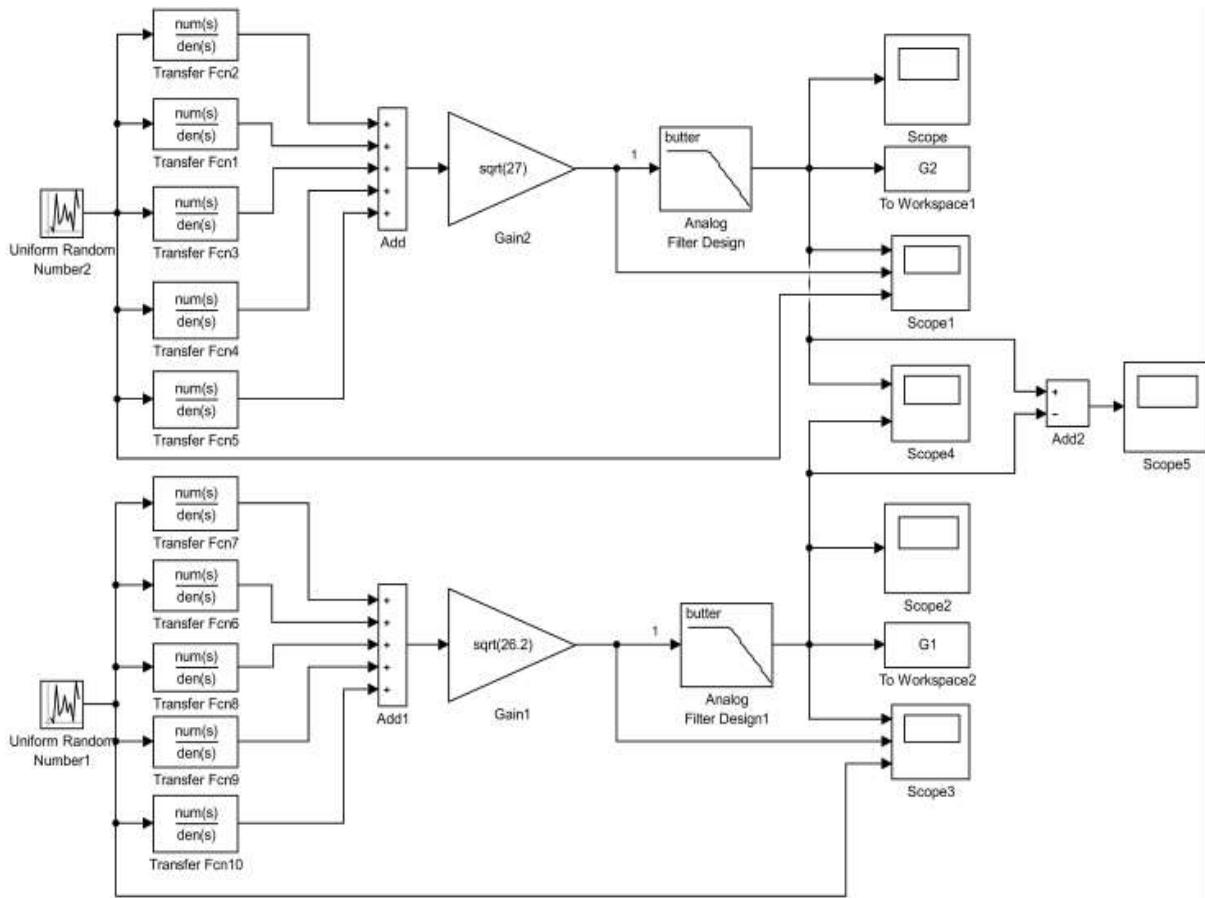


Рис. 3. Блок-схема формирующих фильтров для генерации эквивалентной вертикальной неровности левой и правой рельсовых нитей железнодорожного пути

Fig. 3. Block diagram of forming filters for generation of equivalent vertical irregularity of left and right rail lengths of the railway track

Предложенный каскад формирующих фильтров рассчитан для скорости $V_0 = 1$ м/с, когда временная область идентична перемещению вдоль рельса $\Delta x = V_0 \cdot \Delta t = \Delta t$. При пересчете передаточных функций (9) под заданную скорость возникает эффект снижения амплитуд генерирующих эквивалентных неровностей в силу того, что формирующий фильтр обеспечивает пропуск белого шума только в заданной частотной области. Дополнительно к сказанному для заданной скорости движения требуется постоянно пересчитывать все передаточные функции фильтра. В целях исключения подобного предложено определение неровности при заданной скорости движения $V > 1$ м/с с помощью масштабирования неровности при скорости $V_0 = 1$ м/с:

$$\eta_v(n\Delta t) = \eta_1\left(n \frac{\Delta x}{V}\right) \quad (10)$$

Тогда первую производную эквивалентной неровности найдем из следующего выражения:

$$\dot{\eta}_v(t) = \frac{\partial \eta_1(t)}{\partial t}, \quad (11)$$

с учетом подстановки $t = n \Delta t$, $\partial t = \frac{\partial x}{V}$ получим

$$\dot{\eta}_v(t) = V \cdot \frac{\partial \eta_1\left(n \frac{\Delta x}{V}\right)}{\partial x}. \quad (12)$$

Выражение (12) говорит о том, что первую производную эквивалентной неровности для заданной скорости можно получить путем умножения производной при единичной скорости и соответствующем масштабировании аргумента.

Заключение

Предложенная модель генератора эквивалентных вертикальных неровностей железнодорожного пути достаточно точно моделирует возмущения от железнодорожного пути, что подтверждается сходством спектральных характеристик сгенерирован-

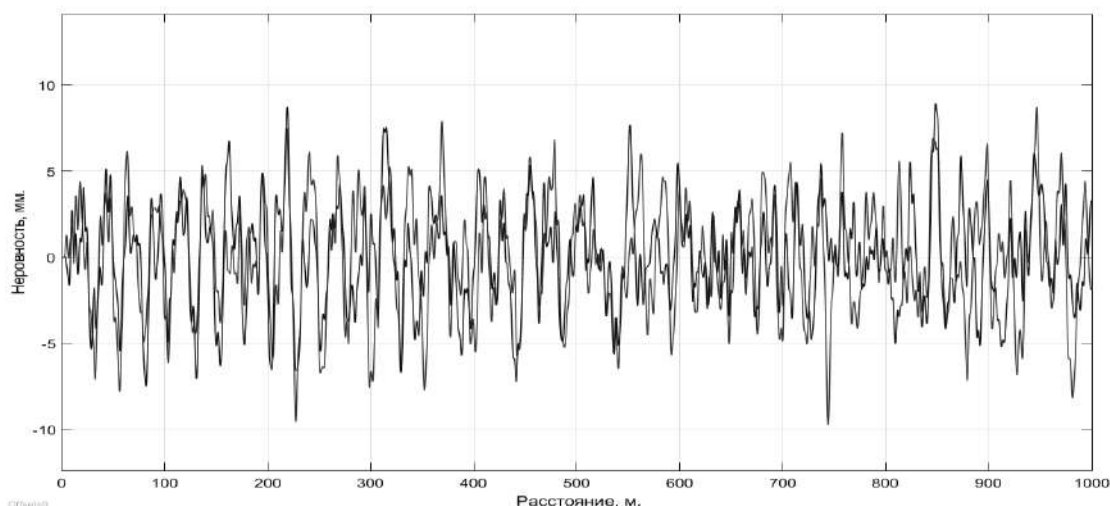


Рис. 4. График сгенерированных вертикальных неровностей левой и правой рельсовых нитей железнодорожного пути

Fig. 4. Graph of generated vertical irregularities of left and right rail lengths of the railway track

ных случайных процессов с данными, отраженными в работах [8–11].

Достоинство предложенной модели в простоте схемных решений и применении стандартных аналоговых блоков моделирования пакета Matlab

Simulink, что позволяет использовать предложенную модель совместно с моделью исследуемой динамической системы (грузового вагона) непосредственно в данном пакете.

Список литературы

1. РД 32.68 96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. М. : ВНИИЖТ, 1996. 17 с.
2. Лапина Л.Г., Машенко И.А. Амплитудно-частотный анализ вертикальных неровностей железнодорожного пути // Техническая механика. 2012. № 3. С. 9–15.
3. Ушкалов В.Ф., Лапина Л.Г., Машенко И.А. Расчетные возмущения для исследования динамики железнодорожных вагонов // Залізничний транспорт України. 2012. № 1. С. 38–41.
4. Ушкалов В.Ф., Лапина Л.Г., Машенко И.А. Расчетные возмущения для оценки динамических качеств грузовых вагонов // Вестн. Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп: Наука и прогресс транспорта. 2013. № 4 (46). С. 135–144.
5. Универсальный механизм. Моделирование динамики механических систем : сайт. URL: <http://www.umlub.ru/>.
6. Универсальный механизм. Моделирование динамики железнодорожных экипажей (Руководство пользователя). URL: <http://www.umlub.ru/>.
7. Универсальный механизм. Моделирование взаимодействия железнодорожных экипажей и пути (Руководство пользователя). URL: <http://www.umlub.ru/>. Электронный адрес № 5, данные страницы не ищутся
8. Акишин А.А. Горизонтальные колебания и движение в кривых моторного вагона электропоезда на четырех одноосных тележках с пневмоподвешиванием : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 355 с.
9. Акишин А.А., Савоськин А.Н. Генерация многомерного случайного процесса возмущений в задачах динамики подвижного состава железных дорог // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 2-3. С. 71–78.
10. Ромен Ю.С., Савоськин А.Н., Акишин А.А. Анализ случайных процессов геометрических неровностей рельсовых нитей // Изв. Петерб. ун-та путей сообщ. 2014. № 1 (38). С. 22–32.
11. Ромен Ю.С., Савоськин А.Н., Акишин А.А. Характеристики возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей // Вестник НИИЖТ. 2013. № 6. С. 21–30.
12. Шапоров С.Д., Родин Б.П. Случайные процессы : учебник. СПб. : Балт. гос. техн. ун-т., 2010. 237 с.
13. Матыаш И., Шилханек Я. Генератор случайных процессов с заданной матрицей спектральных плотностей // Автоматика и телемеханика. 1960. Т. XXI, № 1. С. 29–34.
14. Чабунин И.С. Моделирование случайного микропрофиля дорожной поверхности методом формирующего фильтра // Известия МГТУ МАМИ. 2013. Т. 1, № 1 (15). С. 218–224.
15. Шалыгин А.С., Палагин Ю.И. Прикладные методы статистического моделирования. Ленинград : Машиностроение, 1986. 320 с.
16. Шлипки П.Ю., Богданов М.Б. Метод разработки цифрового фильтра Баттерворта для анализа измерительных сигналов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 9. № 1. С. 54–58.

17. Герасимов А.И., Регада В.В., Регада О.Н. Моделирование в среде MATLAB-Simulink : метод. указ. к лаборат. работам. Пенза : Изд-во ПГУ, 2017.

18. Шмидт И.А., Попов А.П., Нарбеков Р.Р. Автоматизация процесса моделирования в программном пакете MATLAB SIMULINK // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2018. № 12. С. 303–306.

References

1. RD 32.68 96. Raschetnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya ispol'zovaniya pri issledovaniyakh i proektirovaniy passazhirskikh i gruzovykh vagonov [Estimated irregularities of the railway track for use in research and design of passenger and freight cars]. Moskva: VNIIZhT Publ., 1996. 17 p.

2. Lapina L.G., Mashchenko I.A. Amplitudno-chastotnyi analiz vertikal'nykh nerovnostei zheleznodorozhnogo puti [Amplitude-frequency analysis of vertical irregularities of the railway track]. *Tekhnicheskaya mekhanika [Technical mechanics]*, 2012. No. 3. Pp. 9–15.

3. Ushkalov V.F., Lapina L.G., Mashchenko I.A. Raschetnye vozmushcheniya dlya issledovaniya dinamiki zheleznodorozhnykh vagonov [Calculated disturbances for studying the dynamics of railway cars]. *Zalozhnykh transport Ukraini [The railway transport of the Ukraine]*, 2012. No. 1. Pp. 38–41.

4. Ushkalov V.F., Lapina L.G., Mashchenko I.A. Raschetnye vozmushcheniya dlya otsenki dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov [Calculated perturbations for assessing the dynamic properties of freight cars]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akad. V. Lazaryana [The Bulletin of the Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]*, 2013. No. 4 (46). Pp. 135–144.

5. Universal'nyi mekhanizm. Modelirovanie dinamiki mekhanicheskikh sistem [Universal mechanism. Simulation of the dynamics of mechanical systems] [Electronic media]. URL: <http://www.umlab.ru/>. Accessed: ???

6. Universal'nyi mekhanizm. Modelirovanie dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhei (Rukovodstvo pol'zovatelya) [Universal mechanism. Modeling the dynamics of railroad vehicles (User's Guide)] [Electronic media]. URL: <http://www.umlab.ru/>

7. Universal'nyi mekhanizm. Modelirovanie vzaimodeistviya zheleznodorozhnykh ekipazhei i puti (Rukovodstvo pol'zovatelya) [Universal mechanism. Modeling the interaction of railway crews and tracks (User's Guide)] [Electronic media]. URL: <http://www.umlab.ru/>.

8. Akishin A.A. Gorizontallye kolebaniya i dvizhenie v krivykh motornogo vagona elektropoezda na chetyrekh odnoosnykh telezhkakh s pnevmopodveshivaniem: dissertatsiya na soiskanie kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.22.07 [Horizontal vibrations and movement in curves of a motor car of an electric train on four uniaxial trolleys with pneumatic suspension: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.07]. Moskva: Moskovskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniya Publ., 2015. 355 p.

9. Akishin A.A., Savos'kin A.N. Generatsiya mnogomernogo sluchainogo protsesssa vozmushchenii v zadachakh dinamiki podvijnogo sostava zheleznykh dorog [Generation of a multidimensional random process of perturbations in problems of the dynamics of rolling stock of railways]. *Nauchno-tekhnicheskije vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta [St. Petersburg State Polytechnical University Journal]*, 2015. Pp. 71.

10. Romen Yu.S., Savos'kin A.N., Akishin A.A. Analiz sluchainykh protsessov geometricheskikh nerovnostei rel'sovykh nitsei [Analysis of random processes of geometric irregularities of rail lines]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2014. No. 1 (38). Pp. 22–32.

11. Romen Yu.S., Savos'kin A.N., Akishin A.A. Kharakteristiki vozmushchenii, vyzyvayushchikh kolebaniya rel'sovykh ekipazhei []. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Vniizht Bulletin (Railway Research Institute Bulletin)]*, 2013. No. 6. Pp. 21–30.

12. Shaporev S.D., Rodin B.P. Sluchainye protsessy: uchebnik. SPb.: Balt. gos. tekhn. un-t., 2010. 237 p.

13. Matyash I., Shilkhanek Ya. Generator sluchainykh protsessov s zadannoy matritsei spektral'nykh plotnostei []. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemekhanika]*, 1960. Vol. XXI. No. 1. Pp. 29–34.

14. Chabunin I.S. Modelirovanie sluchainogo mikroprofilya dorozhnoi poverkhnosti metodom formiruyushchego fil'tra [Modeling a random micro-profile of a road surface by the shaping filter method]. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2013. Vol. 1. No. 1 (15). Pp. 218–224.

15. Shalygin A.S., Palagin Yu.I. Prikladnye metody statisticheskogo modelirovaniya [Applied methods of statistical modeling]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1986. 320 p.

16. Shlipkin P.Yu., Bogdanov M.B. Metod razrabotki tsifrovogo fil'tra Buttervorta dlya analiza izmeritel'nykh signalov [Method of developing a digital Butterworth filter for analyzing measuring signals]. *Interekspo Geo-Sibir' [Interekspo Geo-Siberia]*, 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 54–58.

17. Gerasimov A.I., Regeda V.V., Regeda O.N. Modelirovanie v srede MATLAB-Simulink. Metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam [Simulation in MATLAB-Simulink. Methodical instructions for laboratory work]. Penza: PGU Publ., 2017.

18. Shmidt I.A., Popov A.P., Narbekov R.R. Avtomatizatsiya protsesssa modelirovaniya v programmnom pakete MATLAB SIMULINK [Automation of the modeling process in the MATLAB SIMULINK software package]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya [Scientific and technical Volga region bulletin]*, 2018. No. 12. Pp. 303–306.

Информация об авторах

Михайлов Эдуард Леонидович – начальник отдела, Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: nrs_mihajlovel@esrr.ru; DomatDynamics@yandex.ru

Information about the authors

Eduard L. Mikhailov – Head of Department, the East Siberian Railway, a branch of Russian Railways OAO, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: nrs_mihajlovel@esrr.ru; DomatDynamics@yandex.ru

Определение собственных и взаимных сопротивлений в многопроводных системах, содержащих подземные провода

В. П. Закарюкин¹, А. В. Крюков^{2,3}✉

¹ООО «Smart grid», г. Иркутск, Российская Федерация

²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ and_kryukov@mail.ru

Резюме

Моделирование режимов электрических сетей, включающих в свой состав многопроводные элементы с надземными и подземными проводами, требует учета ряда специфических особенностей: расположение части проводов в подземных полостях, приводящее к отсутствию емкостной связи с надземными токоведущими частями; повышенные величины емкостных параметров подземных проводов; возможное наличие активной проводимости «провод – земля», приводящее к необходимости обязательного учета распределенности параметров. В статье предложена методика определения собственных и взаимных сопротивлений проводов в многопроводных системах, содержащих подземные провода. При разработке моделей многопроводных элементов с подземными проводами использовались следующие положения: провода параллельны поверхности плоской однородной земли с заданной удельной проводимостью; пересечения проводов в одном элементе не допускаются; при использовании цепных понятий собственного и взаимного сопротивлений предполагается их определение через продольную электродвижущую силу, индуцируемую в контуре «провод – земля»; подземные провода располагаются внутри одной или нескольких цилиндрических полостей в земле; емкостная связь существует только между проводами, расположенными в одной полости; взаимноиндуктивная связь имеет место между всеми проводами элемента. При рассмотрении емкостных связей группы подземных проводов использован метод конформных изображений, дающий приемлемую точность моделирования при соблюдении соотношений между радиусами проводов и их расстояниями до границ полости в земле. Проверка правильности разработанного алгоритма проведена путем сопоставления с формулами погонной емкости цилиндрического конденсатора, а также емкости одиночного провода, расположенного над землей на большой высоте. Проверка точности определения взаимного сопротивления для непараллельных проводов выполнена путем сопоставления результатов следующих расчетов: по приближенным формулам, для почти параллельного сближения и параллельного сближения. Полученные результаты показали приемлемую точность определения собственных и взаимных сопротивлений в многопроводных системах, содержащих подземные провода.

Ключевые слова

многопроводные системы, подземные провода, собственные и взаимные сопротивления

Для цитирования

Закарюкин В.П. Определение собственных и взаимных сопротивлений в многопроводных системах, содержащих подземные провода / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 184–191. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).184-191

Информация о статье

поступила в редакцию: 09.11.2020, поступила после рецензирования: 17.12.2020, принята к публикации: 15.01.2021

Determination of self- impedances and mutual impedances in multi-wire systems containing underground wires

V. P. Zakaryukin¹, A. V. Kryukov^{2,3}✉

¹“Smart grid” OOO, Irkutsk, the Russian Federation

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ and_kryukov@mail.ru

Abstract

Modeling the modes of electrical networks, which include multi-wire elements with overhead and underground wires, has a number of specific features: the location of some of the wires in underground cavities, resulting in the absence of capacitive coupling with above-ground conducting wires; increased values of self-capacitive parameters of underground wires; the possible presence of active conductivity “wire – ground”, leading to the need for mandatory consideration of parameter distribution. The article proposes a method for determining self- impedances and mutual impedances of wires in a multi-wire system containing underground wires. When developing models of multi-wire elements with underground wires, the following positions were used:

wires are parallel to the surface of a flat homogeneous earth with a given specific conductivity; intersections of wires in one element are not allowed; when using chain concepts of self-impedances and mutual resistances, it is assumed that they are determined through the longitudinal electromotive force induced in the wire-ground circuit; underground wires are located inside one or more cylindrical cavities in the ground; capacitive coupling exists only between wires located in the same cavity; mutual inductive coupling takes place between all wires of the element. When considering the capacitive couplings of a group of underground wires, the method of conformal mappings was used, which gives an acceptable accuracy of modeling while respecting the relationship between the radii of the wires and their distances to the boundaries of the cavity in the ground. The verification of the correctness of the developed algorithm was carried out by comparing the linear capacitance of a cylindrical capacitor with the formulas, as well as the capacitance of a single wire located above the ground at a high altitude. Verification of the accuracy of determining the mutual resistance for non-parallel wires is performed by comparing the results of the following calculations: by approximate formulas; for an almost parallel convergence and a parallel convergence. The obtained results showed an acceptable accuracy in determining self-impedances and mutual resistances in multi-wire systems containing underground wires.

Keywords

multi-wire systems, underground wires, self-impedances and mutual impedances

For citation

Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Opredelenie sobstvennykh i vzaimnykh soprotivlenii v mnogoprovodnykh sistemakh, soderzhashchikh podzemnyye provoda [Determination of self-impedances and mutual impedances in multi-wire systems containing underground wires]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 184–191. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).184-191

Article Info

Received: 09.11.2020, Revised: 17.12.2020, Accepted: 15.01.2021

Введение

Моделирование режимов электрических сетей (ЭС), включающих в свой состав многопроводные элементы с подземными проводами, требует учета ряда специфических особенностей:

- расположение подземных проводов в подземных полостях, приводящее к отсутствию емкостной связи с надземными токоведущими частями и повышенные величины собственных емкостей;

- возможное наличие активной проводимости «провод – земля», приводящее к необходимости учета распределенности параметров;

- возможное непараллельное расположение одного из проводов по отношению к остальным, в частности, в случае рассмотрения электромагнитных влияний на подземный трубопровод.

Перечисленные особенности важны для определения режима ЭС и для расчетов наведенных напряжений. Для учета этих особенностей при разработке моделей многопроводных элементов с подземными проводами приняты следующие основные положения.

1. Прямолинейные провода параллельны поверхности плоской однородной земли с заданной удельной проводимостью. Некоторые из проводов могут быть не параллельны друг другу.

2. Пересечения проводов друг с другом не допускаются. Это положение не приводит к ограничениям моделирования ситуаций с пересечениями проводов, поскольку последнее может быть представлено соединением двух отдельных моделей друг с другом.

3. Система декартовых координат для задания положений проводов выбрана следующим образом. Плоскость XOY системы координат расположена в начале многопроводного элемента перпендикулярно

левому крайнему проводу. Начало координат находится на поверхности плоской земли, ось Y перпендикулярна поверхности земли, ось X направлена вдоль поверхности направо, если смотреть от начала элемента к его концу, ось Z – вдоль левого крайнего провода. Предпочтительно начало координат поместить под крайним левым проводом.

4. Точный подход к определению индуктивных сопротивлений элемента с подземными проводами, даже для параллельной ситуации и отсутствия надземных токоведущих частей, требует решения трансцендентных уравнений, что создает значительные трудности при программной реализации. При использовании цепных понятий собственного и взаимного сопротивлений предполагается их определение через продольную электродвижущую силу (ЭДС), индуктируемую в контуре «провод – земля» или в контуре, образованном токоведущей частью и эквивалентным обратным проводом (ЭОП). В связи с большой глубиной расположения ЭОП магнитный поток в упомянутом контуре мало зависит от высоты или глубины расположения провода, поэтому с небольшой погрешностью можно воспользоваться формулами определения собственных и взаимных сопротивлений надземных проводов. Такой подход допустим при глубине расположения не более первых десятков метров и на частотах, не превышающих нескольких сотен герц.

5. Подземные провода располагаются внутри одной или нескольких цилиндрических полостей. Каждая полость, ось которой параллельна расположенным внутри нее проводам, образует группу подземных проводов. Полость заполнена изоляцией с заданной диэлектрической проницаемостью. Прово-

да могут иметь распределенную однородную омическую связь с окружающей землей.

6. Емкостная связь существует только между проводами, расположенными в одной полости или между надземными проводами. Взаимоиндуктивная связь имеет место между всеми токоведущими частями.

Известные решения проблемы наведенных напряжений сводятся к нахождению взаимных емкостей [1, 2] или сопротивлений [1-4] при заданных параметрах режима влияющего провода. Собственные и взаимные сопротивления проводов определяются на основе решения Карсона [5] или Г.А. Гринберга и Б.Э. Бошштедта [6], как, например, в работах [1, 2, 4, 7-9]. Вычисления на основе методики [6] требуют решения системы трансцендентных уравнений.

Известные подходы для расчетов наведенных напряжений косоугольного сближения базируются либо на предположении его замены набором участков параллельного [10], либо на использовании решения М.В. Костенко [3].

Все перечисленные методы не работают при необходимости учета взаимовлияний проводов, приводящих к изменению режима влияющего провода. Это касается, к примеру, ситуации взаимовлияний цепей двухцепной линии электропередачи с возникновением дополнительной несимметрии напряжений каждой цепи, или ситуации взаимовлияния линий «провод – рельс» и «два провода – рельс» на электрифицированной железной дороге с возникновением небалансов учета электроэнергии. Использование решетчатых схем замещения [11], когда моделируется вся совокупность взаимовлияющих проводов, позволяет получать модели, пригодные для расчетов режимов с учетом емкостных и индуктивных взаимовлияний и определения наведенных напряжений, в том числе при косоугольном сближении [12]. При наличии подземных проводов с возможным вариантом косоугольного сближения подход работ меняется в связи с изложенными положениями.

При рассмотрении емкостных связей группы подземных проводов использован метод конформных изображений, дающий приемлемую погрешность моделирования при соблюдении соотношений между радиусами проводов и их расстояниями до границ полости в земле.

Строго говоря, применение цепных моделей при косоугольном сближении недостаточно корректно, поскольку задача из одномерной превращается в трехмерную, а длины проводов элемента отличаются друг от друга. В этом случае использование величин взаимных сопротивлений приводит к погрешностям, которые могут быть практически приемлемы при представленных далее условиях.

Методика и результаты моделирования

Формирование решетчатой схемы замещения

многопроводного элемента по методике [11] предполагает расчеты потенциальных коэффициентов системы проводов, расположенных в одной подземной полости. Их можно вычислить путем использования формул дробно-линейного конформного преобразования с учетом следующих факторов:

- конформное отображение преобразует окружности небольшого диаметра также в окружности с точностью до малых высших порядков [13], поэтому цилиндрические провода малого радиуса, преобразуются в провода круглого сечения;

- при конформных преобразованиях сохраняются потенциалы электродов, собственные и взаимные емкости, потенциальная энергия электрического поля [14], отсюда следует неизменность потенциальных коэффициентов;

- при преобразованиях изменяются конфигурация и линейные размеры электродов, напряженность поля и плотность зарядов.

Для применения первой группы формул Максвелла необходимо отобразить круг Z подземной полости в верхнюю полуплоскость W (рис. 1), записать формулы для отображения и затем определить потенциальные коэффициенты по формулам для плоской проводящей земли.

Отображение круга на верхнюю полуплоскость производится преобразованием

$$w = \frac{\tilde{a}z - a}{z - k}, \quad (1)$$

где \underline{a} , \underline{k} – комплексные константы, \tilde{a} – сопряженный комплекс \underline{a} [13].

Выражение (1) при $\underline{k} = -1$, $\underline{a} = -j$ для круга единичного радиуса может быть представлено в виде, совпадающем с формулами (7–17) в работе [15, 16]

$$w = \frac{-zj + j}{z + 1} = j \frac{1 - z}{1 + z}.$$

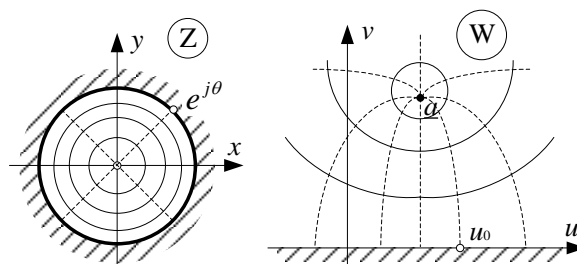


Рис. 1. Поперечные сечения областей в пространстве Z и W

Fig. 1. Cross-sections of regions in space Z and W

Преобразование для круга радиусом r_0 с центром в точке $\underline{z}_0 = x_0 + jy_0$ производится по следу-

ющим формулам:

$$\begin{aligned} \underline{z}_1 &= r_0 \underline{z} + \underline{z}_0; \quad \underline{z} = \frac{\underline{z}_1 - \underline{z}_0}{r_0}; \\ \underline{w} &= j \frac{r_0 - \underline{z}_1 + \underline{z}_0}{r_0 + \underline{z}_1 - \underline{z}_0}. \end{aligned} \quad (2)$$

После нахождения преобразованных радиусов проводов r_{ri} и координат их центров (r_{ui}, r_{vi}) в пространстве W определяются собственные и взаимные потенциальные коэффициенты:

$$\begin{aligned} \alpha_{ii} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{2r_{vi}}{r_{ri}}; \\ \alpha_{ij} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{(r_{ui} - r_{uj})^2 + (r_{vi} + r_{vj})^2}{(r_{ui} - r_{uj})^2 + (r_{vi} - r_{vj})^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из одинаковости энергии электрического поля в пространствах Z и W [14] следует равенство потенциальных коэффициентов. По ним для каждой группы могут быть определены собственные и взаимные частичные емкости, необходимые для построения решетчатой схемы замещения многопроводного элемента [11].

Алгоритм расчета собственных и взаимных емкостей подземной группы проводов включает пять этапов.

1. Каждая группа предполагается расположенной внутри собственной цилиндрической полости в земле. Производится контроль расположения проводов внутри цилиндрической полости: наиболее удаленная от ее центра точка провода не должна заходить за пределы полости или касаться ее границы. Разные полости не должны пересекаться.

2. Определение отображения окружности провода в пространстве W выполняется следующим образом. Уравнение окружности для провода радиусом r_i , центр которого находится в точке $\underline{z}_i = x_i + jy_i$ плоскости Z , определяется как

$$\begin{aligned} r_i &= |\underline{z}_1 - \underline{z}_i|; \quad \underline{z}_1 = r_0 \underline{z} + \underline{z}_0; \\ r_i &= \left| \frac{j-u-jv}{j+u+jv} r_0 + x_0 - x_i + j(y_0 - y_i) \right|. \end{aligned} \quad (4)$$

Преобразование формулы (4) приводит к следующим выражениям для окружности в пространстве W :

$$(u - r_{ui})^2 + (v - r_{vi})^2 = r_{ri}^2,$$

где $r_{ui} = \frac{c_i(b_i + d_i)}{r_{bci}^2}$; $r_{vi} = \frac{r_{bdi}^2}{r_{bci}^2}$;

$$r_{ri}^2 = \frac{r_{cdi}^2}{r_{bci}^2} + r_{ui}^2 + r_{vi}^2; \quad r_{bci}^2 = b_i^2 - (r_i^2 - c_i^2);$$

$$r_{bdi}^2 = r_i^2 - c_i^2 + b_i d_i; \quad r_{cdi}^2 = r_i^2 - c_i^2 - d_i^2;$$

$$b_i = r_0 + x_i - x_0; \quad c_i = y_i - y_0;$$

$d_i = r_0 - x_i + x_0$; x_0, y_0, r_0 – координаты центра полости и ее радиус.

В пространстве W центр провода расположен в точке (r_{ui}, r_{vi}) , радиус провода r_{ri} . Центр окружности пространства Z не совпадает с центром окружности пространства W .

3. В пространстве W определяются собственные и взаимные потенциальные коэффициенты по формулам (3).

Если в полости находится одиночный провод и он расположен по ее центру, то емкость провода определяется формулой цилиндрического конденсатора:

$$\alpha_{11} = \frac{\ln(r_0/r_1)}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}; \quad C_1 = \frac{1}{\alpha_{11}}. \quad (5)$$

4. По потенциальным коэффициентам для каждой группы определяются собственные и взаимные емкости проводов. Емкостные связи между проводами разных групп полагаются отсутствующими.

5. При моделировании подземных проводов предполагается учет возможного их контакта с землей путем задания проводимости активного шунта на единицу длины.

Проверка правильности разработанного алгоритма проведена путем сопоставления погонной емкости цилиндрического конденсатора, определяемой формулой:

Таблица 1. Сопоставление расчетов с точными формулами

Table 1. Comparison of calculations with exact formulas

Объект	$r_0, \text{ м}$	$x_0, \text{ м}$	$y_0, \text{ м}$	$r_1, \text{ м}$	$x_1, \text{ м}$	$y_1, \text{ м}$	$C_1, \text{ пФ/км}$	$C_2, \text{ пФ/км}$	Различие, %
Цилиндрический конденсатор	0,15	0	0,15	0,01	0	0,15	20,53	20,50	-0,2
	0,15	0	0,15	0,03	0	0,15	34,55	33,73	-2,4
	0,15	0	0,15	0,05	0	0,15	50,61	46,19	-8,8
	0,15	0	0,15	0,07	0	0,15	72,96	57,97	-20,5
	0,15	0	0,15	0,10	0	0,15	137,1	71,92	-47,6
Одиночный провод над землей	15	0	15	0,03	0	1,0	13,24	13,35	0,8

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{r_0}{r_1}},$$

а также емкости одиночного провода, расположенного над землей:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2y_1}{r_1}}$$

при большой высоте расположения провода, в сопоставлении с расчетами емкости C_2 по представленному алгоритму. В случае одиночного провода над землей сравнение происходит с емкостью C_2 для полости большого диаметра. Результаты сопоставительных расчетов приведены (табл. 1). Фактически здесь речь идет о погрешностях замены провода конечного радиуса тонким проводником.

Можно сделать вывод о том, что провода в цилиндрической полости для погрешности не более 10–13 % необходимо располагать так, чтобы расстояние от оси провода до границы полости было бы не менее 60 % радиуса провода.

Собственные и взаимные индуктивные сопротивления подземных проводов определяются без разделения их на группы в предположении малого влияния магнитного поля в изоляционных покровах. Применение для подземных проводов тех же соотношений для собственных сопротивлений ближней зоны, что и для надземных токоведущих частей, используется в работах [1, 2], хотя в работе [2] формула собственного внешнего сопротивления немного отличается от формул работ [1, 17]. Этот подход предполагает малое различие магнитного потока контура «смежный провод – земля» при подземном расположении смежного провода по сравнению с надземным.

Собственное внешнее сопротивление для частоты 50 Гц и высших гармоник практически всегда удовлетворяет условию ближней зоны:

$$r\sqrt{\gamma\omega\mu_0} < 0,25$$

и определяется следующими формулами:

$$\underline{Z}_{out} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1,85}{r\sqrt{\gamma\omega\mu_0}}, \text{ Ом/м,}$$

или

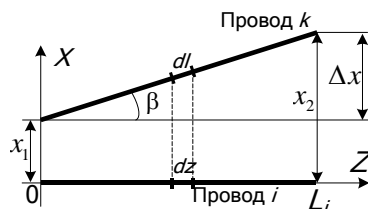


Рис. 2. Схема взаимного расположения влияющего и смежного проводов при косом сближении и совмещении оси Z' с проекцией на поверхность земли провода i

Fig. 2. Scheme of the relative position of the influencing and adjacent wires at oblique convergence and alignment of the Z' axis with the projection of the wire i on the ground surface

$$\underline{Z}_{внеш} = 0,001 f +$$

$$+ j f \left[0,01148 - 0,001256 \ln \left(r \sqrt{0,02\gamma f} \right) \right],$$

где f – частота, Гц; r – эквивалентный радиус провода (в первой формуле в метрах, во второй – в сантиметрах); γ – удельная проводимость однородной земли, См/м; μ_0 – магнитная постоянная [11, 17].

Формулы для внутреннего сопротивления проводов приведены в работах [11, 18].

Сопротивление взаимной индуктивной связи между парой проводов при соблюдении условия

$$d\sqrt{\gamma\omega\mu_0} < 0,25$$

определяется по соотношению следующего вида:

$$\underline{Z}_M = \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1,85}{d\sqrt{\gamma\omega\mu_0}}, \text{ Ом/м,} \quad (6)$$

или

$$\underline{Z}_M = 0,001 f +$$

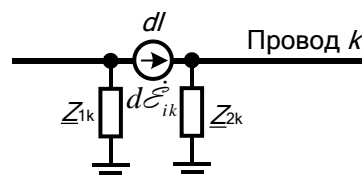
$$+ j f \left[0,005693 - 0,001256 \ln \left(d \sqrt{0,02\gamma f} \right) \right],$$

где $d = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}$ – расстояние между проводами i и k с координатами (x_i, y_i) , (x_k, y_k) , м.

При косом сближении (рис. 2), если подземный провод изолирован от земли и коэффициент затухания мал, то можно по-прежнему обойтись суммарной наведенной ЭДС по его длине, т. е. использовать интегральное взаимное сопротивление.

При утечке тока в землю необходимо учитывать распределенность параметров провода и наводимой ЭДС. По аналогии с работой [3] можно пренебречь затуханием и изменением фазы влияющего тока в пределах рассматриваемого участка. Длины ячеек цепочной схемы, замещающей многопроводную длинную линию, следует выбирать примерно на уровне 1/4 толщины скин-слоя в земле. Учет распределенности требуется и для надземных проводов в случае наличия распределенных шунтов при косом или параллельном сближении.

Методика расчета взаимного сопротивления [18] при наличии подземных проводов напрямую неприменима, поскольку формулы Карсона [5] построены на основе дополнения зеркального отображения



проводов в земле. Можно ограничиться выражениями взаимного сопротивления косоугольного сближения для ближней зоны [3], которое при внимательном рассмотрении оказывается работающим для расстояний, превышающих ближнюю зону интеграла Карсона. В соответствии с работой [3] взаимноиндуктивное сопротивление при косом сближении (рис. 3) определяется приближенными формулами:

$$\underline{Z}_{12L} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi\alpha} [F(a_{\max}) - F(a_{\min})], \text{ Ом}; \quad (7)$$

$$F(a) = a \ln \frac{a^2 + \underline{h}_e^2}{a^2 + (h_1 - h_2)^2} + 2\underline{h}_e \arctg \frac{a}{\underline{h}_e} - 2(h_1 - h_2) \arctg \frac{a}{h_1 - h_2},$$

где h_1, h_2 – высоты расположения влияющего провода и провода, подверженного влиянию (для подземного провода высота отрицательна);

$\underline{h}_e = h_1 + h_2 + (1-j)\sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}}$; ρ – удельное сопротивление

земли; остальные обозначения на (рис. 3).

Для численной реализации удобно ввести следующие обозначения:

$$\underline{z}_1 = z_{1R} + jz_{1I} = \frac{a^2 + \underline{h}_e^2}{a^2 + (h_1 - h_2)^2};$$

$$\underline{z}_2 = \frac{a}{\underline{h}_e}; \quad \underline{z}_3 = z_{3R} + jz_{3I} = \frac{j - \underline{z}_2}{j + \underline{z}_2},$$

тогда

$$\underline{F}_1(a) = a[0,5 \cdot \ln(z_{1R}^2 + z_{1I}^2) + j \arg(\underline{z}_1)];$$

$$\underline{F}_2(a) = \underline{h}_e[\arg(\underline{z}_3) - j0,5 \cdot \ln(z_{3R}^2 + z_{3I}^2)];$$

$$\underline{F}(a) = \underline{F}_1(a) + \underline{F}_2(a) - 2(h_1 - h_2) \arctg \frac{a}{h_1 - h_2}.$$

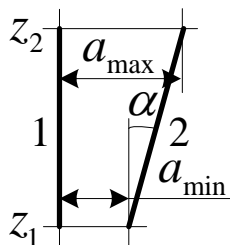


Рис. 3. Схема расположения проводов многопроводной системы

Fig. 3. Wiring layout of a multi-wire system

Для параллельного сближения сопротивление на единицу длины по [3] после подстановки констант определяется выражением

$$\underline{Z}_{12} = j0,00062831853f \ln \frac{a^2 + \underline{h}_e^2}{a^2 + (h_1 - h_2)^2},$$

Ом/км.

При удельном сопротивлении земли более 1 000 Ом·м и высокой частоте, а также на большом расстоянии между проводами приближенные формулы могут давать погрешности.

Существует, однако, проблема применения цепных понятий собственного и взаимного сопротивлений, заключающаяся в том, что длина провода, ориентированного по оси Z, относительно которого отсчитываются углы, минимальна, а длины других проводов больше, т. е. провод i имеет длину, равную

$\sqrt{L^2 + \Delta x_i^2}$, и это не главное обстоятельство, ограничивающее применение этого подхода. При непараллельных проводах нарушается плоскопараллельная картина поля и использование понятия сопротивления приводит к дополнительным погрешностям. В первом приближении относительной погрешностью подхода можно считать величину $(\sqrt{L^2 + \Delta x_i^2} - L)/L$. Если ограничиться достаточно большой погрешностью в 20 %, то максимальное отклонение наиболее «косого» провода равно $\Delta x_{\max} = 0,66L$, или $\beta_{\max} = 42^\circ$, что вполне приемлемо для практически важных случаев.

При формировании цепочечной схемы для каждой ячейки этой схемы предполагается использование формул косоугольного сближения (7).

Проверочные расчеты проведены путем сопоставления следующих результатов:

- вычислений по приближенным формулам;
- расчетов для почти параллельного сближения по изложенному алгоритму;
- расчетов по формулам параллельного сближения.

Полученные результаты приведены для частоты 50 Гц при удельной проводимости земли 0,01 См/м, высоте влияющего провода 6 м, высоте провода, подверженного влиянию, – 5 м и длине влияющего провода 10 км (табл. 2). Вещественные части взаимных сопротивлений, вычисляемые по разным методам, практически совпадают.

Данные показывают интересную особенность в различиях параметров, определенных по формулам [3] и по (6): почти везде последние данные меньше первых на одно и то же значение 0,005 Ом/км (см. табл. 2). Относительные различия, однако, находятся в рамках обозначенной погрешности принятой аппроксимации не более 6 % [3].

Расхождения становятся достаточно большими только при значительном удалении проводов друг от друга, когда расстояние выходит за пределы

Таблица 2. Сопоставление расчетов мнимой части взаимного сопротивления, Ом/км
Table 2. Comparison of calculations of the imaginary part of the mutual resistance, Ohm/km

№ п/п	a_{\min} , м	a_{\max} , м	Z_{12} паралл. проводов при a_{\min} [3]	Z_{12} параллельных проводов при a_{\min} по формулам (6)	Различие, %	Z_{12} [3]	Z_{12} по формулам [18]	Различие, %
1	99,9	100	0,145	0,140	3,6	0,145	0,140	3,6
2	10	100	0,265	0,260	1,9	0,189	0,184	2,7
3	50	100	0,187	0,182	2,7	0,164	0,159	3,1
4	50	500	0,187	0,182	2,7	0,091	0,086	5,8
5	50	1000	0,187	0,182	2,7	0,056	0,048	16,7
6	1	500	0,284	0,279	1,8	0,103	0,099	4,0
7	750	750,1	0,023	0,014	39	–	–	–

ближней зоны, для которой предназначена формула (6). Можно заметить еще один немаловажный момент: формулы [3] позиционируются приемлемыми также и для значений волнового параметра $d\sqrt{\gamma\omega\mu_0} > 0,25$.

Последняя строка (см. табл. 2) приведена для оценки границ применимости формул [3]. При ширине сближения параллельных проводов 750 м приведенные формулы уже не работают ($d\sqrt{\gamma\omega\mu_0} = 1,49 > 0,25$). Вычисление сопротивления с помощью рядов [18, 19] дает значение 0,027 Ом/км, что отличается от 0,023 Ом/км на 15 %; при увеличении ши-

рины сближения отклонения возрастают. Таким образом, применение формул [3] для вычислений собственных и взаимных сопротивлений оказывается предпочтительным, и они работают на частоте 50 Гц до расстояний между проводами 500–750 м.

Заключение

Разработанная методика определения собственных и взаимных сопротивлений в многопроводных системах, содержащих подземные провода, предназначена для использования в алгоритмах расчета режимов электрических сетей в фазных координатах. Методика реализована в программном комплексе «Fazonord».

Список литературы

1. Михайлов М.И., Разумов Л.Д. Защита кабельных линий связи от влияния внешних электромагнитных полей. М. : Связь, 1967. 343 с.
2. Вэнс Э.Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели. М. : Радио и связь, 1982. 120 с.
3. Костенко В.М. Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле // Электричество. № 10. 1955. С. 29–34.
4. Наведенные продольные напряжения в параллельных воздушных линиях электропередачи / М.Ш. Мисриханов, С.Г. Мурзин, В.Н. Седунов и др. // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. № 5(3), Т. 14. С. 808–814.
5. Carson J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell Syst. Tech. J. 1926. № 5. P. 539–554.
6. Гринберг Г.А., Бонштедт Б.Э. Основы точной теории волнового поля линий электропередачи // ЖТФ. 1954. Т. 24. Вып. 1. С. 67–95.
7. Волновые процессы и перенапряжения в подземных линиях / М.В. Костенко, Н.И. Гумерова, А.Н. Данилин и др. СПб. : Энергоатомиздат, 1991. 232 с.
8. Слышалов В.К., Кандалов Ю.В. Электромагнитное поле и параметры подземных трубопроводов с антикоррозионным покрытием // Вестник ИГЭУ. 2011. Вып. 5. С. 1–7.
9. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М. : Энергия, 1973. 272 с.
10. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. М. : Транспорт, 1989. 134 с.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2005. 273 с.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Определение наведенных напряжений при непараллельном сближении линий электропередачи // Электрические станции. № 5. 2015. С. 47–52.
13. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М. : Наука, 1973. 736 с.
14. Методы расчетов электростатических полей / Н.Н. Миролубов, М.В. Костенко, М.Л. Левинштейн и др. М. : Высш. шк., 1963. 415 с.
15. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. М. : Энергия, 1970. 375 с.
16. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 2. М. : Высш. шк., 1981. 408 с.
17. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330–500 кВ. М. : Энергия, 1974. 472 с.

18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи // Изв. вузов. Энергетика. № 3-4. 2015. С. 29–35.
19. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М. : Физматгиз, 1963, 1100 с.

References

- Mikhailov M.I., Razumov L.D. Zashchita kabel'nykh linii svyazi ot vliyaniya vneshnikh elektromagnitnykh polei [Protection of cable communication lines from the influence of external electromagnetic fields]. Moscow: Svyaz' Publ., 1967. 343 p.
- Vance E.F. Zashchita kabel'nykh linii svyazi ot vliyaniya vneshnikh elektromagnitnykh polei [Influence of electromagnetic fields on shielded cables]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1982. 120 p.
- Kostenko V.M. Vzaимnye soprotivleniya mezhdu vozdushnymi liniyami s uchetom poverkhnostnogo effekta v zemle [Mutual resistances between overhead lines taking into account the surface effect in the ground]. *Elektrichestvo [Electricity]*, No. 10, 1955. Pp. 29–34.
- Misrikhanov M.Sh., Murzin S.G., Sedunov V.N., Tokarskii A.Yu. Navedennye prodol'nye napryazheniya v parallel'nykh vozdushnykh liniyakh elektroperedachi [Induced longitudinal stresses in parallel overhead power lines] *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [The Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*, No. 5 (3). Vol. 14. 2012. Pp. 808–814.
- Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell Syst. Tech. J.*, No. 5, 1926. Pp. 539–554.
- Grinberg G.A., Bonshtedt B.E. Osnovy tochnoi teorii volnovoogo polya linii elektroperedachi [Fundamentals of the exact theory of the wave field of power lines]. *ZhTF [Journal of Theoretical Physics]*, 1954. Vol. 24. Issue 1. Pp. 67–95.
- Kostenko M.V., Gumerova N.I., Danilin A.N. et al. Volnovye protsessy i perenapryazheniya v podzemnykh liniyakh [Wave processes and overvoltage in underground lines]. St. Petersburg: Energoatomizdat Publ., 1991. 232 p.
- Slyshalov V.K., Kandalov Yu.V. Elektromagnitnoe pole i parametry podzemnykh truboprovodov s antikorroziionnym pokrytiem [Electromagnetic field and parameters of underground pipelines with anti-corrosion coating]. *Vestnik IGEU [Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University]*, Issue 5, 2011. Pp. 1–7.
- Kostenko M.V., Perel'man L.S., Shkarin Yu.P. Volnovye protsessy i elektricheskie pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya [Wave processes and electrical noise in multi-wire high voltage lines]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 272 p.
- Pravila zashchity ustroystv provodnoi svyazi i provodnogo veshchaniya ot vliyaniya tyagovoi seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka [Rules for the protection of wire communication devices and wire broadcasting from the influence of the traction network of alternating current electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1989. 134 p.
- Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonessimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkutsk University Publ., 2005. 273 p.
- Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Opredelenie navedennykh napryazhenii pri neparallel'nom sblizhenii linii elektroperedachi [Determination of induced voltages in case of non-parallel convergence of power lines]. *[Electric stations]*, No. 5, 2015. Pp. 47–52.
- Lavrent'ev M.A., Shabat B.V. Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo [Methods of the theory of functions of the complex variable]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 736 p.
- Mirolubov N.N., Kostenko M.V., Levinstein M.L., Tikhodeev N.N. Metody raschetov elektrosticheskikh polei [Methods of calculating electrostatic fields]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1963. 415 p.
- Binns K. J., Launderson P. J. Analysis and computation of electric and magnetic field problems. Pergamon Press, 1963, 324 p. (Russ. ed.: Binns K. Dzh., Launderson P. Dzh. Analiz i raschet elektricheskikh i magnitnykh polei. Moscow: Energiya Publ., 1970, 375 p.).
- Neiman L.R., Demirchan K.S. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. T. 2. [Theoretical foundations of electrical engineering. Vol. 2]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1981. 408 p.
- Mel'nikov N.A., Rokotyan S.S., Sherentsis A.N. Proektirovanie elektricheskoi chasti vozdushnykh linii elektroperedachi 330–500 kV [Design of electrical parts of 330–500 kV overhead power transmission lines]. Moscow: Energiya Publ., 1974. 472 p.
- Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Utochnyonnaya metodika opredeleniya vzaimnykh elektromagnitnykh vliyaniy smezhnykh linii elektroperedachi [A refined method for determining the mutual electromagnetic influences of adjacent power lines]. *Izvestiya vuzov. Energetika [Bulletin of higher educational institutions. Energy]*, No. 3-4, 2015. Pp. 29–35.
- Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedenii [Tables of integrals, sums, series and products]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1963, 1100 p.

Информация об авторах

Закарюкин Василий Пантелеймонович – д-р техн. наук, доцент, ООО «Smart grid», г. Иркутск, e-mail: zakar49@mail.ru
Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Information about the authors

Vasilii P. Zakaryukin – Doctor of Engineering Science, Associate Professor, “Smart grid” ООО, e-mail: zakar49@mail.ru
Andrei V. Kryukov – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Достигнутый результат внедрения поста акселерометрического универсального контроля и дальнейшие перспективы при определении дефектов на поверхности катания колес вагонов

А. С. Ададунов¹, А. В. Нерезков², В. И. Федорова², О. А. Суслов², А. В. Лесников²✉

¹АО «ВНИИЖТ»

²Научный информационно-аналитический центр АО «ВНИИЖТ»

✉ Lesnikov.Andrej@vniizht.ru

Резюме

В статье описывается методология возникновения основных дефектов на поверхности катания колеса и представлена современная технология определения и диагностирования этих дефектов на ходу поезда, основанная на акселерометрическом и акустико-эмиссионном методе. Технология представляет из себя пост акселерометрического универсального контроля, эксплуатирующийся по всей территории железных дорог общего пользования ОАО «Российские железные дороги». Пост позволяет выявлять дефекты поверхности катания колесных пар с точностью до стороны конкретного колеса вагона и оперативно передавать данные оператору на пункт технического обслуживания вагонов. Система исключает человеческий фактор в части осмотра колесных пар осмотрщиками вагонов на пунктах технического осмотра. Представлены вид и описание возможностей комплексного диагностического центра, собирающего всю техническую информацию с каждой системы, что позволяет в дальнейшем выгружать различную информацию в удобном виде для пользователя и также анализировать работу. Комплексный диагностический центр помогает контролировать работу 80 систем в реальном времени и своевременно уведомлять ответственных специалистов о неисправностях. В работе описаны дальнейшие пути развития системы и комплексного диагностического центра в части расширения функционала системы по оснащению его тензометрическими датчиками для определения загруженности подвижного состава и разработки предиктивных моделей для прогнозирования развития дефектов поверхности катания колес колесных пар.

Ключевые слова

дефект на поверхности катания, система диагностики, подвижной состав, железнодорожный путь, комплексный диагностический центр

Для цитирования

Ададунов А. С. Достигнутый результат внедрения поста акселерометрического универсального контроля и дальнейшие перспективы при определении дефектов на поверхности катания колес вагонов / А. С. Ададунов, А. В. Нерезков, В. И. Федорова, О. А. Суслов, А. В. Лесников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 192–199. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).192-199

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.12.2020, поступила после рецензирования: 19.12.2020, принята к публикации: 12.01.2021

The achieved result of the introduction of the universal accelerometric control station and further prospects for determining railcar wheel thread defects

A. S. Adadurov¹, A. V. Nerezkov², V. I. Fedorova², O. A. Suslov², A. V. Lesnikov²✉

¹All-Russian Railway Research Institute (VNIIZHT) AO

²The branch of VNIIZHT Data-Analytic Research Center (NIATs)

✉ Lesnikov.Andrej@vniizht.ru

Abstract

The article describes the methodology of the main defects' occurrence on the wheel thread and presents a modern technology of determining and diagnosing these defects under way, based on the accelerometric and acoustic emission method. The technology is a station of accelerometric universal control, operated throughout the public railways of "Russian Railways" OAO. The station allows you to detect wheel thread defects with accuracy to the side of a particular wheel of the railcar and quickly transmit data to the operator at the railcar check station (RCS). The system eliminates the human factor in the part of the wheelset inspection by the railcars inspectors at the RCS. The view and description of the capabilities of an integrated diagnostic center that collects all the technical information from each system, which allows you to further download various information in a convenient form for the user and also allows you to download the performance analysis. The integrated diagnostic center also allows monitoring the operation of 80 systems in real time and notifying responsible specialists of malfunctions on time. The article also describes the

further development of the system and the integrated diagnostic center in terms of expanding the functionality of the system to equip it with strain gauges for determining the load of rolling stock and developing predictive models to predict the development of wheel thread defects.

Keywords

wheel thread defect, diagnostic system, rolling stock, railway track, comprehensive diagnostic center

For citation

Adadurov A. S., Nerezkov A. V., Fedorova V. I., Suslov O. A., Lesnikov A. V. Dostignutyi rezul'tat vnedreniya posta akselerometricheskogo universal'nogo kontrolya i dal'neishie perspektivy pri opredelenii defektov na poverkhnosti kataniya kolyos vagonov [The achieved result of the introduction of the universal accelerometric control station and further prospects for determining railcar wheel thread defects]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 1 (69), pp. 192–199. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).192-199

Article Info

Received: 10.12.2020, Revised: 19.12.2020, Accepted: 12.01.2021

Введение

Одной из наиболее важных сборочных единиц в подвижном составе является колесная пара, которая передает нагрузку от кузова вагона и входящего в него груза на железнодорожный путь. Поэтому очень важно своевременно диагностировать возникающие повреждения поверхности катания колес и принимать меры по отцепке вагонов по причине неисправности колесных пар в ремонт для предотвращения крушений на железнодорожном транспорте. Проводить раннюю диагностику по предупреждению дефектов помогает пост акселерометрического универсального контроля (далее – ПАУК), в котором заложено определение дефектов на стадии предбраковочного размера, что позволяет определить расстояние, которое вагон пройдет с имеющимся на колесе дефектом и стадия браковочного размера, когда вагон подлежит отцепке в текущий отцепочный ремонт (ТОР).

Причины образования дефектов на поверхности катания колес

Как известно, одной из основных причин появления дефектов на колесах и рельсах является контактная усталость. Особенность взаимодействия колеса и рельса заключается в том, что в этом контакте реализуются очень высокие контактные напряжения (до 1 000 МПа иногда и выше), приводящих при больших коэффициентах трения к так называемым пластическим деформациям поверхностей трения [1]. Другая особенность процессов качения с проскальзыванием колес (особенно в кривых) имеется значительное поперечное проскальзывание, которое обусловлено силами крипа и оказывающими большее повреждающее воздействие, чем продольное (продольная сила крипа). Все описанные повреждающие воздействия приводят к возникновению дефектов поверхности катания (ДПК) колесной пары, которые наносят постоянный вред верхнему строению пути.

Силы крипа зависят от упругого скольжения или крипа, характеристик сцепления колес с рельсами, а

также износа колеса и рельса. Важную роль в этом отношении играют материалы, из которых изготовлены колеса и рельсы. Явление крипа возникает при условии, когда два твердых тела при качении друг по другу вызывают значительное взаимное давление. Значения окружных скоростей двух катящихся дуг по другу тел неравны. Безразмерный коэффициент упругого скольжения одного тела по другому (или крип) как раз и используется для определения этих отклонений от условий чистого качения двух тел. Понятие крипа вводится для продольного и поперечного направлений. Картер [2, 3] определил продольный крип ξ_x (1) и поперечный крип ξ_y (2) в виде следующих отношений:

$$\xi_x = \frac{\vartheta_{\text{хд}} - \vartheta_{\text{хчк}}}{\vartheta_{\text{хк}}}, \quad (1)$$

где $\vartheta_{\text{хд}}$ – скорость действительного поступательного движения; $\vartheta_{\text{хчк}}$ – поступательная скорость чистого качения; $\vartheta_{\text{хк}}$ – поступательная скорость, вызванная качением;

$$\xi_y = \frac{\vartheta_{\text{уд}} - \vartheta_{\text{учк}}}{\vartheta_{\text{ук}}}, \quad (2)$$

где $\vartheta_{\text{уд}}$ – скорость действительного поперечного движения; $\vartheta_{\text{учк}}$ – поперечная скорость чистого качения; $\vartheta_{\text{ук}}$ – поперечная скорость, вызванная качением [4].

Другой вид крипа – $\xi_{\text{сп}}$ – поворотный крип (3), определяемый фактором поворота двух контактирующих тел вокруг оси, перпендикулярной плоскости области контакта. Поворотный крип впервые ввел Калкер [5–7], и он определяется отношением:

$$\xi_{\text{сп}} = \frac{\omega_{\text{вт}} - \omega_{\text{нт}}}{\vartheta_{\text{нк}}}, \quad (3)$$

где $\Omega_{\text{вг}}$ – угловая скорость вращения верхнего тела;

$\Omega_{\text{нт}}$ – угловая скорость вращения нижнего тела;

$\mathcal{D}_{\text{нк}}$ – номинальная скорость качения.

Сила крива является функцией скорости и равна коэффициенту крива, умноженного на крива. Из-за «рысканья» (извилистое движение) колесной пары в пути следования (рис. 1), уравнения движения колесной пары будут иметь вид (4) и (5):

$$y: m\ddot{y} = (P_{yL} - P_{yR}) + (N_L \sin \delta_R - N_R \sin \delta_R) - (F_{\xi yL} + F_{\xi yR}); \quad (4)$$

$$x: I_z \ddot{\psi} = b(P_{xL} + P_{xR}) + (r - y\gamma)F_{\xi xR} - (r + y\gamma)F_{\xi xL}, \quad (5)$$

где P_{yL} и P_{yR} – поперечные силы, передаваемые на левую и правую торцевую часть оси; P_{xL} и P_{xR} – продольные силы, передаваемые на левую и правую часть оси; N_L и N_R – нормальные силы в левой и правой точках контакта колес с рельсами; $F_{\xi yL}$ и $F_{\xi yR}$ – поперечная сила крива в левой и правой точках контакта колес с рельсами; $F_{\xi xL}$ и $F_{\xi xR}$ – продольная сила крива в левой и правой точках контакта колес с рельсами; b – половина расстояния между точками контакта колеса с рельсом; $(r - y\gamma)$ и $(r + y\gamma)$ – разница в радиусах катания левого и правого колеса.

Возникновение продольной и поперечной сил крива связано со спецификой движения колесной пары, что подробно расписано в работе [8]. Для прямых участков пути без неровностей, движение колесной пары в рельсовой колее происходит по траектории, которую называют извилистым движением колесной пары (рис. 2). При этом боковое перемещение центра колесной пары и угол виляния изменяются по гармоническому закону [9]. Такая траектория обусловлена в общем конической формой поверхности катания колес, следствием которой является наличие разности радиусов кругов катания при наличии поперечного перемещения колесной пары [8].

Таким образом, с учетом того, что движение колесной пары связано с поперечными и продольными силами и со спецификой обслуживания вагонов на инфраструктуре (не убирают колодки при трогании, при роспуске с горок производят торможение подбросом башмаков и др.), возникают дефекты эксплуатационного и неэксплуатационного характера. Дефекты поверхности катания типа ползун, навар, выщербина, неравномерный прокат, нарушающие осевую симметрию поверхности катания колес, приводят к существенному повышению амплитудных значений ударных динамических нагрузок как на элементы ходовой части вагона, так и на железнодорожный путь [10–12]. Далее показаны взаимосвязи дефектов, неисправностей и повреждений подшипников, колес и тележек (рис. 3). Своевременное обнаружение дефектов поверхности катания, вызывающих сверхнормативные ударные нагрузки в си-

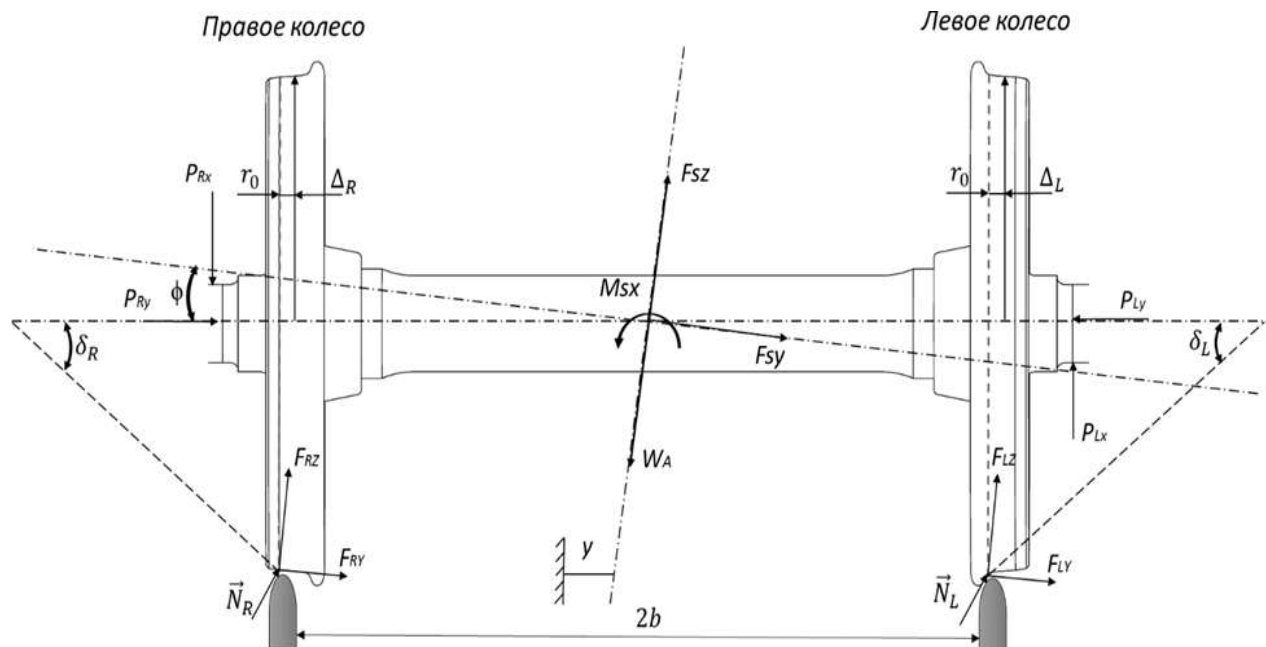


Рис. 1. Схема возможных перемещений колесной пары

Fig. 1. Diagram of possible wheelset displacements

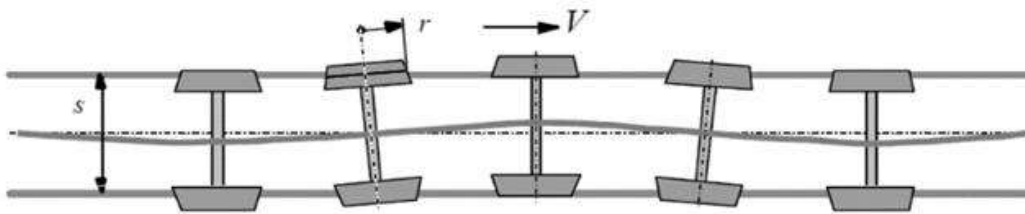


Рис. 2. Траектория движения колесной пары без проскальзывания
 Fig. 2. Trajectory of movement of the wheelset without sliding

стеме «колесо – рельс», является актуальной задачей [13–15], причем процесс обнаружения опасных дефектов поверхности катания и передачи этой информации соответствующим службам ОАО «РЖД» должен в полной мере отвечать современному уровню развития науки и техники, т. е. должен быть реализован с помощью автоматизированных систем.

Решение проблемы диагностирования дефектов поверхности катания на колесах

Решение поставленной задачи по выявлению колес с наличием дефектов на поверхности катания было реализовано ОАО «РЖД» в конце 2018 г., когда на сети началось внедрение ПАУК технического состояния колесных пар [16].

Подсистема предназначена для автоматического выявления, мониторинга, диагностики и формирования базы данных грузовых вагонов (возможно применение и для другого вида железнодорожного подвижного состава), которые имеют на поверхности катания колес колесной пары дефекты в соответствии с [17].

В состав Подсистемы входит напольное оборудование, уличный шкаф и сервер для обработки и отправки данных в пункт технического обслуживания вагонов (далее – ПТО). Напольное оборудование состоит из датчиков прохода колес, датчиков-акселерометров и датчиков акустической эмиссии, благодаря такому набору датчиков Подсистема способна определять, на каком колесе имеется дефект поверхности катания, и классифицировать дефект на соответствие браковочным размерам согласно [17]. В уличном шкафу установлены микроконтроллеры для первичной обработки, сбора информации с напольного оборудования и отправки ее на сервер. На сервере уже происходит окончательная обработка данных по разработанным алгоритмам, определяются дефекты на составе, их классификация по уровню тревог и отправляется обработанная информация на ПТО, где силами вагонного эксплуатационного депо осуществляется контроль состояния колесных пар и по необходимости отцепка в ТОР. Общий вид напольного оборудования и уличного шкафа Подсистемы на перегоне представлены (см. рис. 4).

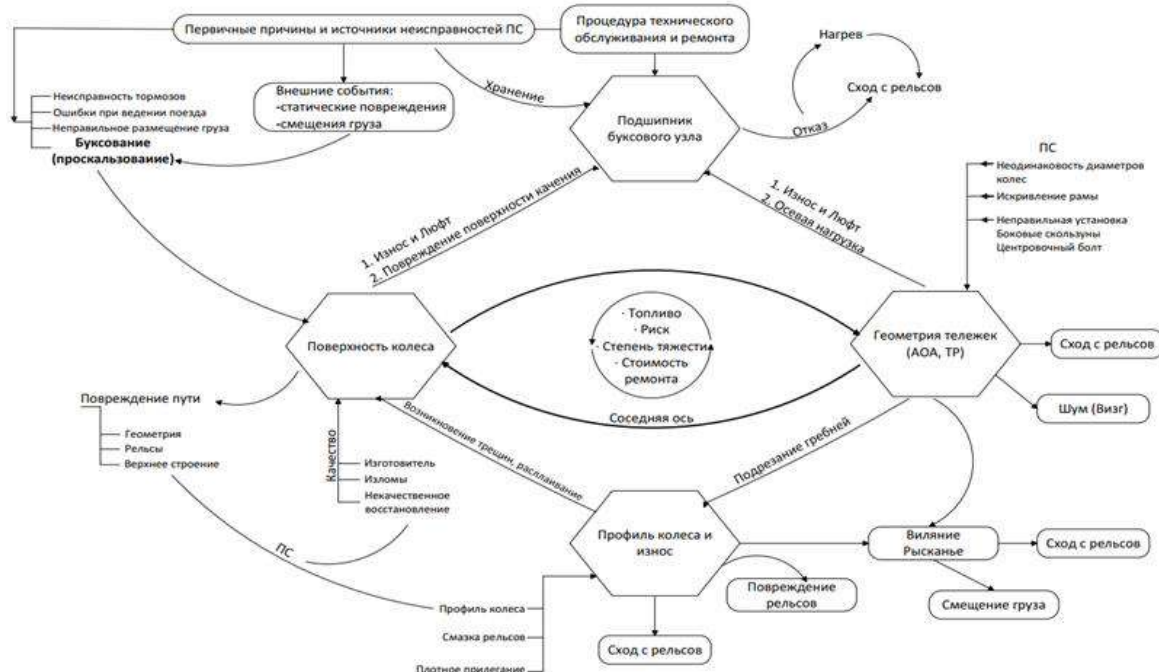


Рис. 3. Система взаимодействия подвижного состава и пути
 Fig. 3. The system of interaction between rolling stock and tracks



Рис. 4. Общий вид подсистемы
Fig. 4. General view of the subsystem

Силами специалистов Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта было организовано научно-техническое сопровождение внедрения системы, в ходе которого осуществлялась настройка и контроль ее показаний на предмет обеспечения заданных параметров надежности и работоспособности. В настоящее время введено в эксплуатацию и успешно эксплуатируется 80 Подсистем, которые позволяют определять наличие дефектов с подтвержденной достоверностью постановки диагноза не менее 99 %.

Необходимо отметить важность расположения Подсистем в Сибирском регионе (БАМ, ТрансСиб), где сосредоточены максимальные грузопотоки, внедрено тяжеловесное движение, а эксплуатация подвижного состава происходит в сложных климатических условиях, при наличии кривых малого радиуса в сочетании с затяжными спусками и подъемами.

В настоящий момент на территории Западно-Сибирской железной дороги эксплуатируются в Омском регионе три Подсистемы, Новосибирском – четыре, Барнаульском – две и Кемеровском – три. На Красноярской железной дороге в Красноярском регионе эксплуатируются две Подсистемы, в Абаканском – одна. На Восточно-Сибирской железной дороге в Тайшетском регионе эксплуатируются две Подсистемы, в Северобайкальском, Иркутском и Улан-Удэнском – по одной. На Забайкальской железной дороге две Подсистемы в Карымском районе. Таким образом, в Сибирском регионе находятся в эксплуатации 22 Подсистемы. Благодаря текуще-

му расположению Подсистем, охватывается весь грузопоток Сибирского региона (рис. 5).

За время эксплуатации подсистем вагонными эксплуатационными депо было обнаружено 976 дефектных колес, которые были направлены в ТОР, что способствовало недопущению вагонов в эксплуатацию и снижению угрозы безопасности движения. Подсистема формирует отчет по каждому пройденному составу, где указаны скорость проследовавшего состава, наличие дефекта и его оценочный критерий (критический или предупредительный) с точностью до стороны колесной пары и ее оси в поезде (например, критический дефект находится с левой стороны 3-й колесной пары вагона № 84312254, порядковый номер вагона в составе 56). В то же время после каждого прохождения грузового состава через измерительный участок и формирования отчета о нем, данные о дефектах отправляются в Систему контроля автоматизированную транспортную (далее – СКАТ), где уже аккумулируются данные со всех систем контроля подвижного состава, таких как Комплекс технических измерений, Комплекс технических средств многофункциональный, пост акустического контроля и т. д. [18, 19]. Подсистема исключает человеческий фактор из процесса обнаружения ДПК колес, что снижает риск пропуска браковочного колеса и выпуска вагона с неисправностями для дальнейшего следования. При визуальном осмотре поверхности катания колесной пары нет возможности осмотреть около 1/3 поверхности из-за наличия тормозной колодки и места соприкосновения колеса с рельсом, но благодаря правильному расположению напольного оборудования на измерительном участке, равном 6,1 м (6 датчиков по левой нити и 6 по правой нити с определенно заданным расстоянием), имеется возможность фиксировать ДПК на двух полных оборотах колесной пары, для исключения пропуска дефекта.

Вид получаемых сигналов с напольного оборудования представлен (рис. 6), где однозначно определяются удары, которые соответствуют одному ползуну на двух оборотах колесной пары.



Рис. 5. Расположение подсистем в Сибирском регионе
Fig. 5. Location of subsystems in the Siberian region

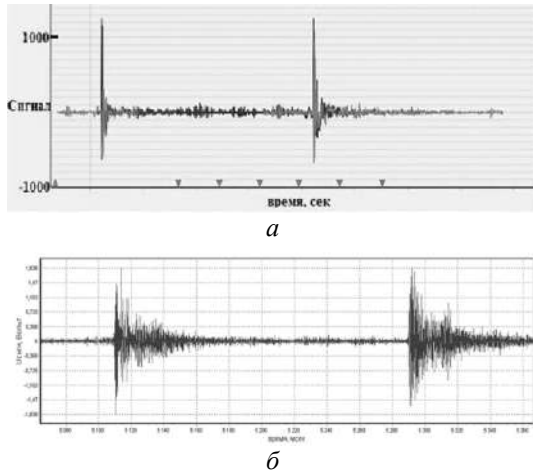


Рис. 6. Сигнал, полученный от колеса, имеющего ползун глубиной 1,3 мм:

a – датчики акселерометров;

б – акустико-эмиссионные датчики

Fig. 6. The signal received from the wheel having a slide flat with a depth of 1.3 mm:

a – accelerometer sensors;

b – acoustic emission sensors

Перспективы

В рамках сбора информации и анализа ее по всей сети железных дорог, Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта создает Комплексный диагностический центр (далее – КДЦ). Вид его интерфейса представлен далее, где на главном экране присутствует карта России с нанесенными на нее координатами всех Подсистем с отображением текущей ситуации по каждой из них (рис. 7).

Для развития КДЦ планируется реализовать контроль работоспособности Подсистем в реальном времени с сообщением об изменении их статуса ответственным специалистам. Осуществляется кон-

троль в части связи с линейным сервером, с постоянным мониторингом функционирования акселерометрических и акустических датчиков, контроля версий прошивки датчиков и микроконтроллеров. Хранение данных о состоянии колесных пар прошедших составов, количестве проследовавших осей, вагонов, составов, отсеивание для анализа пассажирских составов, самоходного специального подвижного состава, также локомотивов, следующих в одиночку. Отслеживание вагона и его состояния по всей сети железных дорог, Создание предиктивных моделей о развитии ДПК на вагонах и т. д.

Выводы

Согласно проекту «Цифровая железная дорога ОАО «РЖД», Управление вагонного хозяйства Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» приняли в эксплуатацию 80 из 80 Подсистем по всей сети железных дорог. Благодаря их работе значительно уменьшились пропуски ДПК и сократилось время обработки и осмотра подвижного состава сотрудниками ВЧДЭ в ПТО. По прибытии поезда на станцию оператор заблаговременно может отследить количество дефектов и их место, а именно, привязку к вагону, оси, стороне. ПАУК полностью интегрирован со СКАТ, который предназначен для приема, обработки и отображения информации в реальном времени от аппаратуры контроля технического состояния подвижного состава в пути следования.

В ближайшее время планируется дооснащение Подсистем тензометрическими датчиками, которые позволят измерять вес проследовавшего вагона, что будет отражаться в КДЦ и поможет более точно определять величину воздействия состава на железнодорожный путь. Перечисленные дополнения и функции Подсистемы, направленные на оптимизирование процесса контроля состояния поверхности катания колесных пар и повышение безопасности

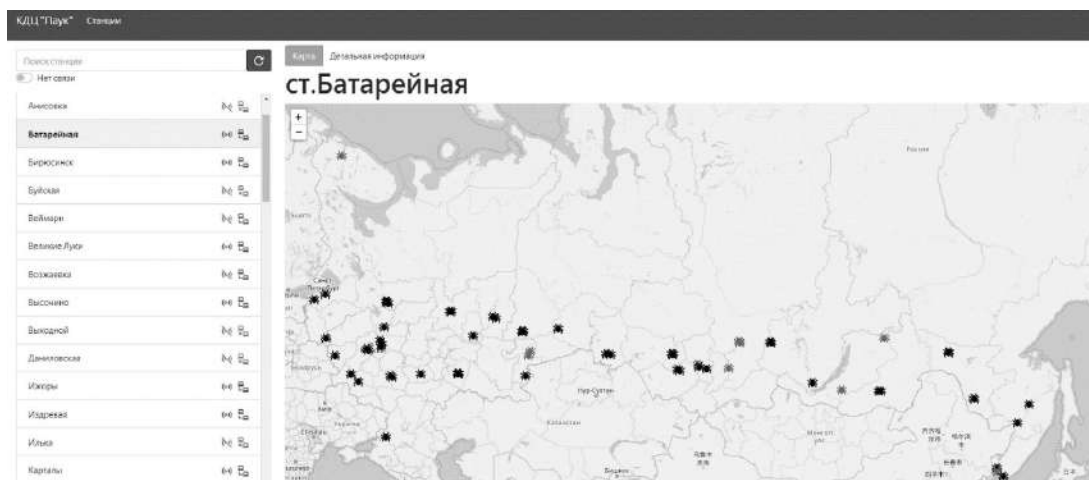


Рис. 7. Интерфейс главного экрана Комплексного диагностического центра

Fig. 7. Interface of the main screen of the Integrated Diagnostic Center

движения поездов на путях общего пользования ОАО «РЖД».

Это один из шагов на пути к переходу контроля воздействия подвижного состава на железнодорожный путь от геометрических параметров поверхности колесных пар к силовому согласно ГОСТ Р

55050-2012 «Железнодорожный подвижной состав», а также установление норм допустимого воздействия на железнодорожный путь и методов испытаний, что позволит более объективно оценивать отрицательное воздействие подвижного состава на инфраструктуру ОАО «РЖД».

Список литературы

1. Коссов В.С., Коссов В.С. Контактные задачи железнодорожного транспорта. М. : Машиностроение, 2004. 496 с.
2. Картер Ф. О действии Ведущего колеса локомотива // Труды Лондонского королевского общества. 1926. Т. 112. С. 151.
3. Картер Ф. Об устойчивости движущегося локомотива // Труды Лондонского королевского общества. 1928. Т. 121. С. 585–611.
4. Гарг В.К., Дуккипати Р.В. Динамика подвижного состава. М. : Транспорт, 1988. 391 с.
5. Калкер Д., Браун А. Обзор теории контакта качения колеса с рельсом. В общей проблеме контакта при качении // Труды Американского общества инженеров-механиков. Подразделение прикладной механики. 1980. Т. 40. С. 77–92.
6. Калкер Д. Обзор теории контакта качения колеса с рельсом // Динамика автомобильных систем. 1979. Т. 8. С. 317–379.
7. Калкер Д. Расчет износа колесных рельсов с помощью программы CONTACT // Механика контакта и износ рельсовой колесной системы. Гладуэлл ; Гонем ; Калоусек, 1987. С. 3–26.
8. Орлова А.М., Савушкин Р.А., Федорова В.И. Разработка улучшенного профиля колеса для грузового вагона. Теоретическое обоснование // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77(5). С. 269–279.
9. Ромен Ю.С., Бороненко Ю.П. Гармонизация профилей рельса и колесной пары // Вестник ВНИИЖТ. Т. 75, № 4. С. 201–206.
10. Федорова В.И., Орлова А.М., Определение основных характеристик взаимодействия колеса с рельсом для разработки улучшенного профиля колеса грузового вагона // Транспорт: проблемы, идеи перспективы : сб. тр. LXXVII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб., С. 126–130.
11. Коган А.А. Воздействие на путь поездов, имеющих в своем составе вагоны с ползунами на колесных парах // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 3. С. 3–7.
12. Гарипов Д.С., Кудюров Л.В. Динамика вагонного колеса, имеющего ползун // Вестн. транспорта Поволжья. 2010. № 3 (23). С. 64–70.
13. Сладковский А.В., Погорелов Д.Ю. Исследование динамического взаимодействия в контакте колесо – рельс при наличии ползун на колесной паре // Вісник Східноукраїнського національного університету. 2008. № 5. С. 88–95.
14. Ададунов А.С., Тюпин С.В., Лапин А.М. Техническая диагностика колесных пар: современные методы и средства выявления дефектов // Техника железных дорог. 2013. № 4. С. 32–35.
15. Матяш Ю.И., Сосновский Ю.М. и др. Повысить достоверность диагностирования технического состояния грузовых вагонов // Вагоны и вагонное хозяйство. 2017. № 3 (51). С. 45–46.
16. Пост комплексного контроля как инновационный подход к диагностике ходовой части вагона / А.С. Ададунов, Р.Ю. Бушуев и др. // Вагоны и вагонное хозяйство. 2015. № 4. С. 24–27.
17. РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм. Введ. 2018–01–01.
18. Ададунов А. Автоматизированная система контроля за работой специального подвижного состава // Бюл. объедин. учен. совета ОАО «РЖД». 2016. № 6. С. 29–35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28351488> (дата обращения 04.12.2020).
19. Веревкина О., Шапашал А., Кравец А. Технические средства обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте. Ростов н/Д : Изд-во РГУПС, 2009. С. 15–33.
20. ГОСТ Р 55050-2012 Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 2013–07–01. М. : Стандартинформ, 2013. 25 с.

References

1. Kossov V., Sakalo V. Kontaktnye zadachi zheleznodorozhnogo transporta [Railway transport contact problems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004. 496 p.
2. Carter F.W. On the action of locomotive driving wheel. *Proc. of Royal Society of London*, 1926. Vol. 112. 151 p.
3. Carter F.W. On the stability of running locomotive. *Proc. of the Royal Society of London*, 1928. Vol. 121. Pp. 585–611.
4. Garg V., Dukkipaty R. Dynamics of railway vehicle systems. Academic Press Canada, 1984. (Russ. ed.: Garg V., Dukkipaty R. Dinamika podvizhnogo sostava. In Pan'kin N (ed.), Moscow: Transport Publ., 1998. 391 p.
5. Kalker J.J. Survey of wheel-rail rolling contact theories. In the general problem of rolling contact. In Browne A.L. and Tsai N.T. (eds.) *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division*, 1980. Vol. 40. Pp. 77–92.
6. Kalker J.J. Survey of wheel-rail rolling contact theory. *Vehicle system dynamics*, 1979. Vol. 8. Pp. 317–379.
7. Kalker J.J. Wheel-rail wear calculation with the program CONTACT. *Contact mechanics and wear of rail/wheel system II*. Gladwell, Ghonem and Kalousek, 1987. Pp. 3–26.
8. Orlova A., Savushkina R., Fedorova V. Razrabotka uluchshennogo profilya koleasa dlya gruzovogo vagona. Teoreticheskoe obosnovanie [Development of an improved wheel profile for a freight car. Theoretical substantiation]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [VNIIZHT Scientific Journal]*, 2018.
9. Romen Yu. S., Boronenko Yu. P. Garmonizatsiya profilei rel'sa i kolesnoi pary [Harmonization of rail and wheelset profile]. *Vestnik VNIIZhT [VNIIZHT Scientific Journal]*, No. 75(4) Pp. 201–206.

10. Fedorova V., Orlova A. Opredelenie osnovnykh kharakteristik vzaimodeistviya koleasa s rel'som dlya razrabotki uluchshennogo profilya koleasa gruzovogo vagona [Determination of the main characteristics of the interaction of the wheel with the rail for the development of an improved profile of the railcar wheel]. *Tezisy «Nedeli nauki-2017 «Transport: problemy, idei perspektivy». Sbornik trudov LXXVII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh 17–24 aprelya 2017 g. [Abstracts of the Science Week - 2017 "Transport: Problems, Ideas of Prospects" Collection of Papers LXXVII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists April 17–24]*, 2017. Pp. 126–130.
11. Kogan A. Vozdeistvie na put' poezdov, imeyushchikh v svoem sostave vagonny s polzunami na kolesnykh parakh [Impact of trains containing railcars with slid flats on wheelsets on the track]. *Vestnik VNIIZhT [VNIIZHT Scientific Journal]*, 2014. No. 3. Pp. 3–7.
12. Garipov D., Kudyurov L. Dinamika vagonnogo koleasa, imeyushchego polzun [Dynamics of a railcar wheel with a slid flat]. *Vestnik transporta Povolzhya*, 2010. No. 3 (23). Pp. 64–70.
13. Sladovskii A., Pogorelov D. Issledovanie dinamicheskogo vzaimodeistviya v kontakte koleso – rel's pri nalichii polzunov na kolesnoi pare [Investigation of dynamic interaction in wheel-rail contact in the presence of slid flats on the wheelset]. *Visnik Skhidnoukrains'kogo natsional'nogo universitetu [Bulletin of the East Ukrainian National University]*, 2008. No. 5. Pp. 88–95.
14. Adadurov A., Tyupin S., Lapin A. Tekhnicheskaya diagnostika kolesnykh par: sovremennyye metody i sredstva vyavleniya defektov [Technical diagnostics of wheelsets: modern methods and means of detecting defects]. *Tekhnika zheleznykh dorog [Railway Equipment Magazine]*, No. 4. PK Politizdat OOO Publ, 2013. Pp. 32–35.
15. Matiash Y., Sosnovskii Y. Povysit' dostovernost' diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gruzovykh vagonov [On the increase of the reliability of diagnosing the technical condition of freight cars]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo [Railcars and rolling stock facilities]*, 2017. No. 3 (51). Pp. 45–46.
16. Adadurov A., Bushuev R. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya za rabotoi spetsial'nogo podvizhnogo sostava [Integrated control post as an innovative approach to diagnostics of the railcar truck]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo [Railcars and rolling stock facilities]*, 2015. No. 4. Pp. 24–27.
17. Rukovodyashchii dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par s bukovymi uzlamy gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm. Data vvedeniya 2018-01-01. [GD SRIRT 27.05.01-2017. Guidance document for the repair and maintenance of wheelsets with axleboxes for freight cars of 1520 (1524) mm track gauge trunk road. Date of introduction is January 01, 2018].
18. Adadurov A. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya za rabotoi spetsial'nogo podvizhnogo sostava [Automated control system for special rolling stock operation]. *Byulleten' ob "edinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD» [Bulletin of the Joint Scientific Council of "Russian Railways" OAO]*, 2016. No. 6. Pp. 29–35 [Electronic media]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28351488>.
19. Verevkina O., Shapshal A., Kravets A. Tekhnicheskie sredstva obespecheniya bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte [Technical means of ensuring safety on railway transport]. Rostov State Transport University Publ., 2009. Pp. 15–33.
20. GOST R 55050-2012 Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeistviya na zheleznodorozhnyi put' i metody ispytaniy. [GOST R 55050-2012 National Standard of Russian Federation "Railway Rolling Stock. Norms of track interaction and testing methods"].

Информация об авторах

Ададуров Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I; советник генерального директора Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, e-mail: Adadurov.Aleksandr@vniizht.ru

Федорова Вероника Игоревна – канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I; начальник отдела комплексных инновационных проектов Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, mail: Fedorova.Veronika@vniizht.ru

Суслов Олег Александрович – д-р техн. наук, профессор, Российский университет транспорта; технический эксперт отдела комплексных инновационных проектов Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, e-mail suslov.oleg@vniizht.ru

Нерезков Алексей Викторович – заместитель директора филиала по развитию Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, e-mail: Nerezkov.Alexey@vniizht.ru

Лесников Андрей Викторович – главный специалист отдела комплексных инновационных проектов Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, e-mail: Lesnikov.Andrej@vniizht.ru

Information about the authors

Aleksandr S. Adadurov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; Adviser to the Director General, All-Russian Railway Research Institute, e-mail: Adadurov.Aleksandr@vniizht.ru

Veronika I. Fyodorova – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; Head of the Integrated Innovation Projects of All-Russian Railway Research Institute, e-mail: Fedorova.Veronika@vniizht.ru

Oleg A. Suslov – Doctor of Engineering Science, Professor of the Russian University of Transport; Technical Expert of the Department of Integrated Innovation Projects of All-Russian Railway Research Institute, e-mail suslov.oleg@vniizht.ru

Aleksei V. Nerezkov – Deputy development branch director of All-Russian Railway Research Institute, e-mail: Nerezkov.Alexey@vniizht.ru

Andrei V. Lesnikov – Specialist of the Integrated Innovation Projects Department of All-Russian Railway Research Institute, e-mail: Lesnikov.Andrej@vniizht.ru

Принятие решений при проектировании железных дорог в нечеткой среде с использованием лингвистических критериев

А. А. Перельгина, В. А. Подвербный✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ vpodverbnyi@mail.ru

Резюме

В настоящее время в отечественной железнодорожной отрасли существуют проблемы, связанные с изысканием и проектированием новых железнодорожных линий. Ряд российских и зарубежных ученых посвятили свои труды вопросам проектирования железных дорог. Одним из важных этапов является определение направления для новой железнодорожной линии. На предпроектной стадии бывает сложно или слишком трудно определить точные значения по ряду показателей. На лицо, принимающее решение, ложится большая ответственность. Целью настоящей статьи является применение математического подхода в процессе принятия решений при выборе варианта направления новой железнодорожной линии. Новая железнодорожная линия проектируется в районе с преобладанием карстовых пород, основной задачей является прохождение линии в непосредственной близости к месторождениям каменного угля. Авторами запрокированы четыре варианта железнодорожной линии IV категории. Расчет значений степени предпочтения одного из вариантов оценивается по трем показателям с применением метода анализа альтернативных решений. Метод основан на теории нечетких множеств, использует нечеткое отношение порядка на множестве векторных лингвистических оценок, заданных лицом, принимающим решение. На первом этапе вычисляются степени предпочтения для каждого из вариантов по заданным критериям. На втором этапе вычисляются значения функций принадлежности. Затем степени предпочтения для вариантов рассчитываются согласно заданным критериям. На заключительном этапе показатели сравниваются, и выбирается вариант с наивысшей степенью предпочтения. Применение предлагаемого метода анализа вариантов в условиях неопределенности поможет специалистам в области изысканий и проектирования железных дорог в анализе и обосновании принимаемых решений.

Ключевые слова

оптимальное принятие решений в нечеткой среде, изыскания и проектирование железных дорог, лингвистические оценки, многокритериальный выбор, нечеткое отношение предпочтений

Для цитирования

Перельгина, А.А. Принятие решений при проектировании железных дорог в нечеткой среде с использованием лингвистических критериев / А. А. Перельгина, В. А. Подвербный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 200–208. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).200-208

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.12.2020, поступила после рецензирования: 22.12.2020, принята к публикации: 17.01.2021

Decision-making in designing railways in a fuzzy environment using linguistic criteria

А. А. Perelygina, V. A. Podverbnyi✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ vpodverbnyi@mail.ru

Abstract

At present, research in the field of railway design is of great scientific and practical importance for solving a number of problems in the transport industry. Often, at the pre-project stage, designers are faced with the task of choosing solutions in conditions of uncertainty associated with incomplete or inaccurate initial data. The aim of the work is to develop a system for supporting project decision-making, to help specialists in the analysis and justification of decision-making on the project. The paper considers an example of making design solutions under uncertainty, based on the theory of fuzzy sets using linguistic estimates. Four variants of the railway line of the fourth category were designed, and the calculation of the degree of preference for the four alternatives is estimated by three indicators. Each of the designed options has its own advantages and disadvantages. To analyze the degree of preference for alternatives, the paper considers the use of the method of analysis of alternative solutions. The method based on the theory of fuzzy sets uses a fuzzy order relation on a set of vector linguistic estimates set by the decision-maker. At the first stage, the values of the membership function of the form are calculated for each r-th criterion. At the second stage, the values of the membership functions are calculated. Next, the degrees of preference for each alternative are calculated according to the specified criteria. At the final stage, the alternatives are compared, and the option with the highest degree of preference is

selected. The application of the proposed method of analysis of variations in conditions of uncertainty will help specialists in the field of survey and design of railroads in the analysis and justification of decisions.

Keywords

optimal decision-making in a fuzzy environment, survey and design of railways, linguistic estimates, multi-criteria selection, fuzzy preference relationships

For citation

Pereylygina A. A., Podverbnyi V. A. Prinyatie reshenii pri proektirovanii zheleznykh dorog v nechetkoi srede s ispol'zovaniem lingvisticheskikh kriteriev [Decision-making in designing railways in a fuzzy environment using linguistic criteria]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 200–208. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).200-208

Article info

Received: 12.12.2020, Revised: 22.12.2020, Accepted: 17.01.2021

Введение

Железнодорожный транспорт занимает ведущее место в транспортной системе страны. В рамках реализации проекта ОАО «РЖД» «Цифровая железная дорога» особое внимание уделяется применению цифровых технологий, математических методов для решения технических задач транспортной отрасли.

Железная дорога является сложной многофункциональной технической системой большого линейного протяжения, располагающейся в различных природных и техногенных условиях. В современных условиях развития транспорта, увеличения грузооборота и пассажирооборота вопрос поиска новых подходов в проектировании железных дорог является актуальным [1].

Проектирование технических систем представляет собой сложный процесс, основанный на последовательности принятия проектных решений. Проекты новых железнодорожных линий разрабатываются с учетом потребностей промышленности, населенных пунктов, других видов транспорта, требований охраны окружающей среды и в соответствии с требованиями нормативных документов [2].

Часто на предпроектной стадии проектировщики сталкиваются с задачами выбора решений в условиях неопределенности, причинами которой являются неполные или неточные исходные данные.

На предпроектной стадии принимаются важные решения о дальнейшем развитии района проектирования. Решения, принимаемые инженерами-проектировщиками на данной стадии в условиях неопределенности и неполных данных чрезвычайно важны, их цена очень высока [3]. Поэтому важным является вопрос разработки системы поддержки принимаемых решений на предпроектной стадии. Такая система поможет специалистам при анализе и обосновании проектных решений в задачах различного уровня сложности. Например, при обосновании стратегий развития объектов мультимодальной транспортной сети и выборе вариантов изменения облика и мощности ее объектов [4], при выборе вариантов развития транспортной инфраструктуры

для мультимодальных перевозок с целью интеграции транспортной системы Российской Федерации в международные транспортные коридоры [5], вариантов развития железнодорожной сети государства с учетом ее транзитного потенциала [6] и вариантов защитных сооружений от опасных природных процессов [7], а также при выборе наилучшего варианта обеспечения надежности железнодорожного пути на основе управления этапами его жизненного цикла [8].

Существует ряд методов принятия проектных решений, направленных на реализацию задач в условиях неопределенности [9–13].

В статье рассмотрен тестовый пример проектирования железнодорожной линии IV категории с учетом региональных особенностей Восточной Сибири. Выбранный участок проектирования располагается в Черемховском районе Иркутской области.

На значительной площади Черемховского района преобладают карстовые породы, что представляет определенные сложности в проектировании железнодорожной линии. Подземные формы карста имеют высокий коэффициент пустотности карбонатных пород (около 20 %) на значительных площадях. Карст на поверхности проявлен в прибрежной части р. Белой и р. Ангары, формы карста разнообразны [14].

Карстовые воронки имеют диаметр от 1–2 до 300 м, глубина их достигает 20 м, преобладают воронки диаметром от 8 до 30 м при глубине 2–10 м, с крутизной стенок от 30 до 50° [14].

Часть воронок заполнена суглинками и на поверхности они проявляются в виде плоских блюдец глубиной 2–5 м. В результате слияния нескольких воронок местами появляются сложные воронки, состоящие из нескольких впадин, разделенных неглубокими перемычками [14].

Проектирование новых железнодорожных линий в районах карстообразования сопровождается дополнительными изысканиями по сбору подробных данных о геологическом строении района проектирования. При помощи геофизической разведки и бурения определяют степень опасности возможных просадок земляного полотна и других сооружений [15].

В проекте железнодорожной линии, при ее прохождении через карстоопасные участки, обязательно предусматривают мероприятия против активизации карстовых процессов, такие как отвод от полотна железной дороги поверхностных вод, устройство преграждающего дренажа подземных вод, ликвидация пустот путем взрывания, заполнение пустот через буровые скважины глинистоцементным раствором и др. [15].

Строительство железных дорог в карстоопасных областях ведут с особой осторожностью, а при проектировании стараются минимизировать прохождение железнодорожной линии по закарстованным участкам.

Следует также отметить, что при соединении опорных пунктов проектируемой железнодорожной линии желательнее обеспечить прохождение линии в непосредственной близости к месторождениям каменного угля в Черемховском районе Иркутской области.

Метод анализа альтернативных решений

В статье рассмотрен пример принятия проектного решения в нечеткой среде с использованием лингвистических оценок с использованием теории нечетких множеств.

Так как на предпроектной стадии сложно и трудно определить точные значения по ряду показателей, предлагается использовать лингвистические оценки, лингвистические оценки критериев, словесные, приближенные оценки.

Один из подходов к решению таких задач на основе теории нечеткой полезности приведен в работе [16]. Здесь предлагается применить метод анализа альтернативных решений в нечеткой среде [17].

Для проведения расчетов и сравнения вариантов необходимо формализовать значения критериев и с помощью расчета количественных значений предпочтительности и дальнейшего ранжирования проектируемых вариантов получить оптимальное решение.

Задачам принятия решений в нечеткой среде присуще существование множества альтернатив.

Исполнение каждой отдельной альтернативы ведет к некоторым последствиям – исходам альтернатив. Альтернативы – варианты решений, квалифицируются по различным показателям эффективности исходов альтернатив [18–24].

Проведение анализа опирается на мнение проектной команды или непосредственно лица, принимающего решения.

Задачу принятия решений можно представить в виде модели:

$$\langle A, E, X, K, P \rangle, \quad (1)$$

где A – множество вариантов проектного решения (множество альтернатив); E – среда задачи, определяющая условия, в которых она решается; X – множество исходов; K – векторный критерий оценки

исходов; P – структура предпочтений (определяет процедуру сравнения оценок $K(X)$) [19].

Каждому отдельному варианту решений (альтернативе) $a_i \in A$, будет соответствовать один единственный детерминированный или случайный исход $x_i \in X$. Исход характеризуется векторной оценкой $K(x_i)$.

Процедура сравнения оценок $K(x_i)$, проходит согласно уставленной ранее структуре предпочтений P [17].

Результатом проведения анализа вариантов (альтернатив) в условиях неопределенности будет являться нахождение наиболее предпочтительного, удовлетворяющего всем ограничениям задачи варианта проектного решения.

Пример принятия решений в нечеткой среде

Задача принятия решений по выбору варианта направления проектируемой железнодорожной линии представлена далее (рис 1).

Учитывая региональные особенности и цели проектирования железнодорожной линии, были запроектированы четыре варианта направления:

$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$: a_1 – южный вариант направления; a_2 – центральный вариант направления; a_3 – северный вариант направления; a_4 – комбинированный вариант направления.

Определены критерии оценок исходов $K = \{K_1, K_2, K_3\}$, где K_r – оценки исходов по критериям: K_1 – длина варианта направления; K_2 – протяженность варианта направления по геологически неблагоприятным карстоопасным участкам района проектирования; K_3 – приближение варианта направления к очагу месторождений каменного угля.

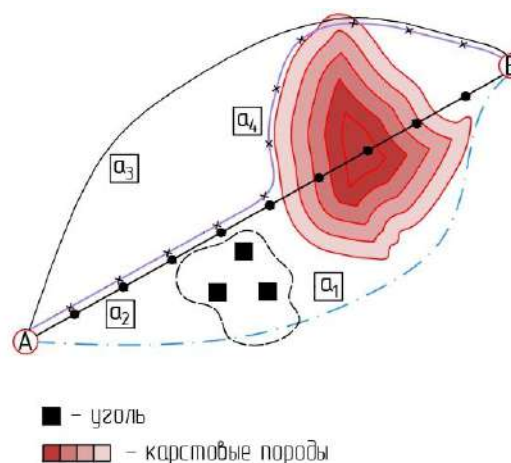


Рис. 1. Варианты проектных решений
Fig.1. Design solution options

Каждый из проектируемых вариантов имеет свои достоинства и недостатки.

Южный вариант направления имеет среднюю протяженность линии, полностью обходит геологически неблагоприятные участки (области закарстованных пород), находится вблизи от очага месторождений полезных ископаемых.

Центральный вариант направления имеет низкую протяженность линии, очень высокую протяженность участков железнодорожной линии, которые проходят по закарстованным местам, при этом линия находится вблизи от очага месторождений полезных ископаемых.

Северный вариант направления имеет высокую протяженность линии, практически максимально обходит геологически неблагоприятные участки (области закарстованных пород), однако имеет очень большое расстояние до очага месторождений полезных ископаемых.

Комбинированный вариант направления трассы имеет очень высокую протяженность линии, частично проходит по закарстованным участкам и находится вблизи от очага месторождений полезных ископаемых.

Решение задачи заключается в определении варианта решения с наибольшим значением отношения предпочтительности:

$$K(a_i) = \frac{\max_j}{i} \sum_r w_r \mu_{\geq}(x_i, x_j). \quad (2)$$

Для каждого варианта a_i и по каждому критерию K_i назначаются оценки в форме нечетких чисел – лингвистических оценок.

Значения оценок по лингвистическим критериям формируют матрицу лингвистических критериев (табл.).

Лингвистические критерии
Linguistic criteria

Варианты направления проектируемой железной дороги	Значения лингвистических критериев по вариантам направления проектируемой железной дороги		
	K_1	K_2	K_3
a_1	С	ОН	ОВ
a_2	Н	ОВ	В
a_3	В	Н	ОН
a_4	ОВ	С	В

Примечание. ОН (очень низкий) = {1,0/1; 0,7/2; 0,2/3}; Н (низкий) = {0,4/1; 0,9/2; 1,0/3; 0,3/4}; С (средний) = {0,4/4; 1/5; 0,8/4; 0,5/7; 0,1/8}; В (высокий) = {0,2/7; 0,7/8; 1,0/9; 0,8/10}; ОВ (очень высокий) = {0,1/8; 0,5/9; 1,0/10}.

Универсальное множество, на котором определены нечеткие числа, представлено в виде десятибалльной шкалы $Y = \{1, 2, \dots, 10\}$ (рис. 2).

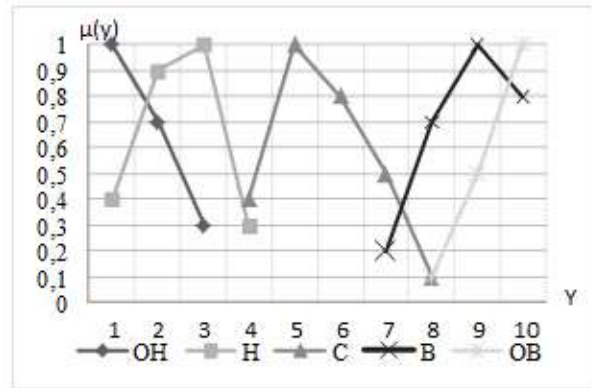


Рис.2. Функции принадлежности нечетких оценок
Fig. 2. Membership functions for fuzzy estimates

Проектная команда или лицо, принимающее решение, задают вектор предпочтений – вектор весовых коэффициентов $W = \{w_1, w_2, w_3\}$, задающих важность каждого критерия.

В данной задаче в качестве лица, принимающего решения, выступают авторы статьи.

Вектор весовых коэффициентов был задан следующим образом: $W = \{0,2; 0,3; 0,5\}$, из чего следует, что для проектировщика наиболее важно пройти вблизи месторождений каменного угля $w_3 = 0,5$, при этом по возможности избегая участков закарстованных пород $w_2 = 0,3$ и не удлиняя чрезмерно вариант направления проектируемой железнодорожной линии $w_1 = 0,2$.

Значения функции принадлежности вычисляют по формуле:

$$\mu_{<}(K_r(a_1), K_r(a_2)), K_r(a_3), K_r(a_4)) = \sum_{s=1}^n P_{K_r(a_1)}(y_s) \left(1 - \sum_{j=1}^s P_{K_r(a_2)}(y_j) \right). \quad (3)$$

Опираясь на формулу расчета вероятности, определяют ($P_A(y)$):

$$P_{K_r(a_i)}(y_s) = \frac{\mu_{K_r(a_i)}(y_s)}{\sum_{y \in S_{K_r(a_i)}} \mu_{K_r(a_i)}(y)}, \quad (4)$$

где $r = 1, 2, 3; i = 1, 2, 3, 4$.

Каждому лингвистическому критерию K_r для проектируемого варианта a_i соответствует оценка, принадлежащая множеству {ОН, Н, С, В, ОВ}; так, например, $K_1(a_1) = С, K_1(a_2) = Н$.

Каждой оценке соответствует своя функция принадлежности нечеткого числа (см. рис. 2). Например, $\mu_{K_1(a_1)}(y_1) = 0,4; \mu_{K_1(a_1)}(y_2) = 1$.

Следовательно:

$$\sum_{y \in S_{K_1(a_1)}} \mu_{K_1(a_1)}(y) = 0,4 + 1 + 0,8 + 0,5 + 0,1 = 6,4;$$

$$\sum_{y \in S_{K_1(a_2)}} \mu_{K_1(a_2)}(y) = 0,4 + 0,9 + 1 + 0,3 = 2,6;$$

$$\sum_{y \in S_{K_1(a_3)}} \mu_{K_1(a_3)}(y) = 0,2 + 0,7 + 1 + 0,8 = 2,7;$$

$$\sum_{y \in S_{K_1(a_4)}} \mu_{K_1(a_4)}(y) = 0,1 + 0,5 + 1 = 1,6;$$

$$\sum_{y \in S_{K_2(a_1)}} \mu_{K_2(a_1)}(y) = 1 + 0,7 + 0,2 = 1,9;$$

$$\sum_{y \in S_{K_2(a_2)}} \mu_{K_2(a_2)}(y) = 0,1 + 0,5 + 1 = 1,6;$$

$$\sum_{y \in S_{K_2(a_3)}} \mu_{K_2(a_3)}(y) = 0,4 + 0,9 + 1 + 0,3 = 2,6;$$

$$\sum_{y \in S_{K_2(a_4)}} \mu_{K_2(a_4)}(y) = 0,4 + 1 + 0,8 + 0,5 + 0,1 = 6,4;$$

$$\sum_{y \in S_{K_3(a_1)}} \mu_{K_3(a_1)}(y) = 0,1 + 0,5 + 1 = 1,6;$$

$$\sum_{y \in S_{K_3(a_2)}} \mu_{K_3(a_2)}(y) = 0,2 + 0,7 + 1 + 0,8 = 2,7;$$

$$\sum_{y \in S_{K_3(a_3)}} \mu_{K_3(a_3)}(y) = 1 + 0,7 + 0,2 = 1,9;$$

$$\sum_{y \in S_{K_3(a_4)}} \mu_{K_3(a_4)}(y) = 0,2 + 0,7 + 1 + 0,8 = 2,7;$$

Тогда

$$\mu_{<}(K_1(a_1), K_1(a_2)) = \mu_{<}(C, H) = \frac{0,4}{6,4} \left(1 - \frac{0,4 + 0,9 + 1}{2,6} \right) = 0,007;$$

$$\mu_{<}(K_2(a_1), K_2(a_2)) = \mu_{<}(OH, OB) = 0;$$

$$\mu_{<}(K_3(a_1), K_3(a_2)) = \mu_{<}(OB, B) = \frac{0,1}{1,6} \left(1 - \frac{0,2}{2,7} \right) + \frac{0,5}{1,6} \left(1 - \frac{0,2 + 0,7}{2,7} \right) + \frac{1,0}{1,6} \left(1 - \frac{0,2 + 0,7 + 1}{2,7} \right) = 0,45.$$

Вычисление нечеткого отношения

$$\mu_{\geq}(K_r(a_1), (K_r(a_2))):$$

$$\mu_{\geq}(K_r(a_1), (K_r(a_2))) = 1 - \mu_{<}(K_r(a_1), (K_r(a_2)));$$

$$\mu_{\geq}(K_1(a_1), K_1(a_2)) = 0,993$$

$$\mu_{\geq}(K_2(a_1), K_2(a_2)) = 1;$$

$$\mu_{\geq}(K_3(a_1), K_3(a_2)) = 0,55.$$

Находим степени предпочтения для a_1 :

$$\mu_{\geq}(K(a_1), K(a_2)) = \sum_r w_r \mu_{\geq}^r(a_1, a_2) = 0,2 \times 0,993 + 0,3 \times 1 + 0,5 \times 0,55 = 0,77.$$

Предпочтительность первого варианта $\mu_{\geq}(a_1) = 0,77$.

Далее произведем расчет степени предпочтения для второго варианта a_2 .

Вычисляем значения функции принадлежности $\mu_{<}(K_r(a_2), (K_r(a_1)))$:

$$\mu_{<}(K_1(a_2), (K_1(a_1))) = \mu_{<}(H, C) = 0;$$

$$\mu_{<}(K_2(a_2), (K_2(a_1))) = \mu_{<}(OB, OH) = 0;$$

$$\mu_{<}(K_3(a_2), (K_3(a_1))) = \mu_{<}(B, OB) = \frac{0,2}{2,7} (1 - 0) +$$

$$+ \frac{0,7}{2,7} (1 - 0) + \frac{1}{2,7} \left(1 - \frac{0,1}{1,6} \right) + \frac{0,8}{2,7} \left(1 - \frac{0,1 + 0,5}{1,6} \right) = 0,865.$$

Находим нечеткое отношение $\mu_{\geq}(K_r(a_2), (K_r(a_1)))$:

$$\mu_{\geq}(K_1(a_2), K_1(a_1)) = 1;$$

$$\mu_{\geq}(K_2(a_2), K_2(a_1)) = 1;$$

$$\mu_{\geq}(K_3(a_2), K_3(a_1)) = 0,135.$$

Находим степень предпочтения проектируемого варианта a_2 :

$$\mu_{\geq}(K(a_2), K(a_1)) = \sum_r w_r \mu_{\geq}^r(a_2, a_1) = 0,2 \times 1 + 0,3 \times 1 + 0,5 \times 0,135 = 0,56.$$

Предпочтительность второго варианта $\mu_{\geq}(a_2) = 0,56$.

Произведем расчет степени предпочтения третьего варианта a_3 .

Вычисление значения функции принадлежности $\mu_{<}(K_r(a_3), (K_r(a_4)))$:

$$\mu_{<}(K_1(a_3), (K_1(a_4))) = \mu_{<}(B, OB) = \frac{0,2}{2,7} (1 - 0) + \frac{0,7}{2,7} (1 - 0) +$$

$$+ \frac{1}{2,7} \left(1 - \frac{0,1}{1,6} \right) + \frac{0,8}{2,7} \left(1 - \frac{0,1 + 0,5}{1,6} \right) = 0,865.$$

$$\mu_{<}(K_2(a_3), (K_2(a_4))) = \mu_{<}(H, C) = 0;$$

$$\mu_{<}(K_3(a_3), (K_3(a_4))) = \mu_{<}(OH, B) = 0.$$

Вычисляем нечеткое отношение $\mu_{\geq}(K_r(a_3), (K_r(a_4)))$:

$$\mu_{\geq}(K_1(a_3), K_1(a_4)) = 0,135;$$

$$\mu_{\geq}(K_2(a_3), K_2(a_4)) = 1;$$

$$\mu_{\geq}(K_3(a_3), K_3(a_4)) = 1.$$

Вычисляем степень предпочтения a_3 :

$$\mu_{\geq}(K(a_3), K(a_4)) = \sum_r w_r \mu_{\geq}^r(a_3, a_4) = 0,2 \times 0,135 + 0,3 \times 1 + 0,5 \times 1 = 0,83.$$

Предпочтительность третьего варианта $\mu_{\geq}(a_3) = 0,83$.

Рассчитаем степень предпочтения варианта a_4 .

Вычисление значения функции принадлежности $\mu_{<}(K_r(a_4), (K_r(a_3)))$:

$$\mu_{<}(K_1(a_4), (K_1(a_3))) = \mu_{<}(OB, B) = \frac{0,1}{1,6} \left(1 - \frac{0,2}{2,7}\right) +$$

$$+ \frac{0,5}{1,6} \left(1 - \frac{0,2+0,7}{2,7}\right) + \frac{1,0}{1,6} \left(1 - \frac{0,2+0,7+1}{2,7}\right) = 0,45;$$

$$\mu_{<}(K_2(a_4), (K_2(a_3))) = \mu_{<}(C, H) = \frac{0,4}{6,4} \left(1 - \frac{0,4+0,9+1}{2,6}\right) =$$

$$= 0,007;$$

$$\mu_{<}(K_3(a_4), (K_3(a_3))) = \mu_{<}(B, OH) = 0.$$

Определяем нечеткое отношение $\mu_{\geq}(K_r(a_4), (K_r(a_3)))$:

$$\mu_{\geq}(K_1(a_4), K_1(a_3)) = 0,55;$$

$$\mu_{\geq}(K_2(a_4), K_2(a_3)) = 0,993;$$

$$\mu_{\geq}(K_3(a_4), K_3(a_3)) = 1.$$

Находим степень предпочтения варианта a_4 :

$$\mu_{\geq}(K(a_4), K(a_3)) = \sum_r w_r \mu_{\geq}^r(a_4, a_3) = 0,2 \times 0,55 +$$

$$+ 0,3 \times 0,993 + 0,5 \times 1 = 0,9.$$

Предпочтительность четвертого варианта $\mu_{\geq}(a_4) = 0,90$.

Для удобства работы инженера-проектировщика – лица, принимающего решение, с описанной выше методикой составлена программа в Microsoft Excel (рис. 3).

Следует отметить, что при решении задач выбора в условиях неопределенности при использовании теории нечетких множеств возможны ситуации, при которых выбор неочевиден. В таком случае рекомендуется применять индексы ранжирования [25].

Заключение

В ходе проведенного исследования получены следующие основные выводы:

1. Рассмотрена проблема принятия решений в проектировании железных дорог на предпроектной стадии.

2. Предложен тестовый пример выбора варианта направления проектируемой железнодорожной линии IV категории в Черемховском районе Иркутской области. Линия проектируется с целью обеспечения вывоза каменного угля. Район проектирования характеризуется значительным развитием процессов карстообразования.

3. Задача решена на основе метода анализа альтернативных решений в нечеткой среде.

Запроектированы четыре варианта направления: южный, центральный, северный, комбинированный.

Определены три критерия оценок исходов: длина варианта направления, его протяженность по геологически неблагоприятным карстоопасным участкам района проектирования и приближение к очагу месторождений каменного угля.

Задан вектор весовых коэффициентов $W = \{0,2, 0,3, 0,5\}$.

Определены предпочтительности вариантов:

- первый $\mu_{\geq}(a_1) = 0,77$;
- второй $\mu_{\geq}(a_2) = 0,56$;
- третий $\mu_{\geq}(a_3) = 0,83$;
- четвертый $\mu_{\geq}(a_4) = 0,90$.

Для выбора рекомендуется комбинированный вариант направления с наибольшей предпочтительностью, т. е. четвертый вариант $\mu_{\geq}(a_4) = 0,90 = \max$.

Программа принятия решений методом анализа альтернативных решений															
Варианты направлений:					Степени предпочтения варианта:										
a ₁ – Южный вариант направления;					a ₁ = 0,77										
a ₂ – Центральный вариант направления;					a ₂ = 0,56										
a ₃ – Северный вариант направления;					a ₃ = 0,83										
a ₄ – Комбинированный вариант направления					a ₄ = 0,9										
					Наиболее предпочтительный вариант: a₄										
Заполните матрицу лингвистических критериев					Задайте принадлежность нечетких оценок										
K =		K ₁	K ₂	K ₃	OH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	a ₁	C	OH	OB		1	0,7	0,2							
	a ₂	H	OB	B	H	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	a ₃	B	H	OH		0,4	0,9	1	0,3						
	a ₄	OB	C	B	C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									0,4	1	0,8	0,5	0,1		
					B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
												0,2	0,7	1	0,8
					OB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
													0,1	0,5	1
Задайте предпочтения для текущей задачи в виде вектора весовых предпочтений:					Вычисление функции принадлежности нечеткого числа										
	K ₁	K ₂	K ₃		K1(a1) = 6,4										
	W =	0,2	0,3	0,5											

Рис.3. Скриншот программы принятия решений
Fig. 3. Screenshot of the decision-making program

Комбинированный вариант направления проектируемой линии имеет очень высокое значение длины направления, что является некоторым его недостатком, но при этом среднюю протяженность участков, проходящих по карстоопасным местам и высокое значение по самому важному, третьему критерию в данной задаче для лица, принимающего решение, – критерию приближения варианта направления к очагу месторождений каменного угля.

Выбор четвертого варианта обоснован.

4. Однако следует заметить, что на выбор варианта направления проектируемой линии значительное влияние оказывает вектор предпочтений – вектор весовых коэффициентов $W = \{0,2; 0,3; 0,5\}$. По-

этому на лицо, принимающие решение, ложится большая ответственность не только по разработке вариантов проектного решения, выбору набора критериев для сравнения вариантов, но и по назначению вектора предпочтений. Впрочем, это не является недостатком метода.

По мнению авторов важно заменить решения, принимаемые интуитивно, на решения, принимаемые на основе современных математических методов.

Теория нечетких множеств и лингвистические оценки по критериям могут успешно применяться в задачах принятия решений в проектировании железных дорог.

Список литературы

1. Перельгина А.А. Пример принятия решения в области проектирования железных дорог / А.А. Перельгина, В.А. Подвербный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы Девятой Междунар. науч.-практ. конф., 10–13 апреля 2018 г. Иркутск: ИрГУПС, 2018. Т. 1. С. 606–611.
2. Свод правил. Инфраструктура железнодорожного транспорта. Общие требования. СП 237.1326000.2015. Введ. 01.07.2015. М.: Минтранс РФ, 2014. 58 с.
3. Предпроектные соображения по строительству железнодорожного пути по направлению «Окино-Ключевское месторождение угля. Гусиноозерская ГРЭС» / И.В. Благоразумов, К.А. Кирпичников, Е.В. Непомнящих и др. // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / под ред. В.С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. Вып. 1. С. 39–42.
4. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V., Shvartcfel V.S. Set-theoretic Model of Strategies of Development for Objects of Multimodal Transport Network // Procedia Engineering, Vol. 165 (2016), Pp. 1547–1555.
5. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V. Strategy development management of Multimodal Transport Network // MATEC Web of Conferences 86, 05024 (2016), IPISE-2016. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168605024>.
6. Перспективы проектирования и строительства железных дорог Монголии / П. Бат-Эрдэнэ, В.А. Подвербный // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. под ред. В.С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. Вып. 3. С. 34–41.
7. Проектирование противолавинных сооружений на Восточно-Сибирской железной дороге / В.А. Подвербный, Е.В. Филатов, Б.П. Мухаров // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях Дальнего Востока : межвуз. сб. науч. тр.; под ред. В.С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. С. 245–255.
8. Ковенькин Д.А. Этапы жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути / Д.А. Ковенькин, В.А. Подвербный // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. под ред. В.С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. Вып. 3. С. 151–157.
9. Подвербный В.А. Методы принятия проектных решений в строительстве: учебно-методическое пособие / В.А. Подвербный, П.Н. Холодов, К.М. Титов. Иркутск: ИрГУПС, 2010. 72 с.
10. Алтунин А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: монография / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин. Тюменский гос. ун-т. Тюмень, 2000. 352 с.
11. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.
12. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати; перевод с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио связь, 1993. 278 с.
13. Холодов П.Н. Выбор оптимального решения в проектировании железных дорог на основе многокритериальной оценки : дис. канд. техн. наук : 05.22.06 : защищена 12.02.2012 / Холодов Пётр Николаевич. 166 с.
14. Солоненко В.П. Карст Восточной Сибири / В.П. Солоненко // Спелеология и карстология. № 12. Симферополь. 2014. С. 17–25.
15. Кантор И.И. Изыскания и проектирование железных дорог / И.И. Кантор. М.; ИКЦ «Академкнига», 2003. 288 с.
16. Подвербный В.А. Выбор варианта железной дороги на основе критерия нечеткой полезности / В.А. Подвербный // Транспортное строительство. 2000. № 7. С. 10–13.
17. Толмачев С.Г. Принятие проектных решений на основе нечеткого отношения предпочтения / С.Г. Толмачев // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5. С. 34–39.
18. Павлов А.Н. Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие для вузов / А.Н. Павлов, Б.В. Соколов. СПб.: ГУАП, 2006. 72 с.
19. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica Verlag, Heidelberg, 2001. 798 p.
20. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. М.: Мир, 1976. 168 с.

21. Толмачев С.Г. Задача организации единого информационного пространства для поддержки принятия проектных решений в условиях нечеткой исходной информации / С.Г. Толмачев // Изв. ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение. 2013. Вып. 4. С. 29–33.

22. Wang Y.J., Kao C.S., Liu L.J. The Selection of Sales Managers in Enterprise by Fuzzy Multi-criteria Decision-making // Proc. of the Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI 2010), Sanya, China, Oct. 23–24, 2010. Part II. P. 142–151.

23. Ведерников Ю.В. Метод многокритериального предпочтения сложных систем / Ю.В. Ведерников // Информационно управляющие системы. 2009. № 1(38). С. 52–59.

24. Чернов В.Г. Основы теории нечетких множеств. Решение задач многокритериального выбора альтернатив : учеб. пособие / В.Г. Чернов ; Владим. гос. ун-т. Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2005. 100 с.

25. Подвербный В.А. Выбор проектного решения в нечеткой среде на основе индексов ранжирования / В.А. Подвербный // Железнодорожный транспорт. Серия «Строительство. Проектирование»: ЭИ / ЦНИИТЭИ МПС. 2000. Вып. 2–3. С. 34–47.

References

1. Pereygina A.A., Podverbnyi V.A. Primer prinyatia reshenii v oblasti proektirovaniya zheleznykh dorog [An example of decision making in the field of railway design]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: Materialy devyatoi vserossiiskoi nauchno -prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, 10-13 aprelya 2018 g.* [Transport infrastructure of the Siberian region: Materials of the Ninth Intern. scientific-practical Conf., April 10-13, 2018]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. Vol. 1. Pp. 606–611.

2. Infrastruktura zheleznodorozhnogo transporta. Obshchie trebovaniya: SP 237.1326000.2015. Vved. 01.07.2015. Utv. Priказом Mintransa Rossii No. 208 ot 06.07.2015, 58 str. [Infrastructure of railway transport. General requirements: SP 237.1326000.2015. Introd. January 07, 2015. Approved by the Order of the Ministry of Transport of Russia No. 208 dated July 06, 2015, 58 p.].

3. Blagorazumov I.V., Kirpichnikov K.A., Nepomnyashchikh E.V. et al. Predproektnye soobrazheniya po stroitel'stvu zheleznodorozhnogo puti po napravleniyu «Okino-Klyuchevskoe mestorozhdenie uglya. Gusinozerskaya GRES» [Pre-project considerations for the construction of a railway track in the direction of “Okino – Klyuchevskoe coal deposit-Gusinozerskaya GRES”]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog : sb. nauch. tr.* [Projecting the development of the regional network of railways: collection of scientific tr.]. In Shvartsfeld V.S. (ed.) Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2013. Iss. 1. Pp. 39–42.

4. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V., Shvartsfeld V.S. Set-theoretic Model of Strategies of Development for Objects of Multimodal Transport Network. *Procedia Engineering*, Vol. 165 (2016), Pp. 1547–1555.

5. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V. Strategy development management of Multimodal Transport Network. *MATEC Web of Conferences* 86, 05024 (2016), IPICSE-2016. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168605024>.

6. Bat-Erdene P., Podverbnyi V.A. Perspektivy proektirovaniya i stroitel'stva zheleznykh dorog Mongolii [Prospects for designing and building railways in Mongolia]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog : sb. nauch. tr.* [Projecting the development of the regional network of railways: sb. nauch. tr.]. In Shvartsfel'd V.S. (ed.) Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2015. Iss. 3. Pp. 34–41.

7. Podverbnyi V.A., Filatov E.V., Mukharov B.P. Proektirovanie protivolavinykh sooruzhenii na Vostochno-Sibirskoi zheleznoi doroge [The design of anti-avalanche structures on the East Siberian railway]. *Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva zheleznykh dorog v usloviyakh Dal'nego Vostoka : mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Features of design and construction of railways in the conditions of the Far East: an interuniversity coll. of acad. articles]. In Shvartsfel'd V.S. (ed.) Khabarovsk: Publishing House of DVGUPS, 2009. Pp. 245–255.

8. Koven'kin D.A., Podverbnyi V.A. Etapy zhiznennogo tsikla verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti [Stages of the railway track structure life cycle]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog : sb. nauch. tr.* [Projecting the development of the regional network of railways: the coll. of acad. articles]. In Shvartsfel'd V.S. (ed.) Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2015. Iss. 3. Pp. 151–157.

9. Podverbnyi V.A. Metody prinyatia proektnykh reshenii v stroitel'stve: uchebno – metodicheskoe posobie [Methods for making design decisions in construction: a study guide]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2010. 72 p.

10. Altunin A.E., Semukhin M.V. Modeli i algoritmy prinyatiya rechenii v nechetkikh usloviyakh [Models and algorithms of decision-making in fuzzy conditions: a monograph]. Tumen', TGU Publ., 2000. 352 p.

11. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. Prinyatie reshenii na osnove nechetkikh modelei: primery ispol'zovaniya [Decision-making based on fuzzy models: Usage examples]. Riga, Zinatne Publ., 1990. 184 p.

12. Saaty T.L. Prinyatiya reshenii. Metod analiza ierarkhii [Decision-making. The method of the analysis of hierarchies]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 278 p.

13. Kholodov P.N. Vybor optimal'nogo resheniya v proektirovanii zheleznykh dorog na osnove mnogokriterial'noi otsenki: dis. kand. tekhn. nauk: 05.22.06 : zashishena 12.02.02. 166 p. [The choice of the optimal solution in the design of railways based on multi-criteria assessment: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.06: defended February 12, 2012]

14. Solonenko V.P. Karst Vostochnoi Sibiri [Karst of Eastern Siberia]. *Speleologiya i karstologiya* [Speleology and karstology], No. 12. Simferopol', 2014. Pp. 17–25.

15. Kantor I.I. Izyskanie i proektirovanie zheleznykh dorog [Research and design of railways]. Moscow: IKC “Akademkni-ga” Publ., 2003. 288 p.

16. Podverbnyi V.A. Vybora varianta zheleznoi dorogi na osnove kriteriya nechetkoi poleznosti [The choice of the railway option on the basis of the criterion of fuzzy utility]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], 2000. No. 7. Pp. 10–13.
17. Tolmachev S.G., Prinyatie proektnykh reshenii na osnove nechetkogo otnosheniya predpocheniya [Adoption of design decisions based on a fuzzy preference relation] *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2014. No. 5. Pp. 34–39.
18. Pavlov A.N., Sokolov B.V. Prinyatiya reshenii v usloviakh nechetkoi informatsii [Decision-making in the conditions of the fuzzy information]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2006. 72 p.
19. Piegat A. Fuzzy modeling and control. Physica Verlag, Heidelberg, 2001. 798 p.
20. Zade L.A. Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenii [The concept of a linguistic variable and its application to the approximate solution-making]. Moscow, Mir Publ., 1976. 168 p.
21. Tolmachev S.G. Zadacha organizatsii edinogo informatsionnogo prostranstva dlya podderzhki prinyatiya proektnykh reshenii v usloviyakh nechetkoi iskhodnoi informatsii [The task of organizing a single information space to support the adoption of design decisions in conditions of fuzzy initial information]. *Izvestiya GUAP. Aerokosmicheskoe priborostroeniye* [News of SU-AI. Aerocosmic instrument engineering], 2013. No. 4. Pp. 29–33.
22. Wang Y.J., Kao C.S., Liu L.J. The selection of sales managers in enterprise by fuzzy multi-criteria decision-making. *Proc. of the Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI 2010), Sanya, China, Oct. 23–24, 2010. Part II. P. 142–151.*
23. Vedernikov Yu. V. Metod mnogokriterial'nogo predpocheniya slozhnykh sistem [A method of multi-criterion prioritization of complex systems]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2009. No. 1. Pp. 52–59.
24. Chernov V.G. Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv. Reshenie zadach mnogokriterial'nogo vybora al'ternativ : ucheb. posobie [The basics of fuzzy sets theory. Solving problems of multicriterial choice on the basis of geometrical projection of fuzzy sets]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2007. No. 1. Pp. 46–51.
25. Podverbnyi V.A. Vybora proektnogo resheniya v nechetkoi srede na osnove indeksov ranzhirovaniya [The choice of a design solution in a fuzzy environment based on ranking indices]. *Zheleznodorozhnyi transport. Seriya «Stroitel'stvo. Proektirovaniye»* [Railway Transport. Series "Construction. Design"] EI / TSNIITEI IPU Publ., 2000. Iss. 2-3. Pp. 34–47.

Информация об авторах

Перельгина Анастасия Анатольевна – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: perelygina_aa@irgups.ru

Подвербный Вячеслав Анатольевич – д-р техн. наук, доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vpodverbnyi@mail.ru

Information about the authors

Anastasiya A. Perelygina – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: perelygina_aa@irgups.ru

Vyacheslav A. Podverbnyi – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vpodverbnyi@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).208-215

УДК 519. 542.7

Экспериментальная проверка качества адаптации математической модели контактной сети для расчета частоты колебаний

А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, А. В. Тарасенко ✉

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

✉ alessandro-tar@yandex.ru

Резюме

На сегодняшний день одним из главных параметров работы контактной сети является натяжение проводов. Изменение натяжения контактных проводов обеспечивает наибольшее влияние не только на показатели контактной подвески, но и на режим работы системы токосъема. В качестве математической модели предлагается использовать растянутый стержень, позволяющий измерять частоту колебаний контактных проводов в горизонтальной плоскости. Запись колебаний проводов осуществляется с помощью датчика ускорений (акселерометра), который устанавливается между струнами на контактном проводе. Сигнал преобразуется посредством быстрого преобразования Фурье в частотный спектр колебаний. На основании полученных частот определяется натяжение контактных проводов. В статье представлена программа экспериментальных исследований по измерению частот поперечных колебаний контактного провода. Экспериментальные испытания проводились на специальном стенде в лабораторных условиях. Данная программа учитывает факторы, влияющие на частоту колебаний проводов. Для оценки влияния факторов разработана программа полного факторного эксперимента. Полученные расчетные и экспериментальные значения частоты колебаний проводов позволяют оценить адекватность математической модели контактной сети с помощью критерия Фишера и определить среднюю абсолютную ошибку достоверности. Благодаря своевременному контролю натяжения проводов в реальном масштабе времени появляется возможность повысить работоспособность всей системы токосъема, безопасность движения поездов, а также на основе поступающих сведений о нарушениях в работе уточнить прогнозные модели и избежать нерациональных расходов.

Ключевые слова

частота колебаний, натяжение контактного провода, испытательный стенд, полный факторный эксперимент

Для цитирования

Смердин А. Н. Экспериментальная проверка качества адаптации математической модели контактной сети для расчета частоты колебания / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, А. В. Тарасенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 208–215. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).208-215

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.11.2020, поступила после рецензирования: 21.11.2020, принята к публикации: 11.01.2021

Experimental verification of the quality adaptation mathematical model of the contact network for calculation the vibration frequency

A. N. Smerdin, E. A. Butenko, A. V. Tarasenko ✉

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉ alessandro-tar@yandex.ru

Abstract

To this date, one of the main parameters of the overhead contact network is the wires tension. Changing the tension of the contact wires provides the greatest impact not only on the indicators of the catenary, but also on the operating mode of the current collection system. As a mathematical model, it is proposed to use a stretched rod, which makes it possible to measure the vibration frequency of the contact wires in the horizontal plane. Recording of wire vibrations is carried out using an acceleration sensor (accelerometer), which is installed between the strings on the contact wire. The signal is converted using Fast Fourier Transform to the frequency spectrum of the oscillations. Based on the obtained frequencies, the tension of the contact wires is determined. The article presents a program of experimental research to measure the frequency of transverse vibrations of the contact wire. Experimental tests were carried out on a special stand in laboratory conditions. This program takes into account the factors affecting the frequency of vibrations of wires. To assess the influence of factors, a program has been developed for complete rotational planning of the experiment. The obtained calculated and experimental values of the frequency of vibrations of wires allow us to assess the adequacy of the mathematical model of the overhead contact network using the Fisher criterion and determine the average absolute error of reliability. Thanks to the timely control of the wires tension in real time, it becomes possible to increase the operability of the entire current collection system, train traffic safety, and also, based on the incoming information about violations in the work, to clarify the forecast models and avoid irrational costs.

Keywords

vibration frequency, overhead wire tension, test bench, full factorial experiment

For citation

Smerdin A. N., Butenko E. A., Tarasenko A. V. Eksperimental'naya proverka kachestva adaptatsii matematicheskoy modeli kontaktnoy seti dlya rascheta chastoty kolebaniya [Experimental verification of the quality adaptation mathematical model of the contact network for calculation the vibration frequency]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 208–215. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).208-215

Article Info

Received: 10.11.2020, Revised: 21.11.2020, Accepted: 11.01.2021

Введение

На сегодняшний день согласно положениям «Программы организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации» [1-3] предусмотрено увеличение полигона скоростного и высокоскоростного движения. При увеличении скорости движения предъявляются повышенные требования не только к параметрам, но и к показателям контактной сети. Контактная сеть должна обеспечивать безопасность движения поездов и надежность работы системы токосъема.

Одним из важнейших показателей контактной подвески является изменение натяжения контактного провода и несущего троса. Натяжение контактного провода изменяется достаточно быстро, что ока-

зывает существенное влияние на режим работы системы токосъема [4-7].

Анализ работы по обслуживанию контактной сети дирекции по энергообеспечению показывает, что число отказов проводов и устройств контактной сети остается достаточно высоким, не смотря на увеличение затрат на их техническое обслуживание [8, 9].

Имеющиеся средства и методы измерения не обеспечивают снижения числа нарушений работы контактной сети [10-12]. Таким образом, нужно отметить актуальность развития диагностической подсистемы.

Для определения натяжения контактных проводов предлагается использовать метод, основанный на измерении частоты затухающих колебаний контактных проводов в горизонтальной плоскости [13-

15]. Данный метод позволяет в автономном режиме измерять натяжение контактного провода в произвольном месте анкерного участка, а также дает возможность дистанционно и оперативно контролировать состояние контактной подвески.

Для определения расчетной частоты колебаний контактного провода используется следующая формула:

$$f = \sqrt{\frac{\pi^4 \cdot r^4 \cdot E_{кп} \cdot J_{кп}}{m_{кп} \cdot l^4} \cdot \left(1 + \frac{K \cdot l^2}{\pi^2 \cdot r^2 \cdot E_{кп} \cdot J_{кп}}\right)} \cdot 2\pi, \quad (1)$$

где $E_{кп}$ – модуль упругости материала контактного провода сплошного сечения, Н·м²; $J_{кп}$ – момент инерции поперечного сечения контактного провода относительно главной центральной оси, м⁴; K – натяжение контактного провода, Н; $m_{кп}$ – погонная масса контактного провода, кг/м; r – номер гармоники; l – длина пролета, м.

Чтобы оценить адекватность математической модели необходимо провести экспериментальные исследования по измерению частоты колебаний проводов в поперечной плоскости. Вместо контактного провода и несущего троса предлагается для снижения требуемого значения натяжения при сохранении адекватности использовать стальные провода марки Ст3 различного диаметра.

Исследование закономерностей расчетной частоты колебаний контактного провода в лабораторных условиях

Для проведения лабораторных испытаний используется специальный стенд для исследования колебаний контактного провода в горизонтальной плоскости, позволяющий оценить частоту колебаний при варьировании следующих параметров:

- погонная масса контактного провода;
- длина пролета;
- натяжение провода.

Испытательный стенд (рис. 1) состоит из провода, грузовых компенсирующих устройств и акселерометра, установленного в середине пролета.

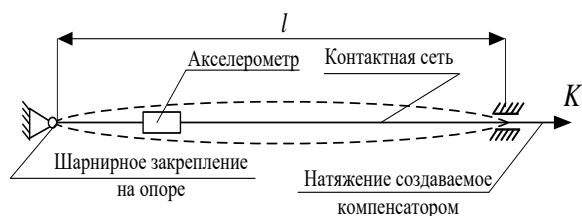


Рис. 1. Вертикальная проекция колебаний пролета контактной сети под действием внешнего воздействия импульса, приложенного однократно в центре провода

Fig. 1. Vertical projection of oscillations of the span the contact network under the influence of external action a pulse applied in the center of the wire

Испытания включают следующие этапы проведения на каждом цикле варьирования параметров, в соответствии с программой полного факторного эксперимента:

1. Подготовка проводов с погонной массой от 0,008 до 0,024 кг/м с интервалом 0,004 кг/м.
2. Установка кронштейнов для крепления проводов от 3,4 до 17 м.
3. Обеспечение натяжения проводов от 114 до 346 Н с заданным интервалом 58 Н.
4. Измерение температуры провода производится пирометром.
5. Осуществляется запись колебаний с помощью датчика ускорения (акселерометра).
6. Преобразование сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье.
7. Определение натяжения с помощью расчетной зависимости.
8. По окончании испытаний формируется протокол с зависимостью частоты колебаний провода от натяжения.

Оценка адекватности математической модели, основанной на измерении частоты поперечных колебаний контактного провода

Для оценки влияния погонной массы, длины пролета и натяжения на частоту колебаний проводов в горизонтальной плоскости разработана программа полного факторного эксперимента типа 2³

В рамках эксперимента зафиксированные факторы учтены постоянными и представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для проведения эксперимента

Table 1. Initial data for the experiment

Материал провода	Ст3	
Модуль упругости, Н·м ²	2·10 ¹¹	
Момент инерции, м ⁴	D=1,1мм	2,29·10 ⁻¹⁴
	D=2 мм	2,5·10 ⁻¹³
Температура окружающего воздуха, °С	23	

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях при изменении трех основных факторов: погонная масса, длина пролета и натяжение контактного провода (табл. 2).

Провода с погонными массами использовались со следующими диаметрами для контактного провода и несущего троса: 2·0,008 кг/м – 1,1 мм; 2·0,016 кг/м – 1,7 мм и 2·0,024 кг/м – 2 мм.

Матрица условий проведения последовательно-сти опытов эксперимента (табл. 3) была составлена на основании уровней и интервалов варьирования факторов.

Таблица 2. Уровни и интервалы варьирования факторов
Table 2. Levels and intervals of variation factors

Наименование фактора	Кодовое обозначение	Уровни варьирования факторов, соответствующие кодированным			Интервал варьирования
		+1	0	-1	
$m_{КП}$, кг/м	x_1	2·0,012	2·0,016	2·0,008	2·0,004
l , м	x_2	10,2	6,8	3,4	3,4
K , Н	x_3	2·315	2·215	2·115	2·100

Таблица 3. Матрица планирования эксперимента и результатов расчета частоты колебаний проводов и тросов контактной подвески

Table 3. Matrix planning the experiment and the results of calculating the vibration frequency wires and cable suspension

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	Параллельные опыты f_u^o	Среднее значение параллельных	f^p
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	16,68	16,74	16,64
									16,76		
									16,79		
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	10,14	10,18	9,49
									10,24		
									10,16		
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	6,53	6,58	6,53
									6,59		
									6,62		
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	4,27	4,29	4,18
									4,31		
									4,30		
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	27,35	20	20,07
									27,26		
									27,33		
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	15,37	10,42	10,27
									15,44		
									15,45		
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	10,73	10,75	10,65
									10,77		
									10,75		
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	5,50	5,48	5,52
									5,45		
									5,49		

Уравнение модели эксперимента частоты колебаний имеет вид:

$$f_u^p = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения регрессии были рассчитаны на основании полученных результатов опытов, выполненных в соответствии с планом эксперимента:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \overline{f_u^o}, \quad (3)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{iu} \overline{f_u^o}, \quad (4)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{iu} x_{ju} \overline{f_u^o} \quad i \neq j, \quad (5)$$

$$b_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{iu} x_{ij} x_{ku} \overline{f_u^3} \quad i \neq j \neq k \quad (6)$$

где N – число опытов; n – количество факторов;
 $\overline{f_u^3}$ – среднее значение параметра оптимизации из
 трех параллельных опытов.

Коэффициенты уравнений регрессии для трех факторов определены в соответствии с принятой моделью и приведены в табл. 4.

Таблица 4. Коэффициенты уравнений регрессии
Table 4. Coefficients of regression equations

Обозначение коэф- фициентов регрессии	Значение коэффициентов регрессии
b_0	10,46
b_1	-3,06
b_2	-3,69
b_3	1,2
b_{12}	1,17
b_{13}	-0,66
b_{23}	0,14
b_{123}	-0,0888

Некоторые из коэффициентов регрессии могут быть малыми, и их можно исключить из уравнения. Принято считать, что коэффициент регрессии про-
 веряют по критерию Стьюдента:

$$t_{a.n.} \geq \frac{|b_j| \cdot \sqrt{N}}{\sqrt{S_j^2}}, \quad (7)$$

где $t_{a.n.}$ – табличное значение критерия Стьюдента;
 S_j^2 – среднее квадратичное отклонение, определяет-

ся по выражению: $S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (f_u^3 - \overline{f_u^3})^2}{n-1}$;

Значения среднеквадратического отклонения для каждого опыта эксперимента приведены в табл. 5.

Таблица 5. Среднеквадратическое отклонения
 для каждого опыта эксперимента
Table 5. Standard deviation for each experiment

№ опыта	S_j^2
1	0,0056
2	0,0026
3	0,0042
4	0,0009
5	0,095
6	0,0038
7	0,0008
8	0,0014

Сравнивая значения коэффициентов регрессии с табличными значениями критерия Стьюдента результат показал, что коэффициент регрессии что b_{123}

незначительно влияет на уравнение и поэтому его исключаем.

Уравнение регрессии в кодированном виде, имеет вид:

$$f_u^p = 10,46 - 3,06 \cdot x_1 - 3,68 \cdot x_2 + 1,2 \cdot x_3 + 1,17 \cdot x_1 \times x_2 - 0,66 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,14 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (8)$$

Кодированные значения факторов связаны с натуральными следующими зависимостями:

$$x_1 = \frac{m_{KП} - m_{KП(0)}}{\Delta_1} = \frac{m - 0,032}{0,016}, \quad (9)$$

$$x_2 = \frac{l - l_0}{\Delta_2} = \frac{l - 6,8}{3,4}, \quad (10)$$

$$x_3 = \frac{K - K_0}{\Delta_3} = \frac{K - 430}{200}, \quad (11)$$

где $m_{KП}$, K , l – основные уровни факторов в натуральных выражениях; $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – интервалы варьирования факторов.

Переходя от кодированных значений факторов x_1, x_2, x_3 , получим зависимость частоты колебаний контактного провода в горизонтальной плоскости от варьируемых параметров:

$$f_u^p = 23,802 - 497,62 \cdot m_{KП} - 1,86 \cdot l + 2,24 \cdot 10^{-2} \cdot K + 43 \times \times l \cdot m_{KП} - 0,83 \cdot K \cdot m_{KП} - 41,18 \cdot 10^{-5} \cdot K \cdot l. \quad (12)$$

Проверка оценки адекватности модели выполняется по критерию Фишера [16-18] по результатам проведенных экспериментальных и теоретических исследований:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{воспр}^2} \leq F_{табл}, \quad (13)$$

где $S_{ад}$ – дисперсия адекватности, определяется как

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\overline{f_u^3} - f_u^p)^2}{N - (n + 1)}; \quad S_{воспр}^2 - \text{дисперсия воспроизво-}$$

димости, $S_{воспр}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N}$; f_j^p – расчетное значение

функции математической модели; $F_{табл}$ – табличное значение критерия Фишера.

По расчетам значение критерия Фишера получилось меньше табличного, что свидетельствует об адекватности математической модели. Полученное уравнение регрессии отличается от экспериментальных значений на величины, не превышающие ошибку опыта (< 5%).

Для повышения достоверности результатов эксперимента определяется средняя абсолютная ошибка $MAPE$:

$$MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{|f_j^3 - f_j^p|}{f_j^3} \cdot 100\% \quad (14)$$

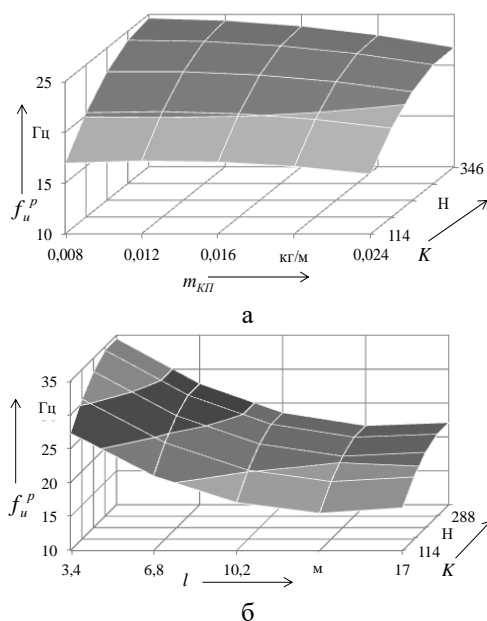


Рис. 2. Результаты расчетов изменения частоты колебаний проводов в горизонтальной плоскости: от погонной массы и натяжения при длине пролета $l = 10,2$ м (а); от длины пролета и натяжения провода при погонной массе $m_{КП} = 0,016$ кг/м

Fig. 2. The results of calculations change in the frequency of vibrations of wires in the horizontal plane: from the linear mass and tension with a span length $l =$

10.2 m (a); on the span length and wire tension at a linear mass of $m_{CW} = 0,016$ kg / m

Средняя ошибка достоверности составляет 0,014%.

По результатам экспериментального исследования построены поверхности изменений частоты колебаний от погонной массы $m_{КП}$ и натяжения K (рис. 2, а) провода при длине пролета $l = 6,8$ м, а также поверхности изменения частоты колебаний от длины пролета l и натяжения K провода (рис. 2, б) при погонной массе $m_{КП} = 0,016$ кг/м.

На графиках видно, что частота колебаний провода зависит не только от массы контактного провода, но от длины пролета и натяжения.

В лаборатории «Конструкции контактных сетей, линий электропередачи и токосъема» им. профессора Михеева» ОмГУПС в инициативном порядке ведутся работы по созданию программного обеспечения для использования измерительных устройств натяжения в автоматических системах диагностики контактной сети.

Заключение

Экспериментальные исследования показали, что данная математическая модель адекватна и может быть использована для определения натяжения контактных проводов в системе мониторинга и диагностики контактной сети, что особенно актуально для скоростных и высокоскоростных участков железной дороги.

Список литературы

1. Программа организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5098.
2. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 г. («Белая книга») ОАО «РЖД» / ОАО «РЖД». – М., 2011. 340 с.
3. Павлов, В. М. Адаптация методик диагностирования состояния инфраструктуры системы токосъема при повышенных скоростях движения электроподвижного состава / В. М. Павлов, А. Н. Смердин, И.Е. Чертков, и др. // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок и токоприемников электрического транспорта : сборник научных статей с международным участием / Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – С. 56-65.
4. Capitaine, A. Tension variability in contact wire and messenger wire of auto tensioned catenaries/ A. Capitaine , J.-P. Bianchi, P. Constant , F. Genest // World Congress on Railway Research (WCRR) 2019, Tokyo, Japan, pp. 1–8, 2019.
5. Ковалев, А. А. Исследование работы устройств компенсации натяжения в контактной подвеске / А. А. Ковалев, Н. В. Крапивин // Транспорт Урала. 2018. №4 (59). С. 86–90.
6. Галкин, А. Г. Математическое моделирование и информационные технологии в задачах диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог: монография / А. Г. Галкин, А. Н. Митрофанов, С. А. Митрофанов // Екатеринбург: Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2012. — 226 с.
7. Емельянова, М. Н. Повышение качества токосъема за счет выбора рационального натяжения проводов контактной подвески : специальность 05.22.07 «Подвижной состав, тяга поездов и электрификация железных дорог» : диссертация на соискание кандидата технических наук / Емельянова Марина Николаевна; Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. – Москва, 2015. – 102 с.
8. Лисневский, П. Ю. Некоторые аспекты в проблеме изучения колебаний проводов ЛЭП в воздушном потоке / П. Ю. Лисневский, В. Н. Ли // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. №2(62). С. 66–71.
9. Лукьянова, О. А. Совершенствование методов испытаний консолей контактной сети / О. А. Лукьянова, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков // Транспорт Урала. 2020. №2 (65). С. 93–97.
10. Сафарбаков, А. М. Основы технической диагностики: учебное пособие / А.М. Сафарбаков, А.В. Лукьянов, С.В. Пахомов; – Иркутск: Иркутский гос. ун-т путей сообщения, 2006. – 216 с.
11. Мозгалецкий, А. В. Техническая диагностика: учебное пособие для вузов / А. В. Мозгалецкий, Д. В. Гаскаров. – М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.

12. Гаранин, М. А. Совершенствование диагностики контактной сети / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту. – 2016. – № 1. С. 243-245.
13. Смердин, А. Н. Применение моделей поперечных колебаний растянутого стержня для расчета натяжений проводов контактной сети / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко // Известия Транссиба. 2019. №4 (40). С. 25 – 32.
14. Непрерывный мониторинг натяжения контактной подвески / Г. Ф. Насонов, Ю. А. Черногоров, М. Е. Медведев [и др.] // Автоматика на транспорте. – 2016. №2 (2). – С. 228–258.
15. Ли, В. Н. Способ диагностирования контактного провода электрифицированных железных дорог / В. Н. Ли, С. В. Клименко // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2015. №1 (2-3). С. 26-28.
16. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
17. Карпушкин, С. В. Теория инженерного эксперимента: учебное пособие / С. В. Карпушкин, А. О. Глебов. Тамбовский гос. технич. ун-т. – Тамбов, 2017. – 81 с.
18. Бояршинова, А. К. Теория инженерного эксперимента: текст лекций / А. К. Бояршинова, А. С. Фишер. – Челябинск: ЮУРГУ, 2006. – 85 с.

References

1. Program for organizing fast and high-speed railway communication in the Russian Federation [Electronic resource]. Access mode: http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5098.
2. Strategiya razvitiya kholdinga «RZHD» na period do 2030 g. [The development strategy of the holding «RZD» for the period up to 2030] («White Book» of JSC «RZD») / Moscow: OAO «RZhD», 2011. – 340 p.
3. Pavlov, V. M. Adaptatsiya metodik diagnostirovaniya sostoyaniya infrastruktury sistemy tokos'yema pri povyshennykh skorostyakh dvizheniya elektropodvizhnogo sostava [Adaptation of methods for diagnosing the state of the infrastructure of the current collection system at high speeds of movement of electric rolling stock] / V. M. Pavlov, A. N. Smerdin, I. E. Chertkov, et al. // *Aktual'nyye problemy proyektirovaniya i ekspluatatsii kontaknykh podvesok i tokopriyemnikov elektricheskogo transporta [Actual problems of design and operation of overhead catenaries and electric transport pantographs]*: collection of scientific articles with international participation / Omsk: Omsk State Transport University, 2011, pp. 56-65.
4. Capitaine, A. Tension variability in contact wire and messenger wire of auto tensioned catenaries/ A. Capitaine, J.-P. Bianchi, P. Constant, F. Genest // World Congress on Railway Research (WCRR) 2019, Tokyo, Japan, pp. 1–8, 2019.
5. Kovalev, A. A. Issledovaniye raboty ustroystv kompensatsii natyazheniya v kontaktnoy podveske [Research of the operation of tension compensation devices in a catenary] / A. A. Kovalev, N. V. Krapivin // *Transport of the Urals*. 2018. No. 4 (59). pp. 86–90.
6. Galkin, A.G. Matematicheskoye modelirovaniye i informatsionnyye tekhnologii v zadachakh diagnostiki kontaktnoy seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Mathematical modeling and information technologies in the problems of diagnostics of the contact network of electrified railways]: monograph / A. G. Galkin, A. N. Mitrofanov, S. A. Mitrofanov // Yekaterinburg: Ural State Transport University, 2012. – 226 p.
7. Emelyanova, M. N. Povysheniye kachestva tokos'yema za schet vybora ratsional'nogo natyazheniya provodov kontaktnoy podveski [Improving the quality of current collection by choosing a rational tension of catenary wires]: specialty 05. 22. 07 «Rolling stock, traction of trains and electrification of railways»: dissertation for a candidate of technical sciences / Emelyanova Marina Nikolaevna; Scientific Research Institute of Railway Transport. - Moscow, 2015. – 102 p.
8. Lisnevsky, P. Yu. Nekotoryye aspekty v probleme izucheniya kolebaniy provodov LEP v vozdushnom potoke [Some aspects in the problem of studying oscillations of power transmission lines in an air stream] / P. Yu. Lisnevsky, V. N. Li // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika [Izvestiya vysshikh educational institutions. Electromechanics]*. 2019. No. 2 (62). S. 66–71.
9. Lukyanova, O. A. Sovershenstvovaniye metodov ispytaniy konsoly kontaktnoy seti [Development of methods for testing catenary cantilevers] / O. A. Lukyanova, A. V. Tarasenko, I. E. Chertkov // *Transport of the Urals*. 2020. No. 2 (65). pp. 93–97.
10. Safarbakov A. M. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki [Fundamentals of technical diagnostics]: a tutorial / A. M. Safarbakov, A. V. Lukyanov, S. V. Pakhomov; - Irkutsk: Irkutsk state. University of Railways, 2006.- 216 p.
11. Mozgalevsky, A. V. Technical diagnostics: a textbook for universities / A. V. Mozgalevsky, D. V. Gaskarov. - M.: Higher school, 1975. – 207 p.
12. Garanin, M. A. Sovershenstvovaniye diagnostiki kontaktnoy seti [Improving the diagnostics of the contact network] / M. A. Garanin, S. A. Frolenkov. - Text: direct // Science and education for transport. - 2016. - No. 1. S. 243-245.
13. Smerdin, A.N., Primeneniye modeley poperechnykh kolebaniy rastyanutogo stержnya dlya rascheta natyazheniy provodov kontaktnoy seti [Application of models of transverse vibrations of a stretched rod for calculating the tension of wires of a contact network] / A.N. Smerdin, E.A. Butenko // *Izvestiya Transsib*. 2019. No. 4 (40). pp. 25 - 32.
14. Nепrерывный мониторинг натяжения контактной подвески [Continuous monitoring of the tension of the contact suspension] / G. F. Nasonov, Yu. A. Chernogorov, M.E. Medvedev [et al.] // *Avtomatika na transport*. - 2016. No. 2 (2). - S. 228–258.
15. Li, V.N. Sposob diagnostirovaniya kontaktnogo provoda elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [A method for diagnosing a contact wire of electrified railways] / V. N. Li, S. V. Klimenko // *Transport of the Asia-Pacific region*. 2015. No. 1 (2-3). S. 26-28.
16. Spiridonov A.A. Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov [Planning an experiment in the study of technological processes]. – М.: *Mashinostroyeniye [Mechanical engineering]*, 1981. - 184 p.
17. Karpushkin, S. V. Teoriya inzhenernogo eksperimenta [Theory of engineering experiment: a tutorial]. V. Karpushkin, A. O. Glebov. *Tambovskiy gos. tekhnich. un-t [Tambov state technical un-t]*. - Tambov, 2017. - 81 p.

18. Boyarshinova, A.K. Teoriya inzhenerenogo eksperimenta [Theory of engineering experiment]: text of lectures / A.K. Boyarshinova, A.S. Fisher. - Chelyabinsk: YURGU, 2006. - 85 p.

Информация об авторах

Смердин Александр Николаевич – д. т. н., доцент, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Бутенко Елена Александровна – аспирантка кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск e-mail: butenkoelena1994@gmail.com

Тарасенко Александр Владимирович – к. т. н., доцент, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: alessandro-tar@yandex.ru

Information about the authors

Alexandr N. Smerdin – Doctor of Technical Science, Professor of the department «Electricity supply of railway transport», Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Elena A. Butenko – Post-graduate student «Electricity supply of railway transport», Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: butenkoelena1994@gmail.com

Alexandr V. Tarasenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Electricity supply of railway transport», Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: alessandro-tar@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).215-222

УДК 629.423

Система непрерывного контроля уровня смазки в запасной камере буксы моторно-осевого подшипника электровоза

Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков, С. Г. Шрамко✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская федерация

✉ novorossereg@mail.ru

Резюме

В статье описывается принцип работы буксы моторно-осевого подшипника электровоза, недостатки текущих способов обслуживания, влияющие на ее ресурс. В настоящее время при определении уровня смазки в буксе моторно-осевого подшипника, учитывают уровень смазки только в рабочей камере буксы, объем оставшейся смазки в запасной камере буксы не берется в расчет, что приводит к недостоверным данным о ее количестве, и не позволяет прогнозировать остаточный ресурс буксы моторно-осевого подшипника. Предлагается система непрерывного контроля смазки в запасной камере буксы, реализуемая путем установки в нее датчика, а также блока управления в кабину машиниста. Такая система позволяет обеспечить постоянный контроль уровня масла в запасной камере и своевременно информировать машиниста путем световой индикации и специалистов сервисных локомотивных депо путем беспроводной передачи данных о критическом уровне смазки на сервер. Таким образом, обслуживающий персонал получает всю необходимую информацию о состоянии буксы моторно-осевого подшипника еще до захода электровоза в депо, что дает возможность принять соответствующие меры, запланировать обслуживание электровоза и предупредить риски, связанные с unplanned отказами. Данное решение позволит не только сократить количество отказов в работе моторно-осевого подшипника, но и отследить расход смазки на протяжении всего времени эксплуатации электровоза.

Ключевые слова

электровоз переменного тока, букса моторно-осевого подшипника, осевая смазка, алгоритм работы, датчик уровня

Для цитирования

Яговкин Д. А. Система непрерывного контроля уровня смазки в запасной камере буксы моторно-осевого подшипника электровоза / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков, С. Г. Шрамко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 215–222. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).215-222

Информация о статье

поступила в редакцию: 11.12.2020, поступила после рецензирования: 16.12.2020, принята к публикации: 08.01.2021

The continuous grease level control system in the backup chamber of the motor-axle bearing box of electric locomotives

D. A. Yagovkin, O. V. Melnichenko, A. O. Linkov, S. G. Shramko✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

✉ novorossereg@mail.ru

Abstract

The article describes the operation principle of the electric locomotive motor-axle bearing box, and the shortcomings of the cur-

rent maintenance methods that affect its resource. Currently, when determining the grease level in the motor-axle bearing box, the grease level is taken into account only in the box working chamber, the volume of the remaining grease in the box backup chamber is not taken into account, which leads to inaccurate data on its amount, and does not allow predicting the residual life of the motor-axial bearing box. A system of continuous control of grease in the box backup chamber is proposed, implemented by installing a sensor in it, as well as a control unit in the driver's cab. Such a system makes it possible to constantly monitor the oil level in the backup chamber and timely informing the driver by means of light indication and specialists of the service locomotive depots by wireless transmission of data on the critical level of lubrication to the server. Thus, the maintenance personnel receive all the necessary information about the state of the motor-axle bearing box even before the electric locomotive enters the depot, which makes it possible to take appropriate measures, schedule the maintenance of the electric locomotive and prevent the risks associated with unplanned failures. This solution will allow one not only to reduce the number of failures in the operation of the motor-axial bearing, but also to track the grease consumption throughout the entire operation time of the electric locomotive.

Keywords

electric AC traction transformer, motor-axle bearing box, axial lubrication, operation algorithm, level sensor

For citation

Yagovkin D. A., Mel'nichenko O. V., Lin'kov A. O., Shramko S. G. Sistema nepreryvnogo kontrolya urovnya smazki v zapasnoi kamere buksy motorno-osevogo podshipnika elektrovoza [The continuous grease level control system in the backup chamber of the motor-axle bearing box of electric locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 215–222. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).215-222

Article Info

Received: 11.12.2020, Revised: 16.12.2020, Accepted: 08.01.2021

Введение

Моторно-осевой подшипник (МОП) одна из наиболее важных частей колесно-моторного блока (КМБ) железнодорожного транспорта. Является одним из динамически нагруженных узлов трения, от которого зависит эксплуатационная надежность, объем технического обслуживания, ремонт КМБ и колесной пары локомотива [1].

Для длительной и надежной работы МОП необходимы хорошие условия смазки, так как главной причиной отказа в работе МОП является неудовлетворительная подача смазки в зону трения, которая влечет за собой ряд неисправностей моторно-осевых подшипников. К таким неисправностям можно отнести: нагрев букс, подгар кос, подгар баббита, отсутствие смазки.

В данной статье предлагается система непрерывного контроля смазки в запасной камере буксы МОП, которая обеспечит постоянный контроль уровня масла и позволит не только сократить количество отказов в работе МОП, но и отследить расход смазки на протяжении всего времени работы электровоза.

Анализ конструкции и работы моторно-осевых подшипников

Стандартный МОП представляет собой подшипник скольжения, а также буксовый узел, в который заливается смазка для обеспечения наименьшего трения с осью колесной пары (рис. 1).

В значительной степени МОП влияют на надежность работы всего локомотива, их простой в ремонте и затраты на него.

Вкладыш выполнен из двух бронзовых половин, залитых баббитом Б16 толщиной 3 мм по диаметру $205,45+0,09$ мм с внутренней части. Торцевая по-

верхность вкладыша имеет бурт, который необходим для ограничения разбега тягового электродвигателя (ТЭД) на оси колесной пары, в нижней части вкладыша выполнена шпоночная канавка. Шпонка необходима для установки в горловину остова ТЭД для исключения проворота вкладыша. Первая половина вкладыша размещена в горловине прилива остова, вторая в горловине шапки. По шерстяной подбивке через окно горловины смазка поступает к шейке оси. Букса выполнена из стального литья и соединена с остовом специальным замком, а также закреплена четырьмя болтами диаметром М36. Внутренний объем буксы разделяется с помощью перегородок на три камеры: рабочую, запасную и камеру для кос (подбивочная камера). Через перепускную трубку рабочая и запасная камера соединяются.



Рис. 1. Узел моторно-осевого подшипника электровоза

Fig. 1. Assembly of the motor-axial bearing of the electric locomotive

Конструкция и принцип работы моторно-осевого подшипника электровоза

МОП состоит из вкладыша и буксы (шапки) (рис. 2).

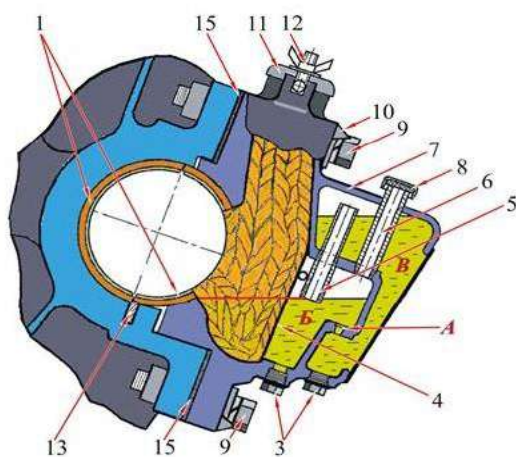


Рис. 2. Конструкция узла моторно-осевого подшипника:

- 1 – латунные вкладыши с баббитовой заливкой; 2 – косы из шерстяной пряжи; 3 – сливные пробки; 4 – сетка; 5 – перепускная трубка; 6 – заправочная трубка; 7 – корпус буксы моторно-осевого подшипника; 8 – крышка заправочной горловины; 9 – болт крепления буксы; 10 – стопорная планка; 11 – крышка буксы моторно-осевого подшипника; 12 – барашек крышки; 13 – шпонка; 14 – окно вкладыша; 15 – стальная регулировочная прокладка; А – конусообразное отверстие; В – рабочая камера; В – запасная камера

Fig. 2. Design of the motor-axial bearing assembly:

- 1 – brass bushings with a babbitt lining; 2 – braids from woolen yarn; 3 – drain plugs; 4 – mesh; 5 – bypass pipe; 6 – filling pipe; 7 – housing of the motor-axial bearing box; 8 – filler cap; 9 – box mounting bolt; 10 – locking bar; 11 – cover of the motor-axial bearing box; 12 – thumbshell cover; 13 – key; 14 – liner window; 15 – steel shim; А – tapered hole; В – working chamber; В – backup camera

В конструкции буксы МОП предусмотрены две сливные пробки, одна из которых предназначена для регулирования положения перепускной трубки и слива смазки из рабочей камеры, а вторая для слива смазки из запасной камеры.

Смазка под давлением 0,25–0,3 МПа (2,5–3 кгс/см²) подается с помощью шланга с металлическим наконечником через заправочное отверстие в запасную камеру. После этого смазка через перепускную трубку поступает в рабочую камеру. Воздух вытесняется в атмосферу с помощью перепускного канала, рабочую камеру, а также камеру для

кос. Смазка из запасной камеры поступает в рабочую. В результате воздух собирается в верхней части запасной камеры и создается противодавление, и достигнув величины давления запрессовки, смазка выходит из наконечника. Затем шланг достают из заправочного отверстия. Под давлением воздуха и собственной массы смазка поступает в рабочую камеру через конусообразное отверстие, соединяющее рабочую камеру с запасной, а из рабочей камеры через сетку в камеру кос. Уровень смазки в запасной камере уменьшается, а также снижается давление воздуха в верхней части камеры. В результате возникает разреженность воздуха, притягивающая смазку и удерживающая ее от дальнейшего перетекания из камеры в камеру. Смазка из рабочей камеры по шерстяной подбивке поступает на шейку оси, за счет чего уровень смазки в рабочей камере снижается. При открытии нижнего отверстия перепускной трубки воздух из атмосферы через подбивочную, рабочую камеру и открывшийся перепускной канал поступит в верхнюю часть запасной камеры. Разреженность в верхней части запасной камеры исчезает и давление сравнивается с атмосферным. Смазка перестает удерживаться в запасной камере и перетекает через конусообразное отверстие в рабочую камеру.

Снижение уровня смазки в запасной камере МОП вызывает понижение давления в верхней части камеры, за счет чего смазка из запасной камеры не поступает в камеру для кос, что позволяет поддерживать уровень в камере для кос и рабочей камере примерно одинаковым [2, 3].

МОП представляет собой вторую опору ТЭД и является динамически нагруженным узлом электровоза, поэтому за ним требуется постоянный контроль и уход. Контроль смазки в буксе МОП необходим, потому что значительное количество отказов в работе букс происходит по причине нагрева и неудовлетворительной подачи смазки в рабочую зону [4, 5].

Открытым на сегодняшний день остается вопрос по определению уровня смазки именно в запасной камере МОП, так как способов на сегодняшний день не существует, в то время как именно уровень смазки в этой камере может сказать об остаточном количестве смазки и позволяет определить остаточный ресурс МОП.

В качестве решения предлагается система контроля уровня смазки в запасной камере буксы МОП, которая позволит контролировать расход смазки и сократить количество отказов в работе МОП [6]. Она предусматривает датчик уровня масла, который будет устанавливаться в корпус буксы в верхней части, систему управления.

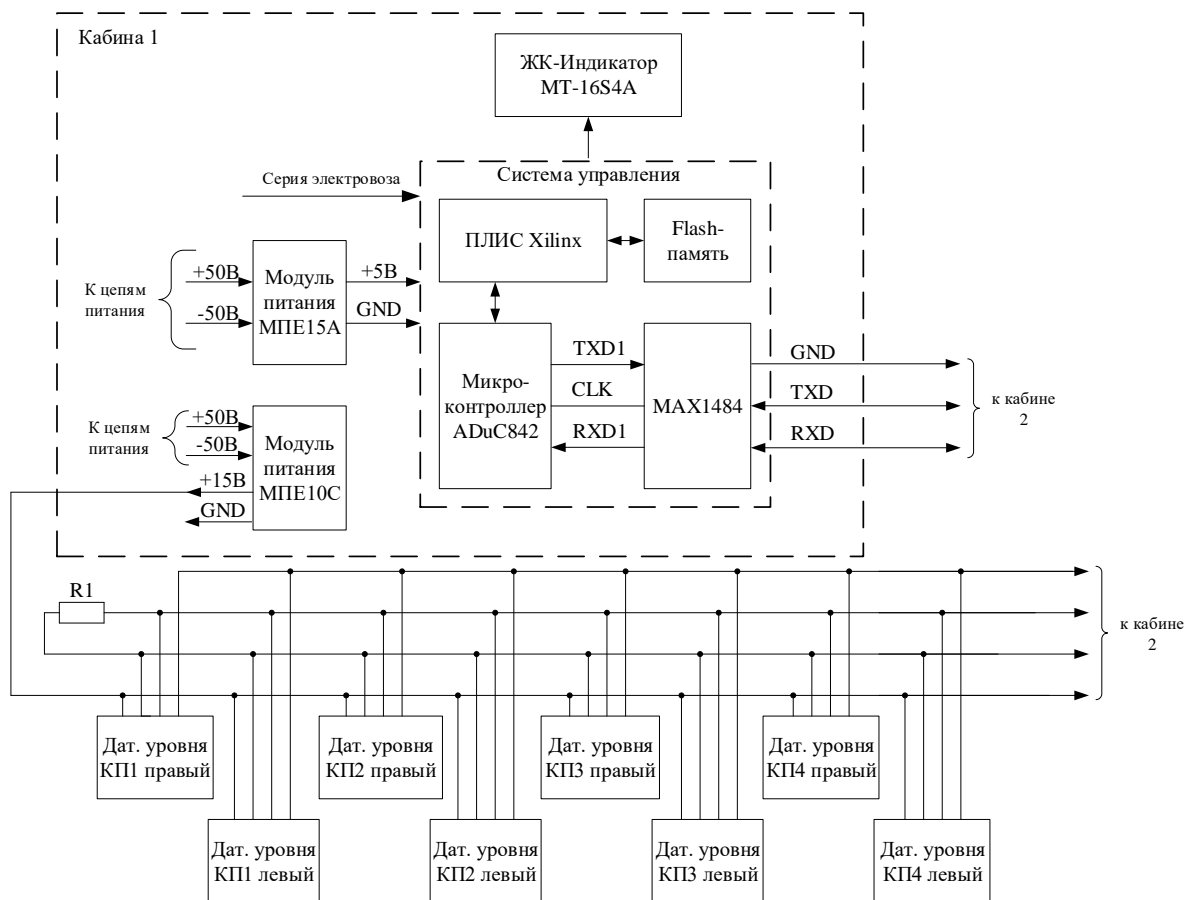


Рис. 3. Функциональная схема системы непрерывного контроля уровня смазки в запасной камере боксы моторно-осевого подшипника

Fig. 3. Functional diagram of the system for continuous monitoring of the grease level in the backup chamber of the axle-motor bearing box

Функциональная схема (рис. 3) представляет устройство и принцип работы системы непрерывного контроля уровня смазки в запасной камере боксы МОП для электровоза Э5К. Система предусматривает датчики уровня, устанавливаемые в боксы МОП, а также для каждой кабины электровоза систему управления, которая преобразует и передает сигналы с датчиков на блок индикации.

Датчики уровня масла с интерфейсом RS-485 необходимы для измерения уровня масла в запасной камере боксы МОП. Датчики получают питание напряжением 15 В через стабилизирующий модуль питания МПЕ10С. Система управления, содержащая в себя приемопередатчик MAX1484, микроконтроллер ADuC842 и программируемую логическую интегральную схему Xilinx XC3S50VQ100, получает питание напряжением 5 В через модуль питания МПЕ15А и предназначена для преобразования выходного сигнала с датчиков уровня и передачи его на жидкокристаллический индикатор МТ-16S4А [7, 8]. Также система управления имеет flash-память для хранения и передачи информации.

Датчик уровня НТР621

Существует большое разнообразие датчиков уровня: стержневые кондуктометрические, поплавковые, ультразвуковые, гидростатические, лазерные и т. д., отличающиеся принципом действия [9, 10]. При выборе датчика учитывались такие критерии, как габаритные размеры, измеряемая среда, температура окружающей среды, способ установки, а также работа с вязкими жидкостями. Исходя из этих требований, был выбран емкостный датчик уровня масла НТР621 (рис. 4) [11].

Работа датчика основана на свойстве конденсатора изменять свою емкость при перемене состава и распределения материала диэлектрика, который разделяет пластины конденсатора.

При изменении уровня измеряемой жидкости величина суммарной емкости конденсатора также меняется. Если конденсатор включен в электрическую цепь, то по изменению емкости можно однозначно судить об изменении уровня жидкости.

В конструкции емкостных датчиков не используются подвижные элементы, поэтому они достаточно надежны и долговечны. Датчик контроля

уровня НТР621 может использоваться для проверки уровня непроводящего масла, включая дизельное топливо, керосин, бензин, гидравлическое масло. Он может регулировать длину стержня, поле калибрует нулевую точку и полный масштаб. Он может использоваться для измерения уровня жидкости (масла) железнодорожного локомотива, автомобильных топливных баков, танкеров, нефтяных депо.



Рис. 4. Датчик уровня масла НТР621
Fig. 4. Oil level sensor НТР621

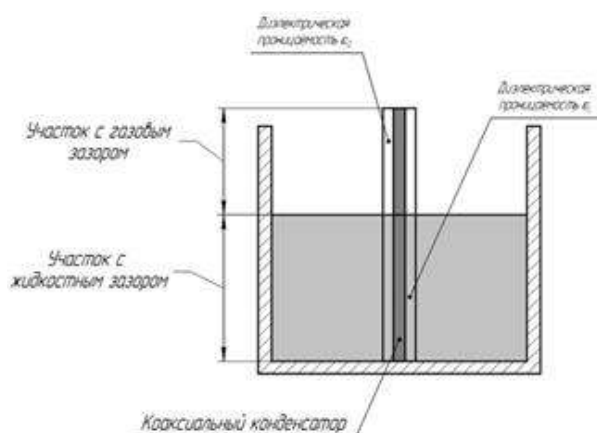


Рис. 5. Общая схема емкостного датчика уровня
Fig. 5. General diagram of a capacitive level sensor

Для проработки проекта установки датчика в буксу МОП по габаритным размерам датчика была построена его 3D-модель (рис. 6).



Рис. 6. 3D-модель датчика НТР621
Fig. 6. 3D model of the НТР621 sensor

Датчик следует устанавливать в верхнюю часть буксы по правому краю от заправочной горловины. Такое расположение датчика позволит беспрепятственно открывать и закрывать заправочную горловину, не создавая помехи при заправке буксы, а также датчик не будет упираться в стенки рабочей и

запасной камер, что позволит смазке легко перетекать через конусное отверстие, обеспечивая нормальную работу буксы (рис. 7).

Электрическая принципиальная схема системы непрерывного контроля уровня смазки в запасной камере буксы МОП включает несколько элементов (микроконтроллер, приемопередатчик, ПЛИС, модули питания, ЖК-индикатор). Каждый элемент имеет свою микросхему.

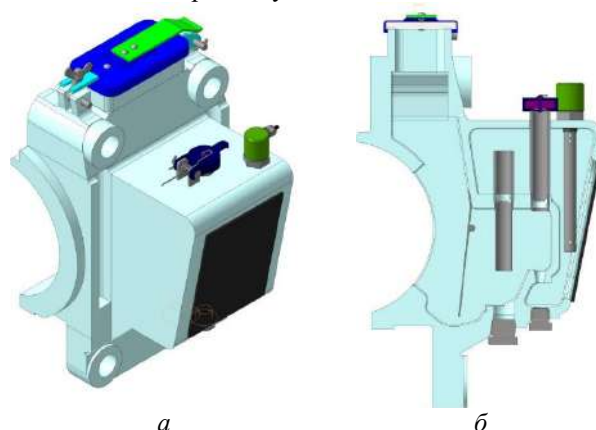


Рис. 7. Внешний вид расположения датчика уровня в буксе моторно-осевого подшипника:
а – вид снаружи; б – вид в разрезе

Fig. 7. External view of the location of the level sensor in the axle-motor bearing box:
а – outside view; б – sectional view

Алгоритм работы системы непрерывного контроля уровня смазки в запасной камере буксы моторно-осевого подшипника

Система непрерывного контроля смазки в запасной камере буксы МОП, как и любая другая

Система, работает согласно определенному алгоритму. Алгоритм четко указывает последовательность выполнения операций. Для каждой системы разрабатывается собственный алгоритм работы. Алгоритм для данной системы представлен далее (рис. 8).

Алгоритм предусматривает измерение уровня масла в запасной камере буксы МОП. Начинается измерение уровня с установки серии электровоза, затем проверяется рабочее состояние датчика. При рабочем состоянии измерительного прибора происходит измерение уровня масла в буксе. Сигнал с датчиков поступает в систему измерения, где данные преобразуются и передаются на ЖК индикатор для отображения уровня масла. При этом происходит проверка соответствия уровня по условным значениям, т. е. какому значению соответствует уровень смазки в буксе. При максимальном значении уровня горит зеленая лампочка. При понижении уровня до среднего значения начинает мигать красная лампочка, в случае достижения минимального

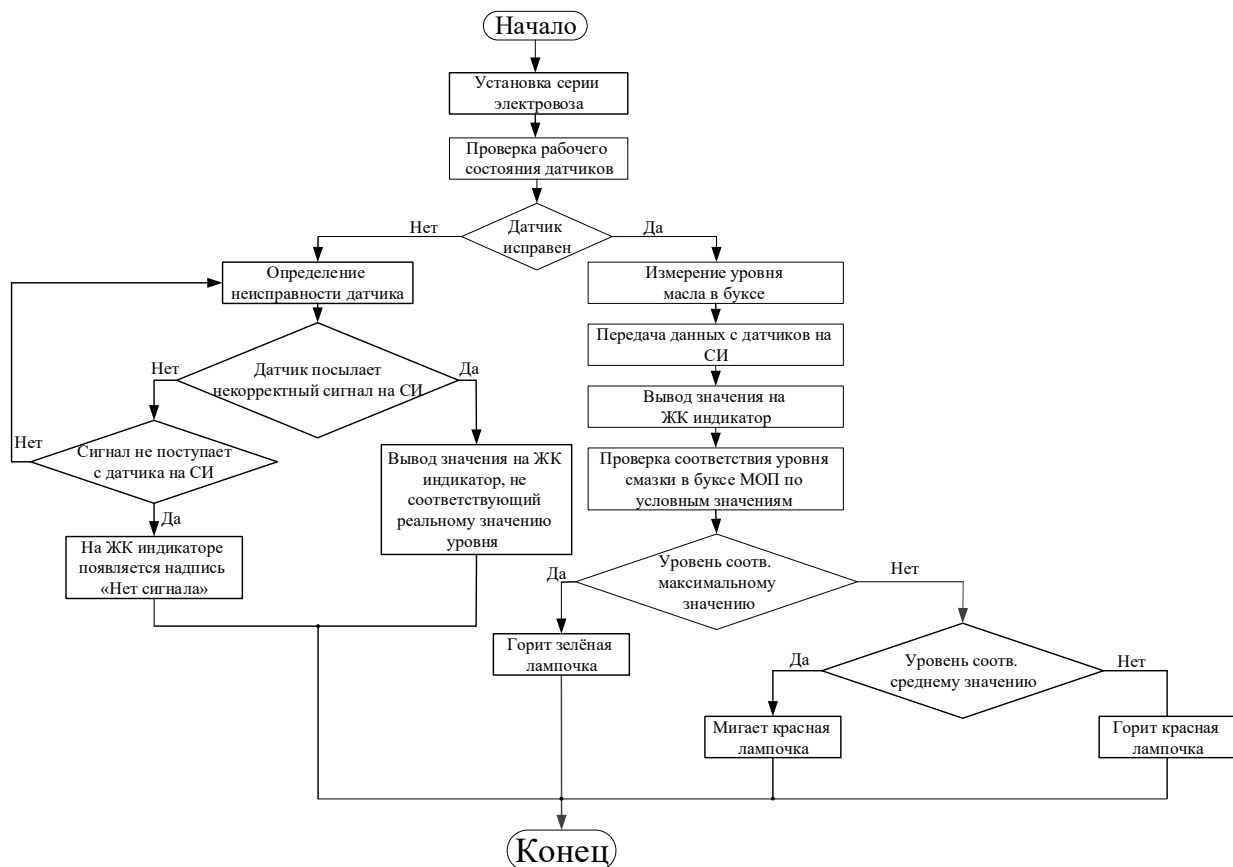


Рис. 8. Алгоритм работы системы непрерывного контроля уровня масла в буксе моторно-осевого подшипника

Fig. 8. Algorithm of operation of the system for continuous monitoring of the oil level in the motor-axle bearing box

уровня, загорается красная лампочка, что свидетельствует о необходимости заправки боксы смазкой.

В случае неисправности датчика измерения будут происходить некорректно, и на ЖК индикатор будет поступать неверная информация, которая не соответствует реальному уровню смазки в буксе. Также в случае неисправности датчика сигнал может вообще не поступать на систему измерения, о чем будет свидетельствовать надпись на ЖК индикаторе «Нет сигнала». В таких случаях, необходимо выявить причину неисправности датчика и устранить поломку для дальнейшей работы системы.

Конструкции шапок МОП одинаковы и различаются лишь размером высоты ниппеля. Разница в установке ниппеля (по высоте) на различных двигателях объясняется тем, что угол наклона шапок в рабочем положении у них разный: у тяговых двигателей НБ-514Б (электровоз 2ЭС5К) угол равен 27° , у двигателей НБ-412 и НБ-418 (электровозы ВЛ60, ВЛ80) – 15° , у двигателей НБ-514 (электровоз ВЛ85) – 20° . Соответственно изменению угла наклона шапки изменяется высота ниппеля [12–17]. Если же в шапку тягового двигателя НБ-514 установить нип-

пель так, как его устанавливают в шапку двигателя НБ-412, то в рабочем положении этих шапок нижний край ниппеля окажется выше порожка и смазка будет вытекать из подшипника [18], чтобы устранить эту неисправность, устанавливают ниппель необходимого размера.

На (рис. 9) показан максимальный и минимальный уровень масла в буксе МОП электровоза серии Э5К. Главным достоинством такой системы является то, что благодаря постоянному контролю уровня смазки можно не только отследить расход масла, но и в случае быстрого или медленного расхода смазки своевременно предупредить о неисправном состоянии боксы МОП и необходимости производства своевременного обслуживания боксы и тем самым избежать нагрева МОП, задира шейки оси и выгорания кос.

Заключение

Система непрерывного контроля смазки в запасной камере боксы МОП, позволяет предупреждать аварийные состояния боксы МОП, вовремя производить их обслуживание за счет постоянного мониторинга уровня смазки локомотивной бригадой.

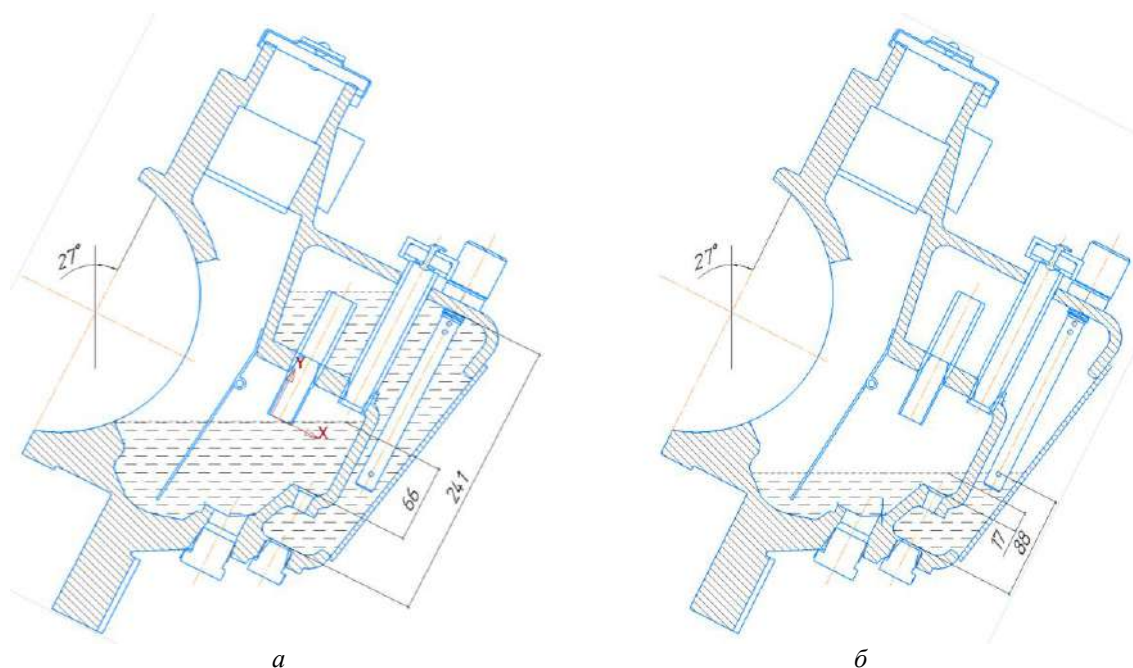


Рис. 9. Уровень масла в бунке электровоза Э5К:
a – максимальный уровень; *б* – минимальный уровень
Fig. 9. Oil level in the box of the E5K electric locomotive:
a – maximum level; *b* – minimum level

Список литературы

1. Больше внимания моторно-осевым подшипникам / Л.М. Лорман // Локомотив. 2004, № 11. С. 21–25.
2. Буше Н.А., Фролов В.К. Сталебаббитовые моторно-осевые подшипники для магистральных локомотивов // Вестник ВНИИЖТ, 2000. № 4. С. 28.
3. Текущий ремонт и техническое обслуживание электровозов постоянного тока / С.Н. Красковская, Э.Э. Ридель, Р.Г. Черепашенцев. М.: Транспорт, 1989. 408 с.
4. Моторно-осевые подшипники и системы их смазки на современных отечественных локомотивах: учеб. пособие / О.В. Мельниченко, Ю.В. Газизов, Т.Н. Мельниченко. Иркутск: ИРГУПС, 2009. 96 с.
5. Шаповалов В.В., Ахвердиев К.С., Мурадов З.А. Моторно-осевые подшипники скольжения локомотивов с организованной капиллярной системой смазки // Электровозостроение. Вестник ВЭЛНИИ. Новочеркасск, 1992. С. 201–207.
6. Экономика железнодорожного транспорта : учеб. для вузов ж.-д. транс. / под ред. Н.П. Терёшиной, Б.М. Лапидуса, М.Ф. Трихунова. М.: УМК МПС России, 2012. 583 с.
7. Микроконтроллер ADuC842. Предварительные технические характеристики. URL: http://autex.spb.su/download/microconverter/aduc842_pr_rus.pdf (дата обращения: 04.07.2020).
8. ПЛИС с архитектурой FPGA семейства Spartan™-3. URL: <http://amber.ssau.ru/download/spartan3.pdf> (дата обращения: 04.07.2020).
9. Датчики уровня жидкости. URL: https://rusautomation.ru/datchiki_urovnya/datchiki-urovnya-zhidkosti (дата обращения: 12.04.2020).
10. Классификация датчиков уровня. URL: <http://dis-rostov.ru/datchiki-urovnya-vodi-topliva-zhidkosti/> (дата обращения: 10.04.2020).
11. НРТ621 Multipurpose Capacitance Level Sensor. URL: https://holykell.com/products/NPT621_Multipurpose_Capacitance_Level_Sensor.html (дата обращения: 04.07.2020).
12. Инструкция по охране труда для слесаря по ремонту электровозов ОАО «РЖД». ИОТ РЖД-4100612-ЦТР-19-2012.5.
13. ПКБ ЦТ.25.0103. ОАО «РЖД». Технология подготовки, заправки, подбивки и уход в процессе эксплуатации моторно-осевых подшипников тяговых двигателей локомотива. 2011. 20 с.
14. Тушканов, Б.А. Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации / под ред. Б.А. Тушканова. М.: Транспорт, 1985. 541 с.
15. Электровоз ВЛ80С. Руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1982. 622 с.
16. Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.Г. Пушкарев, Л.А. Позднякова и др. М.: 1995. 480 с.
17. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Новочеркасск, 2007. Т. 1, 635 с. Т. 2, 640 с.

18. Евдокимов А.Ю. и др. Экологические проблемы использования смазочных материалов. М.: Нефть и газ, 2000. 422 с.

Referenses

1. Lorman L.M. Bol'she vnimaniya motorno-osevym podshipnikam [More attention to motor-axial bearings]. *Lokomotiv [Locomotive]*, 2004. No. 11. Pp. 21–25.
2. Boucher N.A., Frolov V.K. Stalebabbitovye motorno-osevye podshipniki dlya magistral'nykh lokomotivov [Steel-babbit motor-axial bearings for mainline locomotives]. *Vestnik VNIIZhT [Vestnik of Railway Research Institute]*, 2000. No. 4. P. 28.
3. Kraskovskaya S.N., Riedel' E.E., Cherepashenets R.G. Tekushchii remont i tekhnicheskoe obsluzhivanie elektrovozov postoyannogo toka [Routine repair and maintenance of direct current electric locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1989. 408 p.
4. Mel'nichenko O.V., Gazizov Yu.V., Mel'nichenko T.N. Motorno-osevye podshipniki i sistemy ikh smazki na sovremennykh otechestvennykh lokomotivakh: ucheb. posobie [Motor-axial bearings and their lubrication systems on modern domestic locomotives: a study manual]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2009. 96 p.
5. Shapovalov V.V., Akhverdiev K.S., Muradov Z.A. Motorno-osevye podshipniki skol'zheniya lokomotivov s organizovannoi kapillyarnoi sistemoi smazki [Motor-axial sliding bearings of locomotives with an organized capillary lubrication system]. *Elektrovozostroyeniye. Vestnik VELNI. [Electric locomotive building. VELNI Bulletin]*. Novocheboksarsk, 1992. Pp. 201–207.
6. Tereshina N.P., Lapidus B.M., Trikhunova M.F. (eds.) *Ekonomika zheleznodorozhnogo transporta: ucheb. dlya vuzov zh.-d. trans. [Economy of railway transport: a textbook for universities of railway transport]*. Moscow: UMK Ministry of Railways of Russia Publ., 2012. 583 p.
7. Mikrokontrol'ler ADuC842. Predvaritel'nye tekhnicheskie kharakteristiki [Microcontroller ADuC842. Preliminary specifications] [Electronic media]. URL: http://autex.spb.su/download/microconverter/aduc842_pr_rus.pdf Accessed: April 07, 2020.
8. PLIS s arkhitekturoi FPGA semeistva Spartan™-3 [PLDs with a FPGA architecture of the Spartan™ -3 family] [Electronic media]. URL: <http://amber.ssau.ru/download/spartan3.pdf> Accessed: April 07, 2020.
9. Datchiki urovnya zhidkosti [Liquid level sensors] [Electronic media]. URL: https://rusautomation.ru/datchiki_urovnya/datchiki-urovnya-zhidkosti Accessed: April 12, 2020.
10. Klassifikatsiya datchikov urovnya [Classification of level sensors] [Electronic media]. URL: <http://dis-rostov.ru/datchiki-urovnya-vodi-topлива-zhidkosti/> Accessed: April 10, 2020.
11. HPT621 Multipurpose Capacitance Level Sensor [HPT621 Multipurpose Capacitance Level Sensor] [Electronic media]. URL: https://holycell.com/products/HPT621_Multipurpose_Capacitance_Level_Sensor.html Accessed: April 07, 2020.
12. Instruksiya po okhrane truda dlya slesarya po remontu elektrovozov OAO «RZhD». IOT RZhD-4100612-TsTR-19-2012.5. [Instruction on labor protection for a locksmith for the repair of electric locomotives of “Russian Railways” OAO. IOT RZD-4100612-TsTR-19-2012.5].
13. Elektrovoz VL80R. Rukovodstvo po ekspluatatsii [PKB TsT.25.0103. Russian Railways OAO. Technology of preparation, refueling, tamping and maintenance during operation of axial motor bearings of locomotive traction motors. 2011. 20 p].
14. Tushkanov B.A. [Electric locomotive VL80R. An operation manual. In Tushkanov B.A. (ed.) Moscow: Transport Publ., 1985. 541 p.
15. Elektrovoz VL80S. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL80S. An operation manual]. Moscow: Transport Publ., 1982. 622 p.
16. Tushkanov B.A., Pushkarev N.G., Pozdnyakova L.A. et al. Elektrovoz VL85: Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric locomotive VL85. An operation manual]. Moscow, 1995. 480 p.
17. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). An operation manual]. Novocheboksarsk, 2007. Vol. 1, 635 p. Vol. 2, 640 p.
18. Evdokimov A.Yu. et al. *Ekologicheskie problemy ispol'zovaniya smazochnykh materialov [Environmental problems of the use of lubricants]*. Moscow: Neft' i gaz Publ., 2000. 422 p.

Информация об авторах

Яговкин Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: yagovkinda@mail.ru.

Мельниченко Олег Валерьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olegmelnval@mail.ru.

Линьков Алексей Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: linkovalex@mail.ru.

Шрамко Сергей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: novorossrg@mail.ru

Information about the authors

Dmitrii A. Yagovkin – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: yagovkinda@mail.ru.

Oleg V. Mel'nichenko – Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olegmelnval@mail.ru.

Aleksei O. Lin'kov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: linkovalex@mail.ru.

Sergei G. Shramko – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: novorossrg@mail.ru

Анализ ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Тайшет – Тулун Восточно-Сибирской железной дороги

Е. Ю. Пузина^{1,2}, И. А. Худонов¹✉

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ hudonogovi@mail.ru

Резюме

Одним из наиболее проблемных участков Восточно-Сибирской железной дороги является участок Тайшет – Тулун, где при организации ремонтных режимов отмечается не только понижение уровня напряжения в контактной сети, но и значительно снижается напряжение в питающих линиях системы внешнего электроснабжения при возрастании нагрузок воздушных линий. С учетом роста объема грузоперевозок в перспективе до 2025 г., а также с целью проверки необходимости усиления систем внешнего и тягового электроснабжения исследуемого участка железной дороги на основе программно-вычислительного комплекса «Fazonord» была разработана комбинированная модель данных систем при различных комбинациях усиления. С целью обеспечения заданной пропускной способности участка исследован ряд возможных способов усиления, одним из которых является комбинация с установкой автотрансформатора, включением трансформаторов на параллельную работу и увеличением сопротивления устройства параллельной компенсации. Данное сочетание устройств электроснабжения почти идеально подходит как по качеству напряжения, так и по токам в контактной сети и воздушной линии, однако не является оптимальным из-за превышения предельно допустимого значения тока в устройстве продольной компенсации. Модель усиления предполагает установку автотрансформатора на распределительной районной подстанции Нижнеудинска с включением в параллель на трансформаторных подстанциях Замзора, Ука и Нижнеудинска тяговых трансформаторов и монтаж компенсирующего устройства на посту секционирования Худоеланского.

Ключевые слова

усиление системы электроснабжения, автотрансформатор, тяговые трансформаторы, устройство продольной компенсации, устройство параллельной компенсации, пост секционирования

Для цитирования

Пузина Е. Ю. Анализ ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Тайшет – Тулун Восточно-Сибирской железной дороги / Е. Ю. Пузина, И. А. Худонов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 223–234. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).223-234

Информация о статье

поступила в редакцию: 05.12.2020, поступила после рецензирования: 19.12.2020, принята к публикации: 12.01.2021

Analysis of power supply system repair modes of the Tayshet – Tulun section of the East Siberian railway

Е. Yu. Puzina^{1,2}, I. A. Khudonogov¹✉

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ hudonogovi@mail.ru

Abstract

One of the most problematic sections of the East Siberian Railway is the Tayshet – Tulun section, where, when organizing repair modes, one can note not only a decrease in the voltage level in the overhead contact system, but also a significant decrease in the voltage in the supply lines of the external power supply system with an increase in the loads of overhead lines. Taking into account the growth in the cargo transportation volume to the year 2025 and beyond, as well as in order to verify the need to strengthen the external and traction power supply systems of the railway section under study on the basis of the Fazonord software package, a combined model of these systems was developed with various combinations of reinforcement. In order to ensure the specified throughput capacity of the section, a number of possible reinforcement methods have been investigated, one of which is a combination with the installation of an autotransformer, the inclusion of transformers for parallel operation and an increase in the resistance of the parallel capacitor bank. This combination of power supply devices is almost ideal both in terms of voltage quality and currents in the overhead contact system and overhead line. However, it is not optimal due to the excess of the maximum permissible current value in the series capacitor bank. The reinforcement model assumes the installation of an autotransformer at the distribution point of Nizhneudinsk with the connection of traction transformers in parallel at the traction substations of Zamzora, Uka and Nizhneudinsk, and the installation of a compensating device at the sectioning station of Khudoelansky.

Keywords

power supply system reinforcement, autotransformer, traction transformers, longitudinal compensation device, parallel compensation devices, post-partitioning

For citation

Puzina E. Yu., Khudonogov I. A. Analiz remontnykh rezhimov raboty sistemy elektrosnabzheniya uchastka Taishet – Tulun Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi [Analysis of power supply system repair modes of the Tayshet – Tulun section of the East Siberian railway]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 223–234. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).223-234

Article Info

Received: 05.12.2020, Revised: 19.12.2020, Accepted: 12.01.2021

Введение

В настоящее время актуальна проблема увеличения объема грузоперевозок на железнодорожном транспорте с учетом организации движения тяжеловесными поездами массой 7 100 т, двояными поездами массой 12 600 т. При этом возрастает нагрузка как на систему тягового электроснабжения (СТЭ), так и на систему внешнего электроснабжения (СВЭ) [1–4]. При этом большая часть электрифицированных железных дорог была проложена в XX в. и рассчитана на меньшие объемы грузоперевозок [5–8].

Повышение нагрузок на воздушную линию (ВЛ) СВЭ, на контактную сеть (КС) и тяговые трансформаторы СТЭ особенно сильно проявляются в ремонтных режимах работы при отключении таких важных их элементов, как участки питающих ВЛ, автотрансформаторы на крупных районных подстанциях [9–14].

На Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) в последние годы обострилась данная проблема на участке Тайшет – Тулун, где при необходимости организации ремонтных режимов отмечается не только понижение уровня напряжения в КС, но и в питающих линиях из-за существенно возрастающих нагрузок ВЛ. Это говорит о недостаточной мощности СВЭ и приводит к необходимости рассмотрения вопроса об установке дополнительных автотрансформаторов, связывающих ВЛ-110 и ВЛ-220 кВ. Также необходимо рассмотреть вопрос об усилении СТЭ указанного участка различными средствами: установкой кодирующих устройств (КУ) и устройствами параллельной компенсации (УПК), организацией параллельной схемы питания КС, включением на параллельную работу тяговых трансформаторов [15–19].

Описание проблемной ситуации и постановка задачи

По данным филиала АО «Системный оператор Единой энергетической системы» (СО ЕЭС) выявлено, что при анализе токовых нагрузок транзита ТШ – ТЛ в соответствии с данными сертифицированной автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) в период с 7 по 17 ноября

2018 г. токи по ВЛ-110 кВ 33-ТШ значительно увеличились по сравнению с предыдущим и последующим периодами. При этом анализ исполненных графиков движения поездов показывает, что интенсивность потребления тяговых нагрузок 14 ноября 2018 г. принципиально не отличается от предыдущих и последующих периодов.

Необходимо отметить, что с 7 по 17 ноября 2018 г. в соответствии с данными АИИС КУЭ значительно увеличился переток мощности по ВЛ-110 кВ от ХЛ до ТЛ. Например, 14 ноября за вычетом нагрузки ПС-110 БД с колебаниями от 30 до 61 МВА – при отсутствии какой-либо иной тяговой нагрузки на этом участке. Данный дополнительный переток, создавая добавочную нагрузку на транзит в совокупности с тяговой нагрузкой, и привел к отключению ШСВ-110 ПС 110 НУД при ненормальной схеме питания.

Анализируя схемы электроснабжения за период 7–17 ноября 2018 г., необходимо отметить, что в данное время была выведена в ремонт воздушная линия ВРЗ – НУД. Данное обстоятельство с большой долей вероятности и привело к увеличению дополнительного перетока, так как с 18 ноября 2018 г он не превышает 30 МВА и нередко имеет отрицательную направленность. Соответственно и токи по ВЛ-110 кВ 33 – ТШ Тайшет значительно снизились и по данным АИИС КУЭ не превышают величины 400 А, а уровень напряжения 110 кВ на тяговых подстанциях транзита ТШ – ТЛ стабилизировался.

Из протокола совещания Иркутской электросетевой компании (ИЭСК) [13], на которой присутствовали представители ООО «Транснефть-Восток», ООО «Транснефтьэнерго», филиала ОАО «РЖД» – Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры, а также филиала СО ЕЭС «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Иркутской области», следует, что рассматривалась проблема по обеспечению надежности и качества поставляемой электрической энергии на Нижнеудинскую нефтеперерабатывающую станцию. В ходе данного совещания представители сделали вывод, что основной проблемой являются коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности, значения которых в большинстве рассмотренных ре-

жимов превышают 4 % (предельно-допустимое значение), коэффициенты напряжений гармоник и не-синусоидальности превышают нормы ГОСТ 32144-2013. При этом выявлено, что источником искажений напряжений являются тяговые нагрузки ОАО «РЖД». На сегодняшний день питание тяговой нагрузки и районной нагрузки осуществляется по разным трансформаторам.

Необходимо отметить, что потребляемая тяговыми подстанциями мощность транзита на участке ТШ–ТЛ не превышает разрешенную мощность. Исходя из опыта эксплуатации следует, что СВЭ 110 кВ ТШ–ТЛ давно выработала свой ресурс по пропускной способности. Это подтверждается фактическими измерениями и нестабильным уровнем напряжения в сети 110 кВ. Внедрение различных компенсирующих, стабилизирующих и иных устройств для повышения пропускной способности системы 110 кВ, как показала практика внедрения БСК на ПС ВД, БСК на ПС СБ и других объектах, не приводит к повышению показателей качества электроэнергии. Единственным надежным средством улучшения является усиление системы, как произошло при включении ВЛ-500 кВ по ПС Усть-Кут, где качество после включения улучшилось в два раза. По всей вероятности, и в данном случае наиболее надежным вариантом усиления сети является подпитка транзита 110 кВ от линии 220 (500) кВ с установкой автотрансформатора (АТ) по РП НУД.

Таким образом, можно сделать вывод, что участок ТШ – ТЛ требует масштабного усиления для обеспечения достаточной пропускной способности СВЭ, пропуска поездов необходимой массы с потребным минимальным межпоездным интервалом и требований к качеству напряжения не только в нормальном режиме, но и особенно в ремонтных режимах энергосистемы.

Анализ параметров ремонтных режимов работы системы тягового электроснабжения участка ТШ – ТЛ

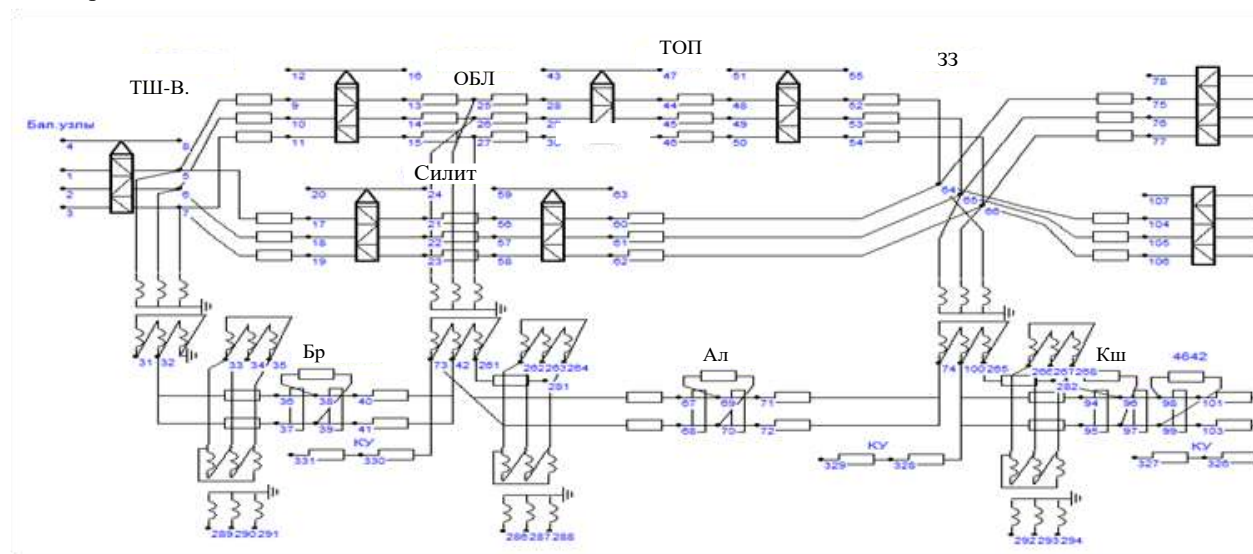
Для исследуемого участка наиболее тяжелыми ремонтными режимами являются:

1. Вывод ВЛ ВРЗ – НУД;
2. Вывод ВЛ НУД – ХЛ;
3. Вывод ВЛ ТШ – СЛ.

С целью оценки параметров указанных ремонтных режимов выполнено моделирование совместно СВЭ и СТЭ участка Тайшет – Тулун в программно-вычислительном комплексе «Fazonord» (рис. 1).

Данные по изменению напряжения в ремонтном режиме 1, полученные в «Fazonord», представлены ниже (рис. 2), (табл. 1).

Также в ремонтном режиме 1 по результатам расчета получен максимальный ток ВЛ-110 кВ, равный 521,3 А, превышающий ее допустимый ток 510 А, на участке 33 – ВРЗ. При этом коэффициенты загрузки СТ на тяговых подстанциях 33, УК, НУД превышают максимально допустимое значение и составляют соответственно 2,15; 2,14; 2,08. В ремонтном режиме 2 получен максимальный ток ВЛ-110 кВ, равный 538 А, превышающий ее допустимый ток 510 А, на участке НУД – РБ. При этом коэффициенты загрузки СТ на тяговых подстанциях участка не превысили максимально допустимого значения. В ремонтном режиме 2 получен максимальный ток ВЛ-110 кВ, равный 562 А, превышающий ее допустимый ток 510 А, на участке ТШ – ОБЛ. При этом коэффициенты загрузки СТ на тяговых подстанциях 33, УК, НУД превышают максимально допустимое значение и составляют соответственно 2,16; 2,17; 2,14. Уровень напряжения в контактной сети явно ниже минимально допустимого во всех трех ремонтных режимах.



a

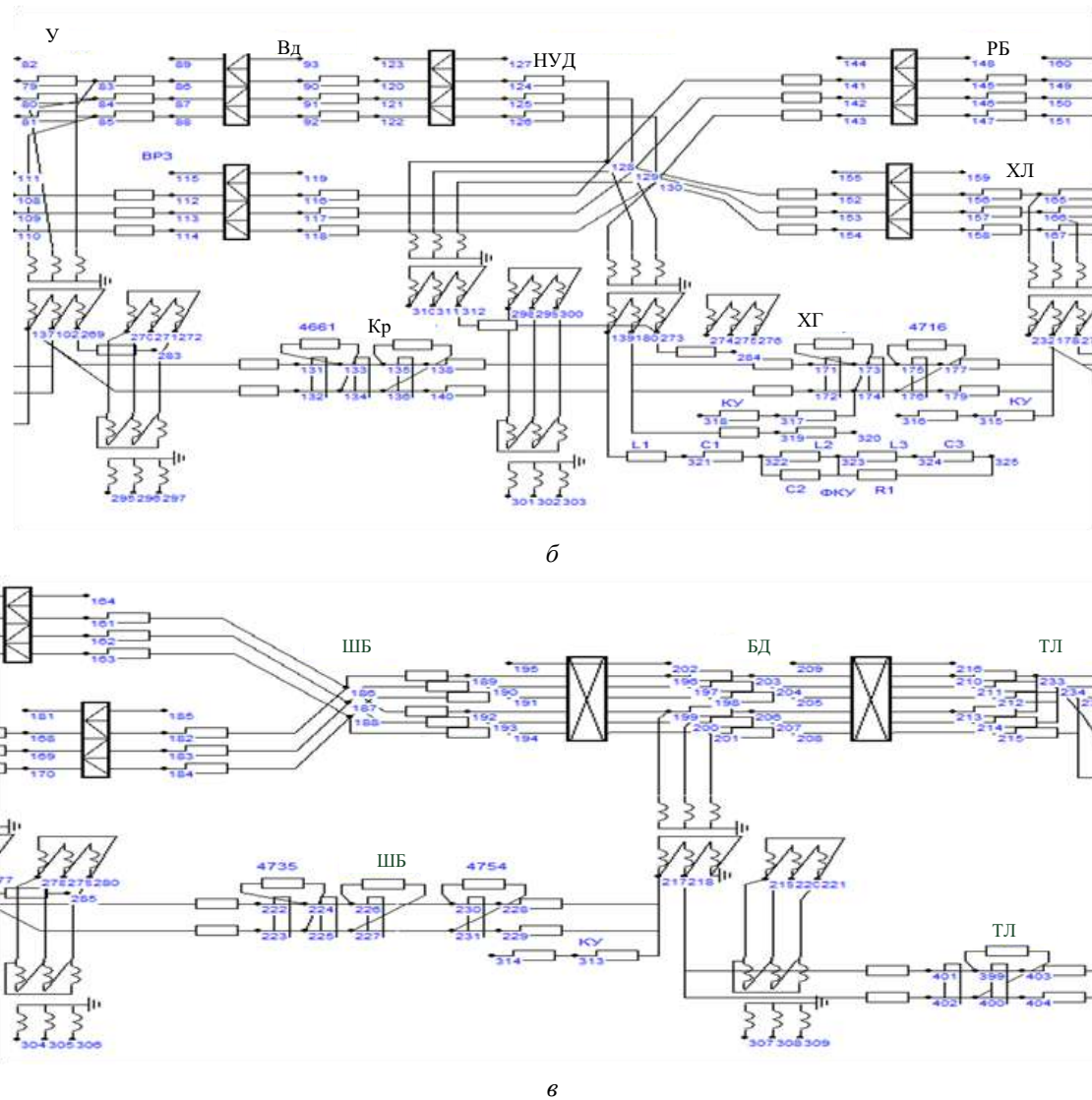


Рис. 1. Расчетная модель участка ТШ – ТЛ: а – 1 участок; б – 2 участок; в – 3 участок
 Fig. 1. Design model of the Tayshet – Tulun section: a – 1 section; b – section 2; c – section 3

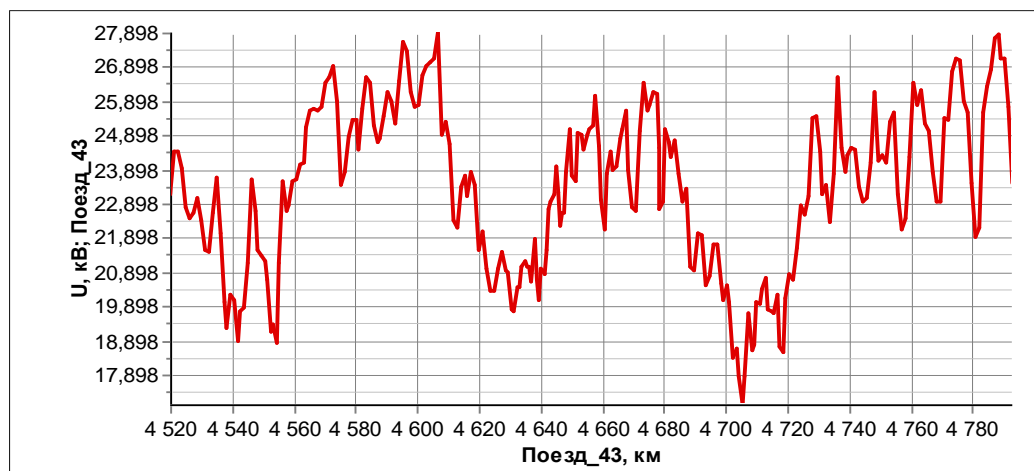


Рис. 2. График изменения напряжения четного поезда от координаты в ремонтном режиме 1
 Fig. 2. The graph of the voltage variation of the up train from the coordinate in repair mode 1

Таблица 1. Полученные данные при схеме без усиления в ремонтных режимах
Table 1. Obtained data for a diagram without reinforcement in repair modes

Ремонтный режим	Данные по нескольким поездам (в четном и нечетном направлениях)	Минимальное напряжение в контактной сети $U_{\min \text{ КС}}$, кВ	Максимальный ток в контактной сети $I_{\max \text{ КС}}$, А
1 (вывод воздушной линии ВРЗ – Нижнеудинск)	четное	19,343	795,35
	четное	17,034	870,56
	четное	16,611	877,6
	нечетное	17,93	390
	нечетное	18,556	456,6
2 (вывод воздушной линии НУД- ХЛ)	четное	17,652	876,31
	четное	17,415	838,86
	четное	17,679	851,95
	нечетное	17,361	796,11
	нечетное	18,474	785,38
3 (вывод воздушной линии ТШ – СЛ)	четное	18,323	735,58
	четное	16,058	780,56
	четное	15,650	777,74
	нечетное	16,730	360
	нечетное	17,756	413,26

Таким образом, видим, что при трех различных ремонтных режимах напряжение в контактной сети не соответствует минимально допустимому значению (в четном 15,65 кВ, в нечетном 16,73 кВ). Ток ВЛ превышает предельно допустимые значения. Качество электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности также не соответствует ГОСТ-32144-2013 и превышает нормально допустимое значение. Следовательно, для обеспечения требуемых параметров режима работы СЭС исследуемого участка в ремонтных режимах необходимо провести ее усиление.

Предложения по усилению системы электроснабжения

Для обеспечения стабильной работы СВЭ и СТЭ участка ТШ – ТЛ в ремонтных режимах проанализи-

зирован ряд способов усиления. Рассмотрим те из них, которые обеспечивают нормальный уровень напряжения в КС.

Способ усиления 1.

Включение трансформаторов в параллельную работу, увеличение мощности КУ и увеличение сопротивления УПК в ремонтных режимах.

Далее приведены результаты расчета основных параметров, учитываемых в ремонтных режимах на участке при данном варианте усиления (табл. 2–4), графически изображено сравнение напряжения ремонтных режимов до усиления и после для способа усиления 1 (рис. 3).

Способ усиления 2.

Установка автотрансформатора на РП НУД, включение тяговых трансформаторов на параллельную работу и увеличение сопротивления УПК в ремонтных режимах.

Таблица 2. Сравнение напряжения и тока контактной сети при различных ремонтных режимах (способ усиления 1)

Table 2. Comparison of voltage and current of the overhead contact system under various repair modes (reinforcement method 1)

Ремонтный режим	Данные по нескольким поездам (в четном и нечетном направлениях)	Минимальное напряжение в контактной сети $U_{\min \text{ КС}}$, кВ	Максимальный ток в контактной сети $I_{\max \text{ КС}}$, А
1	четное	21,35	637,4
	четное	21,18	634,24
	нечетное	21,09	349,52
	нечетное	21,25	346,7
2	четное	21,43	640,8
	четное	21,37	675,9
	нечетное	21,13	348,6
	нечетное	21,85	324,8
3	четное	21,69	639,54
	четное	21,08	643,96
	нечетное	21,23	344,01
	нечетное	22,55	338,8

Таблица 3. Сравнение тока воздушной линии при различных ремонтных режимах (способ усиления 1)
Table 3. Comparison of overhead line current under various repair modes (amplification method 1)

Ремонтный режим	Участок с максимальным током на воздушной линии	Максимальный ток воздушной линии $I_{\max\text{ВЛ}}$, А
1	ЗЗ – ВРЗ	468,5
2	НУД – РБ	522,2
3	ТШ – ОБЛ	562,2

Таблица 4. Коэффициенты загрузки трансформаторов при различных ремонтных режимах (способ усиления 1)
Table 4. Load factors of transformers under various repair modes (reinforcement method 1)

	Коэффициент загрузки		
	Ремонтный режим 1	Ремонтный режим 2	Ремонтный режим 3
Тайшет	0,65	0,64	0,61
Облепиха	0,55	0,55	0,49
Замзор	1,49	1,32	1,48
Ук	1,35	0,99	1,36
Нижеудинск	1,25	1,28	1,35
Худосланская	1,05	1,02	1,21
Будагово	0,81	0,78	0,81

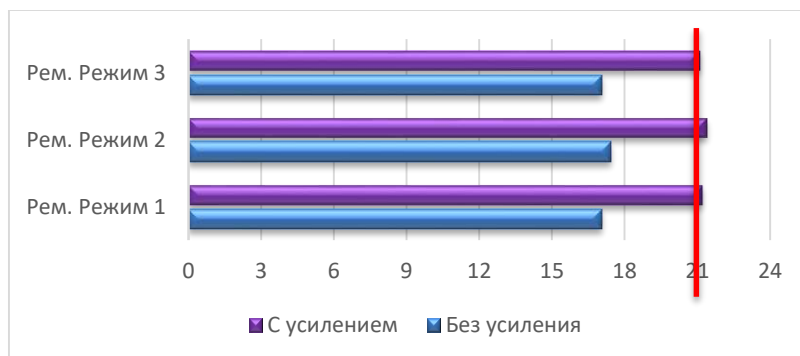


Рис. 3. Сравнение напряжения в ремонтных режимах (способ усиления 1)
Fig. 3. Comparison of voltage in repair modes (reinforcement method 1)

Приведены расчеты основных параметров, учитываемых в ремонтных режимах на участке при данном варианте усиления (табл. 5–7), графически

изображено сравнение напряжения ремонтных режимов до усиления и после для способа усиления 2 (рис. 4).

Таблица 5. Сравнение напряжения и тока контактной сети при различных ремонтных режимах (способ усиления 2)
Table 5. Comparison of voltage and current of the contact network under various repair modes (reinforcement method 2)

Table 5. Comparison of voltage and current of the contact network under various repair modes (reinforcement method 2)

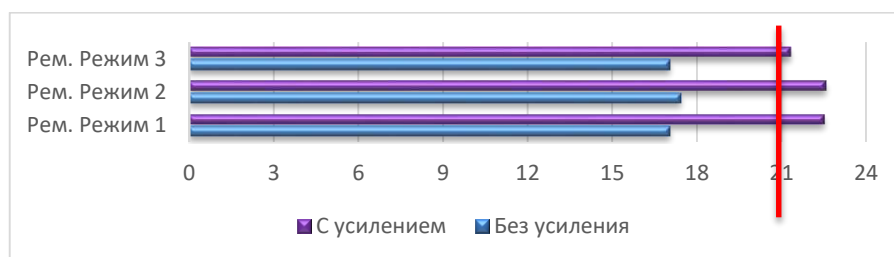
Ремонтный режим	Данные по нескольким поездам (в четном и нечетном направлении)	Минимальное напряжение в контактной сети $U_{\min\text{КС}}$, кВ	Максимальный ток в контактной сети $I_{\max\text{КС}}$, А
1	четное	22,51	608,48
	четное	22,5	616,16
	нечетное	22,52	328,53
	нечетное	22,61	339,26
2	четное	22,6	607,087
	четное	22,57	617,756
	нечетное	22,55	328,89
	нечетное	22,64	339,43
3	четное	21,97	685,9
	четное	21,32	646,56
	нечетное	22,01	328,58
	нечетное	22,21	339,142

Таблица 6. Сравнение тока воздушной линии при различных ремонтных режимах (способ усиления 2)**Table 6.** Comparison of overhead line current under various repair modes (reinforcement method 2)

Ремонтный режим	Участок с максимальным током на воздушной линии	Максимальный ток воздушной линии $I_{\max ВЛ}$, А
1	ЗЗ – ВРЗ	443,1
2	НУД – РБ	412,3
3	ТШ – ОБЛ	437,5

Таблица 7. Коэффициенты загрузки трансформаторов при различных ремонтных режимах (способ усиления 2)**Table 7.** Load factors of transformers under various repair modes (reinforcement method 2)

Коэффициент ТП загрузки	Ремонтный режим 1	Ремонтный режим 2	Ремонтный режим 3
Тайшет	0,65	0,67	0,71
Облепиха	0,54	0,54	0,64
Замзор	1,45	1,47	1,55
Ук	1,35	1,1	1,44
Нижеудинск	1,27	1,34	1,42
Худоеланская	0,96	0,95	1,09
Будагово	0,83	0,84	0,83

**Рис. 4.** Сравнение напряжения в ремонтных режимах (способ усиления 2)**Fig. 4.** Comparison of voltage in repair modes (reinforcement method 2)

Способ усиления 3.

Установка автотрансформатора на РП НУД, включение трансформаторов на параллельную работу и увеличение мощности КУ на ПС ХГ в ремонтных режимах.

Приведены расчеты основных параметров, учитываемых в ремонтных режимах на участке при данном варианте усиления (табл. 8–10), графически изображено сравнение напряжения ремонтных режимов до усиления и после для способа усиления 3 (рис. 5).

Заключение

Сравнительный анализ полученных результатов по способам усиления позволил сделать ряд выводов. При этом модель СЭС при оптимальном способе усиления отображена на (рис. 6).

При установке автотрансформатора и включении силовых трансформаторов на тяговых подстанциях в параллель уровень напряжения в КС почти во всех

режимах удалось увеличить до минимально допустимого, за исключением режима с выводом ВЛ ТШ – СЛ.

При установке автотрансформатора и включении КУ и УПК удалось добиться нужных результатов по напряжению в ремонтных режимах, однако ток ВЛ превышает допустимое значение.

Комбинация с установкой автотрансформатора, включением трансформаторов на параллельную работу и увеличением сопротивления УПК на первый взгляд идеально подходит как по качеству напряжения, так и по токам в КС и ВЛ. Однако, прежде чем окончательно выбрать этот вариант, необходимо рассмотреть ток на элементах УПК (в нормальном режиме максимальный ток на элементах УПК $I_{упк} = 1\ 755,5$ А, в ремонтных $I_{упк} = 1\ 930,4$ А; $I_{упк} = 1\ 912,2$ А; $I_{упк} = 1\ 948,6$ А). Оказалось, что ток на элементах УПК превышает предельно допустимое значение 1 600 А. Поэтому данный вариант не подходит в качестве оптимального способа усиления.

Таблица 8. Сравнение напряжения и тока контактной сети при различных ремонтных режимах (способ усиления 3)**Table 8.** Comparison of voltage and current of the overhead contact system under various repair modes (reinforcement method 3)

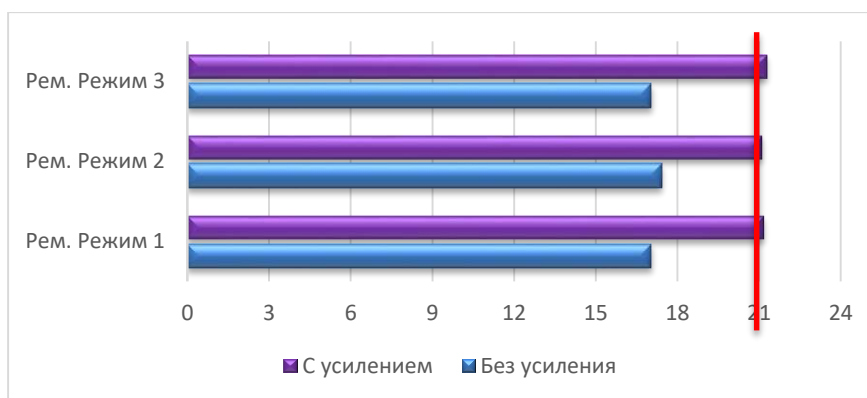
Ремонтный режим	Данные по нескольким поездам (в четном и нечетном направлении)	Минимальное напряжение в контактной сети $U_{\min \text{ КС}}$, кВ	Максимальный ток в контактной сети $I_{\max \text{ КС}}$, А
1	четное	21,98	635,91
	четное	21,14	657,32
	нечетное	21,38	340,75
	нечетное	22,21	339,34
2	четное	21,86	635,69
	четное	21,07	658,54
	нечетное	21,37	341,6
	нечетное	22,12	339,9
3	четное	21,26	645,7
	четное	21,12	670,6
	нечетное	21,16	344,75
	нечетное	21,14	341,4

Таблица 9. Сравнение тока воздушной линии при различных ремонтных режимах (способ усиления 3)**Table 9.** Comparison of overhead line current under various repair modes (reinforcement method 3)

Ремонтный режим	Участок с максимальным током на воздушной линии	Максимальный ток воздушной линии $I_{\max \text{ ВЛ}}$, А
1	ЗЗ – ВРЗ	441,2
2	НУД – РБ	421,4
3	ТШ – ОБЛ	451,2

Таблица 10. Коэффициенты загрузки трансформаторов при различных ремонтных режимах (способ усиления 3)**Table 10.** Load factors of transformers under various repair modes (reinforcement method 3)

Кoeffициент / ТПзагрузки	Ремонтный режим 1	Ремонтный режим 2	Ремонтный режим 3
Тайшет	0,91	0,71	0,77
Облепиха	0,84	0,58	0,84
Замзор	1,32	1,44	1,52
Ук	1,28	1,32	1,46
Нижеудинск	1,32	1,35	1,34
Худоеланская	0,98	0,96	1,12
Будагово	0,84	0,84	0,84

**Рис. 5.** Сравнение напряжения в ремонтных режимах (способ усиления 3)**Fig. 5.** Comparison of voltage in repair modes (reinforcement method 3)

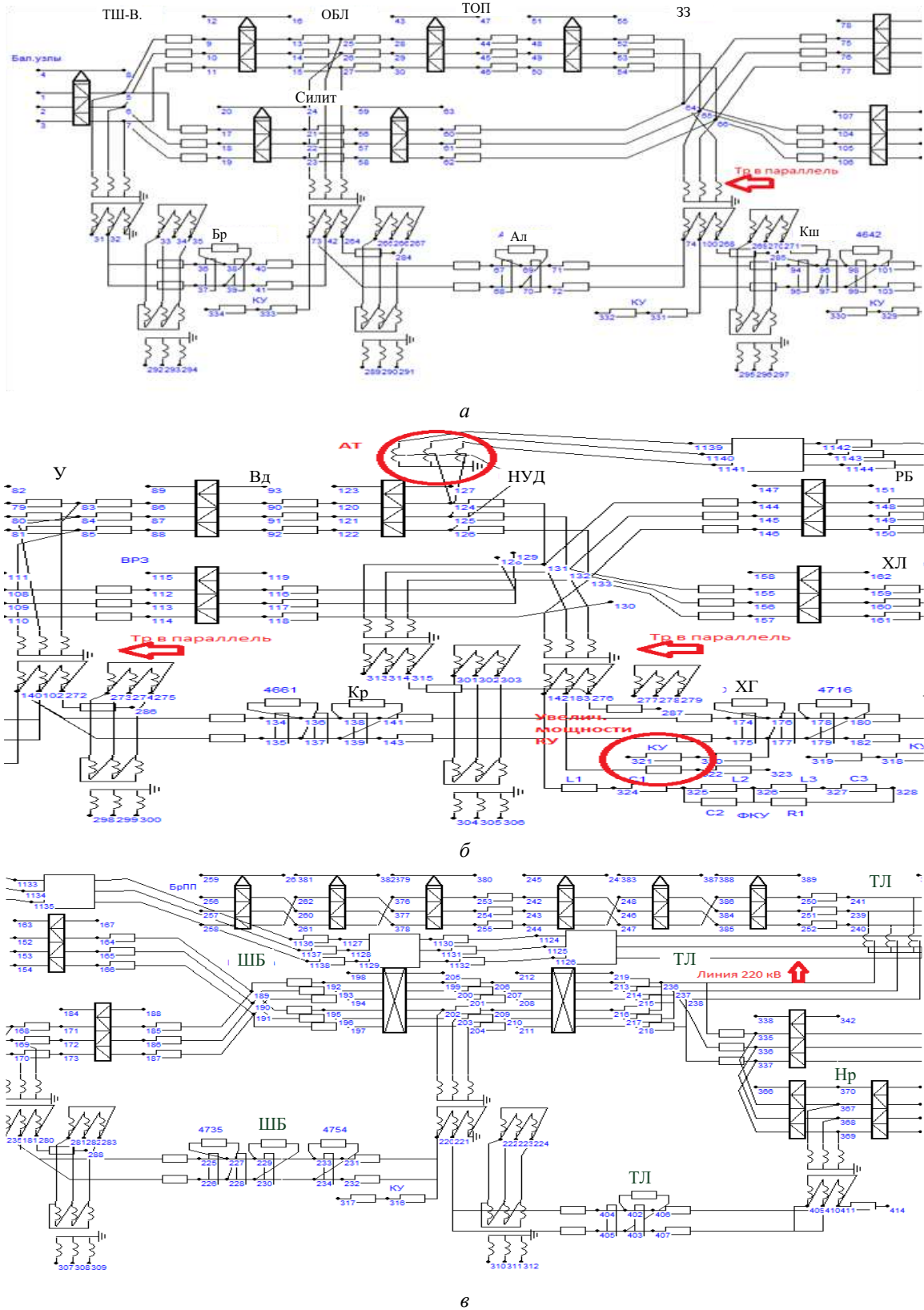


Рис. 6. Модель СЭС при оптимальном способе усиления участка ТШ – ТЛ: а – 1 участок; б – 2 участок; в – 3 участок
 Fig. 6. The model of a power supply system with the optimal method of strengthening the Tayshet - Tulun section: a – section 1; b – section 2; c – section 3

Из всех рассмотренных вариантов усиления наиболее оптимальным является комбинированный вариант усиления – установка автотрансформатора на РП Нижнеудинск, включение тяговых трансформаторов в параллель на ТП 33, УК и НУД и монтаж КУ на посту секционирования ХГ. Именно этот способ усиления позволяет достичь требуемых показа-

телей как в СВЭ, так и в СТЭ исследуемого участка. Вместе с тем окончательный выбор конкретных решений по усилению системы электроснабжения участка Тайшет – Тулун должен в настоящее время осуществляться в соответствии с требованиями системы энергетического менеджмента [20–23].

Список литературы

1. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Якурим-Звездная ВСЖД // Транспорт-2013 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-н/Д : Изд-во РГУПС, 2013. С. 176–178.
2. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро-Таксимо ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д, 2016. С. 306–310.
3. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // International Russian Automation Conference, RusAutoCon2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
4. Пузина Е.Ю. Оценка потенциала повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения Абаканской дистанции электроснабжения // Транспорт: наука, образование, производство : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д, 2017. С. 149–153.
5. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Ния-Киренга Восточно-Сибирской железной дороги // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте : материалы VI Междунар. симпозиума ELTRANS-2011. СПб., 2013. С. 464–468.
6. Туйгунова А.Г., Худоногов И.А., Пузина Е.Ю. О переводе питания СЦБ с 27,5 кВ на нетяговую обмотку на тяговой подстанции переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 4 (60). С. 93–98.
7. Физические основы проектирования электротяговых сетей высокоскоростных железнодорожных магистралей / А.Т. Бурков, В.В. Сероносков, Е.В. Кудряшов и др. // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 2 (57). С. 36–41.
8. Сравнительный анализ методов решения транспортных задач при оптимальном планировании перевозочного процесса / О.А. Лебедева, В.Е. Гозбенко, А.А. Пыхалов и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 3 (67). С. 134–139.
9. Крюков А.В., Куцкий А.П., Черепанов А.В. Улучшение качества электроэнергии в сетях 110–220 кВ, питающих тяговые подстанции // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017 : материалы VIII Междунар. науч.-технич. конф. Самара, 2017. С. 318–321.
10. Khudonogov I.A., Puzina E.Y., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer (2020) // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. Sochi, 2020. Ст. № 9112021. DOI:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.
11. Пузина Е.Ю., Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2020. 184 с.
12. Бурков А.Т., Мирсайтов М.М., Сероносков В.В. Анализ электропотребления при высокоскоростном движении электропоезда на заданном участке с различным количеством остановок // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2015. № 3 (59). С. 106–112.
13. Бурков А.Т., Мирсайтов М.М. Особенности методики определения электропотребления при выборе максимальной скорости пассажирских составов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщ. 2015. № 1 (42). С. 5–12.
14. Leibfried Thomas. Online Monitors Transformers in Service // IEEE Computer Applications in Power. 1998. № 7. Р. 36–42.
15. Григорьев Н.П., Трофимович П.Н. Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения устройствами продольной компенсации // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 2019. Т.62. № 3. С. 64–68.
16. Dang Y., Chen W. Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect // IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC / I&CPS Europe). Palermo, 2018. P. 1–4.
17. Xiaozhou Zhu, Minwu Chen, ShaofengXie and Jie Luo Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer // 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Birmingham, 2016. P. 111–115.
18. Пат. 2427484 Рос. Федерация, МПК В60М 3/02, Система электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ / Н.П. Григорьев, А.А. Крикун. № 2010119621/11 ; заявл. 17.05.2010 ; опубл. 27.08.2011, Бюл. №24. 10 с.
19. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Черепанов А.В. Оперативное определение запасов статической устойчивости в системах электроснабжения с установками распределенной генерации // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2021. Т. 25, № 1 (156). С. 31–43.
20. Бурков А.Т., Сероносков В.В., Степанская О.А. Маркетинг в электроэнергетике М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2014. 284 с.
21. Горбунова В.С., Пузина Е.Ю. Эффективность внедрения системы энергетического менеджмента в промышленных компаниях России // Транспортные системы и технологии. 2018. Т. 4. № 1. С. 119–137.
22. Коноплев Т.Ф. Методика оценки качества управления энергосбережением и повышением энергоэффективности предприятий газовой отрасли // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 161–172.

23. Сафаров Г.Г., Глинка Д.Ю. Управление энергетическими затратами промышленных предприятий как фактор повышения эффективности // Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке : сб. тр. III Нац. науч.-практ. конф. СПб, 2020. С. 220–225.

References

1. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Yakurim-Zvezdnaya VSZhD [Strengthening of the traction power supply system of the Yakurim-Zvezdnaya section of the VSZhD]. *Transport-2013: trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport-2013: proceedings of the international scientific and practical conference]*. Rostov-on-don: RSUPS Publ., 2013, Pp. 176–178.
2. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Churo-Taksimo VSZhD [Strengthening of the traction power supply system of the Churo-Taksimo section of the VSZhD]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport: science, education, production: proceedings of the International scientific and practical conference]*. Rostov-on-don: RSUPS Publ., 2016. Pp. 306–310.
3. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of traction power supply systems for heavy-tonnage trains operation. *International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018*. Pp. 850-1734.
4. Puzina E.Yu. Otsenka potentsiala povysheniya energoeffektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya Abakanskoj distantsii elektrosnabzheniya [Assessment of the potential for improving energy efficiency of the traction power supply system of the Abakan power supply distance]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport: science, education, production: collection of scientific papers of the International scientific and practical conference]*. Rostov-on-don: RSUPS Publ., 2017. Pp. 149–153.
5. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Niya-Kirenga Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi [Strengthening the systems of the traction power supply of the section of Nia-Kirenga VSZHD]. *Elektrifikatsiya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tyagi poezdov na zheleznodorozhnom transporte: materialy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma ELTRANS-2011 [Electrification and development of infrastructure for power supply of railway traction trains: Proceedings of the Sixth International Symposium ELTRANS-2011]*, 2013. Pp. 464–468.
6. Tuigunova A.G., Khudonogov I.A., Puzina E.Yu. O perevode pitaniya STsB s 27,5 kV na netyagovuyu obmotku na tyagovoi podstantsii peremennogo toka [On the transfer of the power supply of the SCB from 27.5 kV to a non-traction winding at an AC traction substation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technology. System analysis. Modeling]*, 2018. No. 4 (60). Pp. 93–98.
7. Burkov A.T., Seronosov V.V., Kudryashov E.V., Stepankaya O.A. Fizicheskie osnovy proektirovaniya elektrotyagovykh setei vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistrali [Physical foundations of design of the electric traction networks of high-speed rail lines]. *Transport Rossiiskoi Federatsii. [Transport of the Russian Federation]*, 2015. No. 2 (57). Pp. 36–41.
8. Lebedeva O.A., Gozbenko V.E., Pykhalov A.A., Mukhopad Yu.F. Sravnitel'nyi analiz metodov resheniya transportnykh zadach pri optimal'nom planirovanii perevoznogo protsessa [Comparative analysis of methods for solving transport problems with optimal planning of the transportation process]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2020. No. 3 (67). Pp. 134–139.
9. Kryukov A.V., Kutsiy A.P., Cherepanov A.V. Uluchshenie kachestva elektroenergii v setyakh 110–220 kV, pitayushchikh tyagovye podstantsii [Improving the quality of electricity in 110–220 kV networks feeding traction substations]. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2017. Materialy VIII Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. [Electric power industry through the eyes of youth-2017: Materials of the VIII International scientific and technical conference]*, 2017. Pp. 318–321.
10. Khudonogov I.A., Puzina E.Y., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer. *Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020*, art. No. 9112021.
11. Puzina E.Yu., Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Sistemy monitoringa silovykh transformatorov tyagovykh podstantsii [Monitoring systems for power transformers of traction substations]. Irkutsk, 2020. 184 p.
12. Burkov A.T., Mirsaitov M.M., Seronosov V.V. Analiz elektropotrebleniya pri vysokoskorostnom dvizhenii elektropoezda na zadannom uchastke s razlichnym kolichestvom ostanovok [Power consumption analysis at high speed movement of electric trains on a given site with different number of stops]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2015. No. 3 (59). Pp. 106–112.
13. Burkov A.T., Mirsaitov M.M. Osobennosti metodiki opredeleniya elektropotrebleniya pri vybore maksimal'noi skorosti passazhirskikh sostavov [Features of the methodology for determining power consumption when choosing the maximum speed of passenger trains]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2015. No. 1 (42). Pp. 5–12.
14. Leibfried Thomas. Online Monitors Transformers in Service. *IEEE Computer Applications in Power*, July 1998. Pp. 36–42.
15. Grigor'ev N.P., Trofimovich P.N. Povyshenie effektivnosti raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya ustroystvami prodol'noi kompensatsii [Improving the efficiency of the traction power supply system with longitudinal compensation devices]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika [News of higher educational institutions. Electromechanics]*, 2019. Vol. 62. No. 3. Pp. 64–68.
16. Dang Y., Chen W. Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect, *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Palermo, 2018. Pp. 1–4.
17. Xiaozhou Zhu, Minwu Chen, ShaofengXie and Jie Luo Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer, *2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*,

Birmingham, 2016. Pp. 111–115.

18. Grigoriev N.P., Krikun A.A. *Sistema elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka 25 kV* [Power supply system of electrified Railways AC 25 kV]. Patent for invention RU 2427484 C1, 27.08.2011. Application no. 2010119621/11 dated May 17, 2010.

19. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V. Operativnoe opredelenie zapasov staticheskoi ustoychivosti v sistemakh elektrosnabzheniya s ustanovkami raspredelennoi generatsii [Operational determination of static stability reserves in power supply systems with distributed generation installations]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2021. Vol. 25 No. 1 (156). Pp. 31–43.

20. Burkov A.T., Seronov V.V., Stepanskaya O.A. Marketing v elektroenergetike [Power engineering marketing]. *Transportnye sredstva. Sistemy obespecheniya dvizheniya poezdov* [Vehicles. Train traffic support systems]. Moscow, 2014. 284 p.

21. Gorbunova V.S., Puzina E.Yu. Effektivnost' vnedreniya sistemy energeticheskogo menedzhmenta v promyshlennykh kompaniyakh Rossii [Efficiency of energy management system implementation in industrial companies of Russia]. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transportation systems and technology], 2018. Vol. 4. No. 1. Pp. 119–137.

22. Konoplev T.F. Metodika otsenki kachestva upravleniya energosberezheniem i povysheniem energoeffektivnosti predpriyatii gazovoi otrasli [The methodology of assessing the quality of energy saving management and energy efficiency improvement of gas industry enterprises]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [The bulletin of civil engineers], 2020. No. 5 (82). Pp. 161–172.

23. Safarov G.G., Glinka D.Yu. Upravlenie energeticheskimi zatratami promyshlennykh predpriyatii kak faktor povysheniya effektivnosti [Management of energy costs of industrial enterprises as a factor in increasing efficiency]. *Innovatsionnye podkhody razvitiya ekonomiki i upravleniya v XXI veke. Sbornik trudov III Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Federal'noe agentstvo zheleznodorozhnogo transporta* [Innovative approaches to economic development and management in the XXI century. Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference. Federal Agency for Railway Transport]. St. Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, 2020. Pp. 220–225.

Информация об авторах

Пузина Елена Юрьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения; доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: lena-rus05@mail.ru.

Худоногов Игорь Анатольевич – д-р техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: hudonogovi@mail.ru

Information about the authors

Elena Yu. Puzina – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. of the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University; Assoc. Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: lena-rus05@mail.ru

Igor' A. Khudonogov – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Hudonogovi@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).234-241

УДК 656.222.4

Процедура эффективной организации работы автоматизированной системы прогрева тягового электрооборудования электровоза

Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич✉, **Ю. И. Белоголов**

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ olencevich_va@mail.ru

Резюме

При разработке методики расчёта надёжности электрической машины одним из основных этапов является разработка математической модели, в которой возможен учет факторов, воздействие которых непосредственно отражается на техническом состоянии и уровне безопасности эксплуатации. В настоящее время в различных областях науки и техники существует достаточно большое количество методов прогнозирования показателей надёжности, отличающихся совокупностью решаемых задач и особенностями применяемого математического аппарата. Учет возмущающих воздействий при реализации технологического процесса возможен при условии использования средств автоматизации. Выполненный авторами факторный анализ статистических данных по отказам тяговых электродвигателей позволил обосновать целесообразность организации процедуры прогрева. Наибольший процент технических отказов электрической части приходится на осенне – зимне – весенний периоды. Выявленная динамика распределения отказов в определенной степени обусловлена непосредственным увлажнением изоляции и снижением ее диэлектрической прочности, что вызвано резким перепадом внешних и внутренних температурных режимов при постановке локомотива в депо. Выявлено, что именно данный фактор способствует появлению конденсата на изоляции, ее дальнейшему разрушению. Параметры окружающей среды являются основным фактором, который оказывает влияние на эксплуатационную надёжность электрических машин, что подчеркивает актуальность представленной к рассмотрению статьи. Предложенное в статье техническое решение по прогреву тягового электрооборудования ориентировано на целочисленное уменьшение количества технических отказов электрической части рассматриваемых электродвигателей. С целью учета параметров окружающего воздуха в представленной математической модели использован многопозиционный ключ МК2, с помощью которого

реализовано переключение на различные уровни не только положительной, но и отрицательной температуры. Данный контур использован для оценки адекватности представленной модели реальным физическим процессам.

Ключевые слова

автоматизированная система прогрева, тяговый подвижной состав, процедура организации работы, алгоритм управления, мотор-вентиляторы, верхние слои изоляции, параметры окружающей среды, повышение эксплуатационной надежности

Для цитирования

Асташков Н. П. Процедура эффективной организации работы автоматизированной системы прогрева тягового электрооборудования электровоза / Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич, Ю. И. Белоголов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 234–241. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).234-241

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.01.2021, поступила после рецензирования: 28.01.2021, принята к публикации: 05.02.2021

The procedure of effective organization of the work of the automated warm-up system of the electric locomotive traction equipment

N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich✉, Yu. I. Belogolov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ olentsevich_va@mail.ru

Abstract

During the development of the method of calculating the electric machine reliability, one of the main stages is the development of a mathematical model, in which it is possible to take into account factors whose impact directly affects the technical condition and operation safety level. At present, there is a fairly large number of methods of predicting reliability indicators in various fields of science and technology, which are distinguished by the totality of current problems and the specific aspects of the mathematical tools applied. It is possible to take consideration of the disturbing impacts during the implementation of the technological process if automation tools are used. The factor analysis of statistic data on the failure of traction electric motors made it possible to substantiate the feasibility of the warm-up procedure. The largest percentage of technical failures of the electric part corresponds to the autumn - winter - spring periods. The detected failure distribution dynamics results from the direct hydration of the insulation and the decrease in its dielectric strength, which is caused by a sharp change in the external and internal temperature regimes when the locomotive is put in the depot. It has been revealed that this factor contributes to the condensation that appears on the insulation and its further destruction. Environmental parameters are the main factor that influences the operational reliability of electrical machines, which emphasizes the relevance of the article presented for consideration. The article proposes a technical solution on the warm-up of traction electrical equipment that is focused on the integer reduction of technical failures of the electric part of the considered electric motors. In order to take into account the ambient air parameters in the presented mathematical model, a multipositional key MK2 is used, with the help of which it was possible to implement the switch of not only positive, but also negative temperature to different levels. This circuit is used to evaluate the adequacy of the presented model to real physical processes.

Keywords

automated warm-up system, traction rolling stock, work organization procedure, control algorithm, motor fans, upper layers of insulation, environmental parameters, increased operational reliability

For citation

Astashkov N. P., Olentsevich V. A., Belogolov Yu. I. Protsejura effektivnoy organizatsii raboty avtomatizirovannoy sistemy progrevya tyagovogo elektrooborudovaniya elektrovoza [The procedure of effective organization of the work of the automated warm-up system of the electric locomotive traction equipment]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 234–241. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).234-241

Article Info

Received: 17.01.2021, Revised: 28.01.2021, Accepted: 05.02.2021

Введение

В целях поддержания требуемого уровня сопротивления изоляции тяговых двигателей (ТЭД), предупреждения выделения влаги и образования инея на коллекторах, щеточных аппаратах, электровозов, прибывших в депо и при их выдаче в работу, осуществляется обдув путем включения мотор-вентиляторов для выравнивания температуры яко-

рей и окружающего воздуха. Представленная технология позволяет удалить влагу только с верхних слоев изоляции, что является основополагающим фактором низкой эффективности данного метода.

В период сложных погодных-климатических условий (метель и снегопад) с целью предупреждения попадания снега в ТЭД и другое электрическое обо-

рудование электровозов реализуются следующие мероприятия:

- устанавливаются фильтр-круги на всасывающие отверстия раструбов вентиляторов электровозов с соответствующей записью в журнал установленной формы;
- производится включение мотор-вентиляторов;
- расправляются шторы в форкамерах.

При температуре наружного воздуха ниже -8°C каждое открывание ворот локомотивного депо должно сопровождаться включением воздушных тепловых завес. Закрепление подвижного состава на ремонтных позициях деповского отстоя производится тормозными башмаками, с применением тормозных средств локомотива в соответствии с имеющейся инструкцией.

Проблемы эксплуатационной надежности тяговых электрических машин электровоза

Проблемы надежности электрических машин условно подразделяются на конструкционную, технологическую и эксплуатационную [1-3].

Конструкционная надежность любой электрической машины в целом зависит от применяемых в ней активных и конструктивных материалов, качества изготовления ее основных частей и деталей.

Параметры окружающей среды являются основным фактором, который оказывает влияние на эксплуатационную надежность электрических машин, что подчеркивает актуальность представленной к рассмотрению статьи.

Повышение эксплуатационной надежности электрических машин – проблема многогранная и требует комплексного решения, которое реализуется в следующих направлениях:

- совершенствование конструкции электрических машин;
- модернизация действующих электрических машин;
- совершенствование устройств защиты в аварийных режимах;
- использование современных средств, методов и оборудования для реализации планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания.

На основе выполненного анализа статистических данных по отказам ТЭД выявлено, что большая их часть приходится на осенне – зимне – весенний периоды времени (рис. 1).

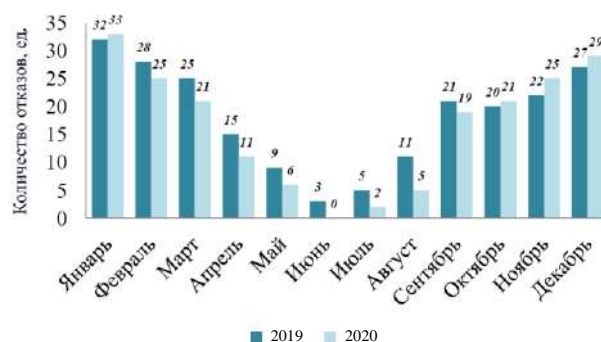


Рис. 1. Отказы тяговых электродвигателей за 2019 – 2020 года

Fig. 1. Failures of traction electric engines for 2019 – 2020

Данная особенность распределения отказов в определенной степени обусловлена непосредственным увлажнением изоляции и снижением ее диэлек-



Рис. 2. Причины отказов ТЭД
Fig. 2. Reasons for traction electric engine failures

трической прочности [4, 7]. Такой процесс можно связать с резким перепадом температур при постановке локомотива в депо, что непосредственно приводит к появлению конденсата на изоляции, ее дальнейшему разрушению. Предложенное мероприятие по прогреву тягового электрооборудования ориентировано на целочисленное уменьшение отказов электрической части рассматриваемых электродвигателей.

Согласно представленным статистическим данным следует, что большую долю составляют отказы электрической части рассматриваемых электрических машин (рис. 2).

Алгоритм управления автоматизированной системы прогрева тягового электрооборудования электровоза

Учет достоинств и недостатков существующих методов восстановления изоляции ТЭД позволил обосновать структуру предложенной технологии прогрева [12-14]. Реализация пуска мотор-вентиляторов электровоза на пониженной частоте вращения возможна с помощью полупроводникового преобразова-

теля частоты [8-11], что реализовано в математической модели с помощью многопозиционного ключа МК1 (рис. 3). Следует отметить, что работа электродвигателей охлаждения на максимальной частоте вращения возможна с учетом штатной схемы. Данное решение благоприятно отразится не только на массогабаритных размерах предложенной системы при ее практической реализации, но и технико-экономическом обосновании [5, 6, 15].

Задание предложенной величины тока тягового электрооборудования позволит реализовать вытеснение влаги из внутренних слоев изоляции наружу. Контроль температурного режима осуществляется с помощью датчика температуры Dt, сигнал которого реализует переключение мотор-вентиляторов на максимальную частоту вращения с целью беспрепятственного удаления влаги с поверхности изоляционных материалов в течение 10 минут (рис. 4, 5, 6). Окончание вышеизложенного алгоритма работы с учетом параметров окружающей среды позволит задать необходимую величину тока для благоприятного поддержания температуры ТЭД для постановки локомотива на ремонтные позиции (табл. 1).

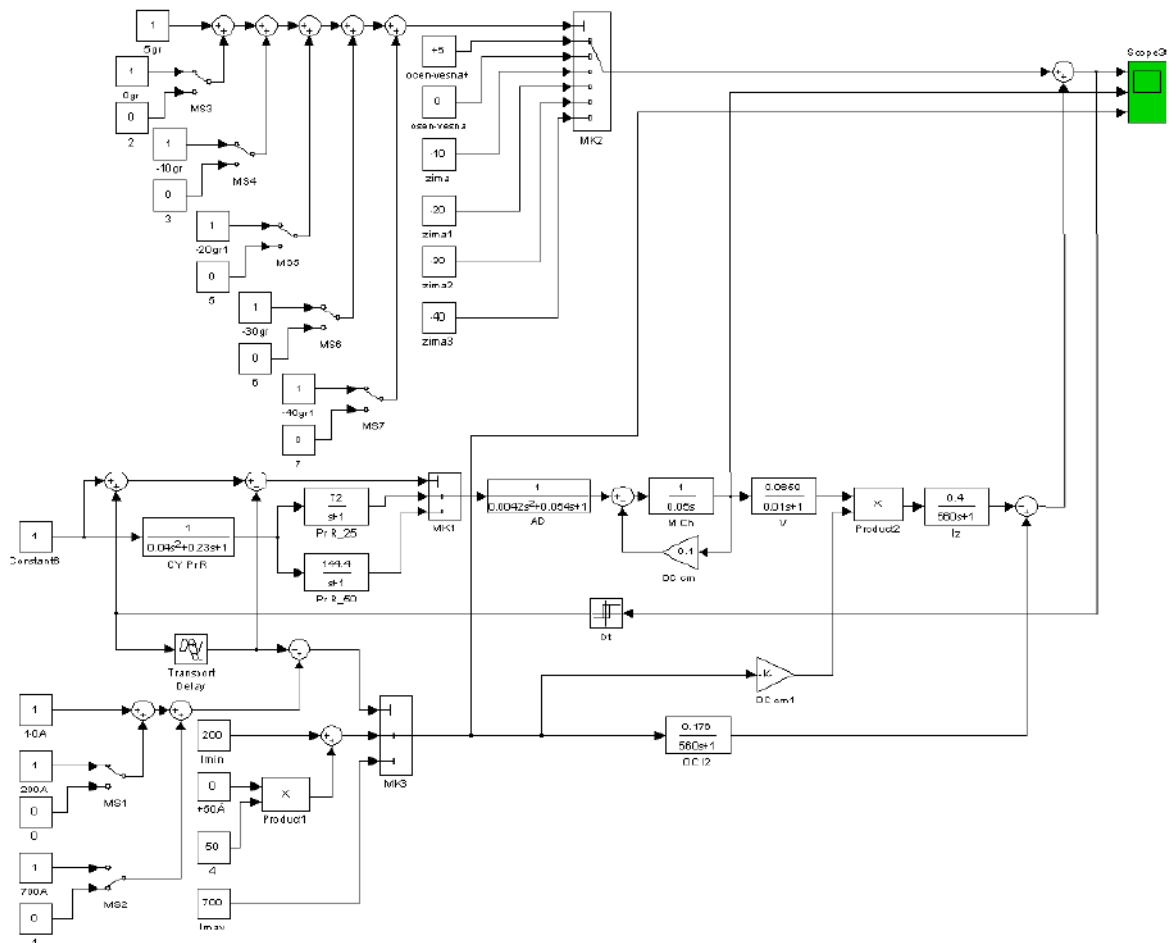


Рис. 3. Математическая модель предложенной автоматизированной системы прогрева

Fig. 3. Mathematical model of the proposed automated heating system

Таблица 1. Рекомендуемые значения тока с учетом параметров окружающей среды
Table 1. Recommended current values based on environmental parameters

$t_{\text{окр. возд.}}$, °C	5	0	-10	-20	-30	-40
$I_{\text{гз}}$, А	200	200	250	300	350	400

С целью учета параметров окружающего воздуха в представленной математической модели использо-

ван многопозиционный ключ МК2, с помощью которого реализовано переключение на различные уровни не только положительной, но и отрицательной температуры. Данный контур использован для оценки адекватности представленной модели реальным физическим процессам.

Аналогичным образом представлен контур моделирования величины тока в тяговом электрооборудовании с использованием МК3 (рис. 3).

Переходные процессы для различных параметров окружающего воздуха представлены на рисунках 4-6.

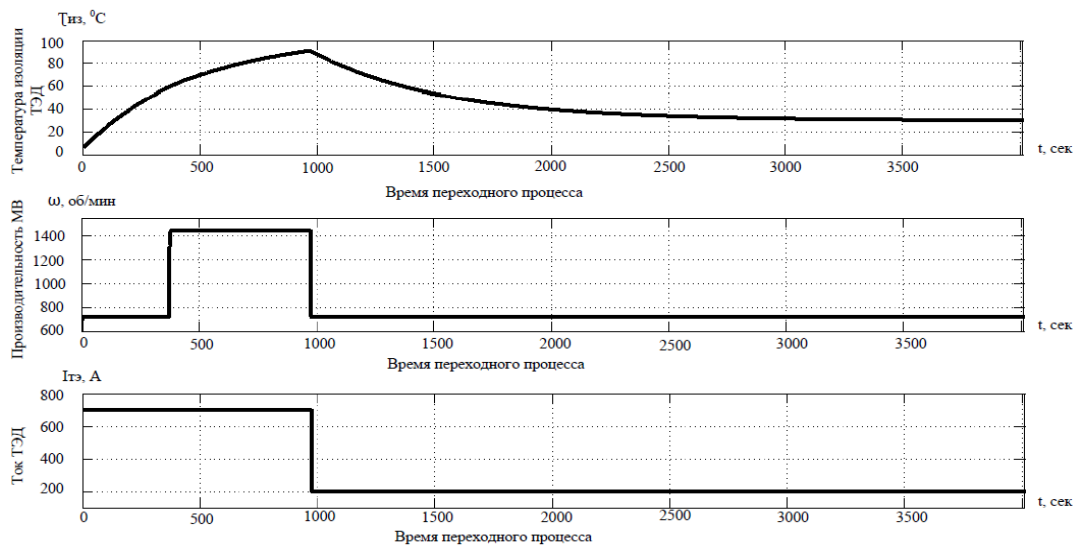


Рис. 4. Переходные процессы прогрева при температуре окружающего воздуха 5°C
Fig. 4. Transitional processes of warming at ambient air temperature of 5 degrees Celsius

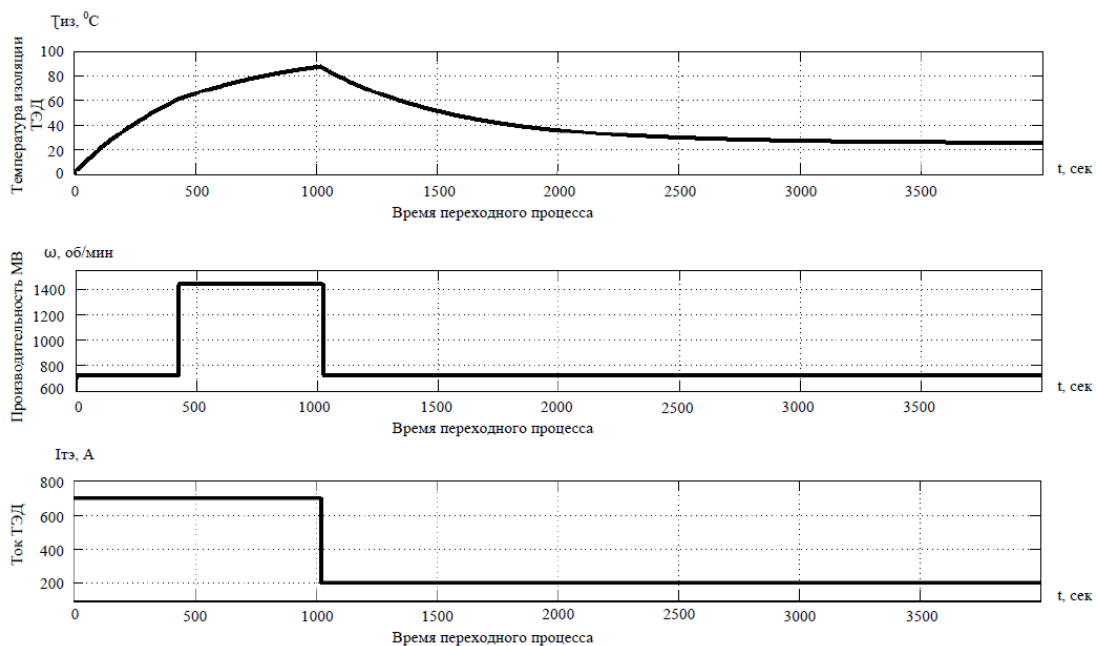


Рис. 5. Переходные процессы прогрева при температуре окружающего воздуха 0°C
Fig. 5. Transitional processes of warming at ambient air temperature of 0 degrees Celsius

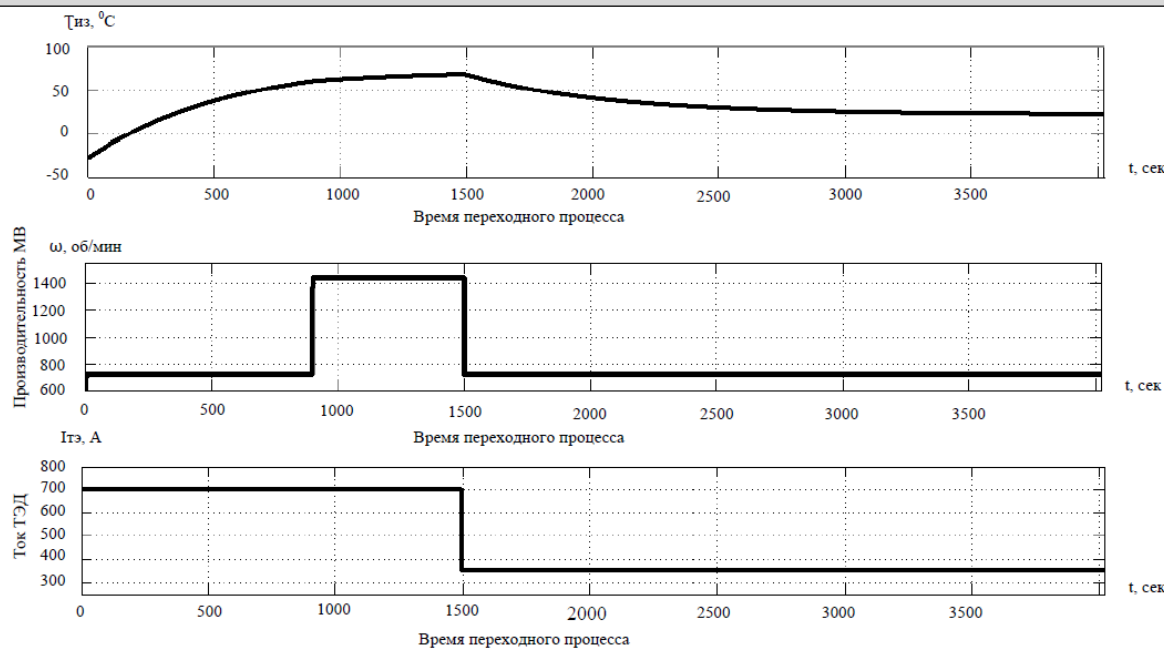


Рис. 6. Переходные процессы прогрева при температуре окружающего воздуха -30°C
Fig. 6. Transitional processes of warming at ambient air temperature of -30 degrees Celsius

Вывод

С целью практической реализации предложенной автоматизированной системы необходимо выполнить акцент на серию электровоза и назначение машин охлаждения. Руководствуясь разработанной математической моделью необходимо выполнить обоснование практического использования допол-

нительного оборудования, учитывая массогабаритные и технико-экономические аспекты. Основным преимуществом внедрения данной системы является не только сокращение времени прогрева, но и повышение надежности ТЭД, ремонт которых является трудоемким и экономически затратным [16-19].

Список литературы

1. Гольберг О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения. – М.: Энергия, 1976.
2. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. – Л.: Энергия, 1976.
3. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высшая школа, 1988.
4. Маслов В.В. Влагостойкость электрической изоляции. – М.: Энергия, 1973 – 208 с.
5. Olentsevich V.A., Belogolov Y.I., Kramynina G.N. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. "International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019" 2020. С. 012038.
6. Olentsevich, V.A., Belogolov, Y.I., Grigoryeva, N.N. Analysis of reliability and sustainability of organizational and technical systems of railway transportation process // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 832(1), 012061
7. Страшинин Э.П. Увлажнение изоляции тяговых двигателей в зимних условиях. Свердловск: УПИ, 1958. - 37с.
8. Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Astashkov N.P., Martusov A.L., Alekseev M.E. PARALLEL OPERATION OF AN INVERTER WITH AN ELECTRICAL AC NETWORK В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012003.
9. Ryabchenok N., Alekseeva T., Astrakhancev L., Astashkov N., Tikhomirov V. ENERGY-SAVING DRIVING OF HEAVY TRAINS Advances in Intelligent Systems and Computing (см. в книгах). 2020. Т. 982. С. 491-508.
10. Астраханцев Л.А., Астраханцева Н.М., Асташков Н.П. Разработка ресурсосберегающих электрифицированных технологических процессов // Вестник КрасГАУ. 2012. № 8 (71). С. 166-169.
11. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Фуфачева М.В. Развитие методов этапного овладения перевозками на двухпутных линиях при обращении длиннооставных грузовых поездов // Магнитогорск, 2012
12. Тихомиров В.А. Ресурсосберегающее управление мощностью электросушильных печей в технологических процессах сушки изоляции электрических машин подвижного состава // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 1. С. 318-321.
13. M V Konstantinova, A A Olentsevich, V Yu Konyukhov, E A Guseva and V A Olentsevich Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, 1064 (2021) 012020

14. Гозбенко В.Е., Иванков А.Н., Колесник М.Н., Пашкова А.С. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажиро- и грузопотоков // Депонированная рукопись № 330-V2008 17.04.2008
15. Белоголов Ю.И., Стецова Ю.М., Оленцевич А.А. Использование методов математического моделирования при управлении транспортными процессами на железной дороге // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2018. Т. 1. С. 145-148.
16. Grigoriev N.P., Klykov M.S., Trofimovich P.N., Tikhomirov V.A. Reduction of electrical energy losses of power transformers of 25 kv traction substations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012060
17. Оленцевич В.А., Асташков Н.П. Анализ рабочих режимов системы тягового электроснабжения при использовании интеллектуальной системы автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2020. Т. 4. № 2. С. 66-73.
18. Волчек Т.В., Асташков Н.П. Повышение надёжности фазорасщепителей электровозов переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 2. С. 456-461.
19. Патент на изобретение RU 2553978 С2, 20.06.2015. Заявка № 2013147972/07 от 28.10.2013. Установка для сушки изоляции обмотки тяговых электрических машин Кочетков А.В., Худоногов А.М., Асташков Н.П., Шрамко С.Г.

References

1. Gol'berg O.D. Nadezhnost' elektricheskikh mashin obshchepromyshlennogo i bytovogo naznacheniya [Reliability of electric machines of industrial and domestic use]. Moscow: Energiya Publ., 1976.
2. Ermolin N.P., Zherikhin I.P. Nadezhnost' elektricheskikh mashin [Reliability of electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1976.
3. Kotelenets N.F., Kuznetsov N.L. Ispytaniya i nadezhnost' elektricheskikh mashin [Tests and reliability of electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1988.
4. Maslov V.V. Vlagostoikost' elektricheskoi izolyatsii [The moisture resistance of electrical insulation]. Moscow: Energiya Publ., 1973. 208 p.
5. Olentsevich V.A., Belogolov Yu.I., Kramynina G.N. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. "International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019" 2020. Pp. 012038.
6. Olentsevich V.A., Belogolov Yu.I., Grigoryeva N.N. Analysis of reliability and sustainability of organizational and technical systems of railway transportation process. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 832(1), 012061
7. Strashinin E.P. Uvlazhnenie izolyatsii tyagovykh dvigatelei v zimnikh usloviyakh [Moisturization of the insulation of traction engines in winter conditions]. Sverdlovsk: UPI Publ., 1958. 37 p.
8. Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Astashkov N.P., Martusov A.L., Alekseev M.E. Parallel operation of an inverter with an electrical AC network. In the coll.: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. Pp. 012003.
9. Ryabchenok N., Alekseeva T., Astrakhantsev L., Astashkov N., Tikhomirov V. Energy-saving driving of heavy trains. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020. Vol. 982. Pp. 491-508.
10. Astrakhantsev L.A., Astrakhantseva N.M., Astashkov N.P. Razrabotka resursoberegayushchikh elektrifitsirovannykh tekhnologicheskikh protsessov [Development of resource-saving electrified processes]. Vestnik KrasGAU [The Bulletin of KrasGAU], 2012. No. 8 (71). Pp. 166-169.
11. Ivankova L.N., Ivankov A.N., Fufacheva M.V. Razvitie metodov etapnogo ovladeniya perevozkami na dvukhputnykh liniyakh pri obrashchenii dlinnosostavnykh gruzovykh poezdov [Development of methods for the stage-by-stage acquisition of transportation on double-track lines during the circulation of long-haul freight trains]. Magnitogorsk, 2012.
12. Tikhomirov V.A. Resursoberegayushchee upravlenie moshchnost'yu elektrosushil'nykh pechei v tekhnologicheskikh protsessakh sushki izolyatsii elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava [Resource-saving management of power of electric drying furnaces in the process of drying the insulation of electric machines of rolling stock]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka [Scientific problems of transport of Siberia and the Far East], 2012. No. 1. Pp. 318-321.
13. Konstantinova M.V., Olentsevich A. A., Konyukhov V.Yu., Guseva E. A. and Olentsevich V.A. Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, 1064 (2021) 012020
14. Gozbenko V.E., Ivankov A.N., Kolesnik M.N., Pashkova A.S. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoi seti s uchetom moshchnosti passazhiro- i gruzopotokov. Deponirovannaya rukopis' No. 330-V2008 17.04.2008 [Methods of forecasting and optimizing the transport network, taking into account the capacity of passenger and cargo flows. Deposited manuscript No. 330-V2008 04.17.2008].
15. Belogolov Yu.I., Stetsova Yu.M., Olentsevich A.A. Ispol'zovanie metodov matematicheskogo modelirovaniya pri upravlenii transportnymi protsessami na zheleznoi doroge [Using mathematical modeling techniques in the management of railway transport processes]. Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region], 2018. Vol. 1. Pp. 145-148.
16. Grigoriev N.P., Klykov M.S., Trofimovich P.N., Tikhomirov V.A. Reduction of electrical energy losses of power transformers of 25 kV traction substations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, 2020. Pp. 012060

17. Olentsevich V.A., Astashkov N.P. Analiz rabochikh rezhimov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya pri ispol'zovanii intellektual'noi sistemy avtomatizirovannogo vozhdeniya poezdov povyshennoi massy i dliny [Analysis of the working modes of the traction electric supply system using the intelligent system of automated driving of heavy-weight and long-length trains]. *Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy i tekhnologii* [High-performance computing systems and technologies], 2020. Vol. 4. No. 2. Pp. 66-73.

18. Volchek T.V., Astashkov N.P. Povyshenie nadezhnosti fazorasshchepitelei elektrovozov peremennogo toka [Increased reliability of phase splitters of AC electric locomotives]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2017. Vol. 2. Pp. 456-461.

19. Kochetkov A.V., Khudonogov A.M., Astashkov N.P., Shramko S.G. Ustanovka dlya sushki izolyatsii obmotki tyagovykh elektricheskikh mashin [Installation for drying the winding of traction electric machines]. Patent for invention RU 2553978 C2, 20.06.2015. Application No. 2013147972/07 dated October 28, 2013.

Информация об авторах

Асташков Николай Павлович – к. т. н., доцент; кафедры управление эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astashkovnp@yandex.ru

Оленцевич Виктория Александровна – к. т. н., доцент; доцент кафедры управление эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olencevich_va@irgups.ru

Белоголов Юрий Игоревич – к. т. н., доцент; доцент кафедры управление эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pr-mech@mail.ru

Information about the authors

Nikolai P. Astashkov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor; Associate Professor of the Subdepartment of Operations Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astashkovnp@yandex.ru

Victoria A. Olentsevich – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor; Associate Professor of the Subdepartment of Operations Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olencevich_va@irgups.ru

Yuriy I. Belogolov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor; Associate Professor of the Subdepartment of Operations Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pr-mech@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).241-247

УДК 656.222.4

Оценка качественных и количественных характеристик системы «локомотив – вагон – путь» с использованием математической модели для определения вероятности схода вагонов

В. Н. Железняк, Л. В. Мартыненко ✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ liuba.martinenko@yandex.ru

Резюме

В статье рассмотрены меры, направленные на повышение безопасности движения подвижного состава за счет рационального использования информации, полученной с комплекса ходовых (поездных) экспериментальных лабораторий Восточно-Сибирской железной дороги: тягово-энергетической, путеизмерительной, тормозо-испытательной. Каждый из названных источников позволяет получить реальную и достоверную на данный момент информацию о состоянии технических систем подвижного состава и пути. Для упрощения поиска неисправностей, которые могут инициировать сход, предлагается в созданной логической взаимосвязи системы «локомотив – вагон – путь» разделить ее условно на отдельные три части для выявления нарушений при эксплуатации, которые могут быть причастны к сходу. Обнаруженные отклонения параметров транспортной системы анализируют и устанавливают причастность определенного объекта к конкретному сходу. В данном анализе обязательно наличие перечня возможных неисправностей (выделено по шесть неисправностей), которые позволяют оценить техническое состояние и степень участия в сходе. Количественные и качественные характеристики системы «локомотив – вагон – путь» были сняты с каждого участка схода и занесены как отдельные параметры в таблицу, по которым с использованием математической модели просчитывали относительную меру участия в сходе. Прежде всего, выделенные значимые дефекты характеризовали отклонениями от нормативных, которые могли быть относительными и абсолютными отклонениями. Полученные расчетные параметры представили в графическом виде как зависимость относительной меры при участии в сходе от количества рассматриваемых параметров (неисправностей).

Ключевые слова

система «локомотив – вагон – путь», сход вагонов, безопасность движения, параметры транспортной системы, количественные и качественные характеристики, математическая модель для определения вероятности схода вагонов

Для цитирования

Железняк В. Н. Оценка качественных и количественных характеристик системы «локомотив – вагон – путь» с использованием математической модели для определения вероятности схода вагонов / В. Н. Железняк, Л. В. Мартыненко // Со-

временные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 241–247. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).241-247

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.08.2020, поступила после рецензирования: 22.11.2020, принята к публикации: 05.12.2020

Evaluation of qualitative and quantitative characteristics of the “locomotive – railcar – track” system using a mathematical model to determine the derailment probability

V. N. Zheleznyak, L. V. Martynenko ✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ liuba.martinenko@yandex.ru

Abstract

The article considers measures aimed at improving the safety of rolling stock movement through the rational use of information obtained from the complex of traveling (train) experimental laboratories of the East-Siberian railway: traction and power; track measuring; brake testing; "wheel set and axle box". Each of these laboratories allows you to get real and reliable, for the present, information about the state of rolling stock and track technical systems. In order to simplify the search for faults that may trigger a derailment, it is proposed to divide the system into three separate parts in the created logical relationship of the "locomotive–railcar–track" system in order to identify violations during operation that may be involved in the derailment. Detected deviations of the transport system parameters are analyzed, determining the involvement of a particular object in a particular derailment. In this analysis, one must have a list of possible defects (six faults are highlighted), which make it possible to assess their technical condition and the degree of involvement in the derailment. Quantitative and qualitative characteristics of the "locomotive–railcar–track" system were taken from each section of the derailment and added to in the table as separate parameters, according to which the relative measure of involvement in the derailment was calculated using a mathematical model. First of all, the identified significant defects were characterized by deviations from the standard ones, which could be relative or absolute deviations. The obtained calculated parameters were graphically presented as the dependence of the relative measure of involvement in the derailment on the number of parameters (defects) under consideration.

Keywords

“locomotive – railcar – track” system, derailment, traffic safety, transportation system parameters, quantitative and qualitative characteristics, mathematical model for determining the probability of railcar derailment

For citation

Zheleznyak V. N., Martynenko L. V. Otsenka kachestvennykh i kolichestvennykh kharakteristik sistemy «lokomotiv – vagon – put'» s ispol'zovaniem matematicheskoi modeli dlya opredeleniya veroyatnosti skhoda vagonov [Evaluation of qualitative and quantitative characteristics of the “locomotive – railcar – track” system using a mathematical model to determine the derailment probability]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 241–247. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).241-247

Article Info

Received: 15.08.2020, Revised: 22.11.2020, Accepted: 05.12.2020

Введение

Железнодорожный транспорт в России играет ключевую роль в социально-экономическом развитии, выполняя 85 % грузооборота и 37 % пассажирооборота. В настоящее время наблюдается рост грузооборота, который требует увеличения пропускной способности на транспорте и в том числе на горно-перевальном участке Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД).

Рост объемов перевозок грузовым подвижным составом тесно связан с внедрением инновационных вагонов и потребностью модернизации старого парка. Далее приведен план списания старого поколения вагонов на 2019–2030 гг. (рис. 1). Замещение устаревшего парка вагонов на инновационные поз-

волит повысить показатели качества перевозок, показан спрос на грузовые вагоны до 2030 г. (рис. 2).

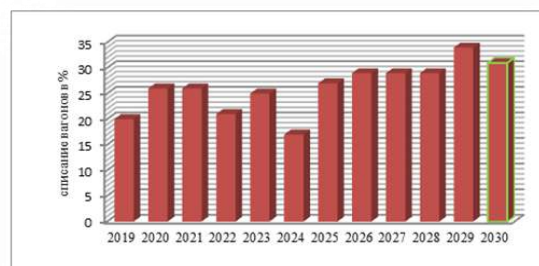


Рис. 1. Прогноз списания вагонов на 2019–2030 гг.
Fig. 1. Forecast of railcar withdrawal from service for 2019–2030

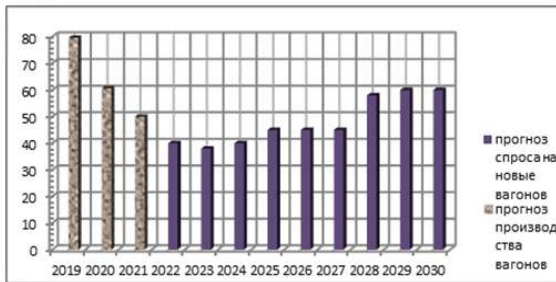


Рис. 2. Прогноз производства и спроса на грузовые вагоны в 2019–2030 гг., тыс. ед.

Fig. 2. Forecast of production and demand for freight cars in 2019–2030, thousand units

Увеличение грузооборота привело к росту количества сходов и крушений по сети железных дорог России за последние 10 лет, в частности на ВСЖД и Восточном полигоне (Красноярская, Забайкальская, Дальневосточная железные дороги).

Методика определения причин сходов подвижного состава в условиях неопределенности

Для выполнения постановления Правительства Российской Федерации «Об утверждении технического регламента о безопасности железнодорожного подвижного состава» от 15 июля 2010 г. № 524, в статье предлагается разработать комплекс мер, направленных на повышение безопасности движения подвижного состава за счет рационального использования информации, полученной с комплекса ходовых (поездных) экспериментальных лабораторий ВСЖД: тягово-энергетической, путеизмерительной, тормозоиспытательной. Каждый источник позволяет получить реальную и достоверную на данный момент информацию о состоянии техниче-

ских систем подвижного состава и пути. Для упрощения поиска неисправностей, которые могут инициировать сход вагонов, предлагается в созданной логической взаимосвязи системы «локомотив – вагон – путь» разделить ее условно на три отдельные части для выявления нарушений при эксплуатации, которые могут быть причастны к сходу. Обнаруженные отклонения параметров транспортной системы анализируют, так как в данной работе предметом исследования является поиск путей предупреждения сходов вагонов.

При написании технического заключения по сходу вагонов в соответствии с регламентирующим документом (№ 3057 р от 27 декабря 2019 г.) особое внимание обращается на поиск точки начала схода.

Автор предлагает уточнить методику поиска причин схода в системе «локомотив – вагон – путь» на реальных примерах сходов за последние 8 лет на горно-перевальных участках Восточного полигона. Динамика сходов показана на (рис. 3).

При определении причин сходов подвижного состава одной из задач служебного расследования является установление класса, к которому следует отнести конкретный сход. В данной системе обязательны наличие перечня возможных неисправностей, которые могли оказать воздействие и привести к сходу.

Рассматривая взаимодействие между элементами системы «локомотив – вагон – путь» была предложена блок-схема для решения задачи определения параметров классов (группы причин) вероятности участия в сходе. С использованием уравнения относительных отклонений определялись величины мер близости отдельно для совокупности параметров каждого схода и каждого класса причин этого события. Вычисленные вероятностные события участия того или иного объекта в сходе позволяли оценить техническое состояние каждого элемента, например,

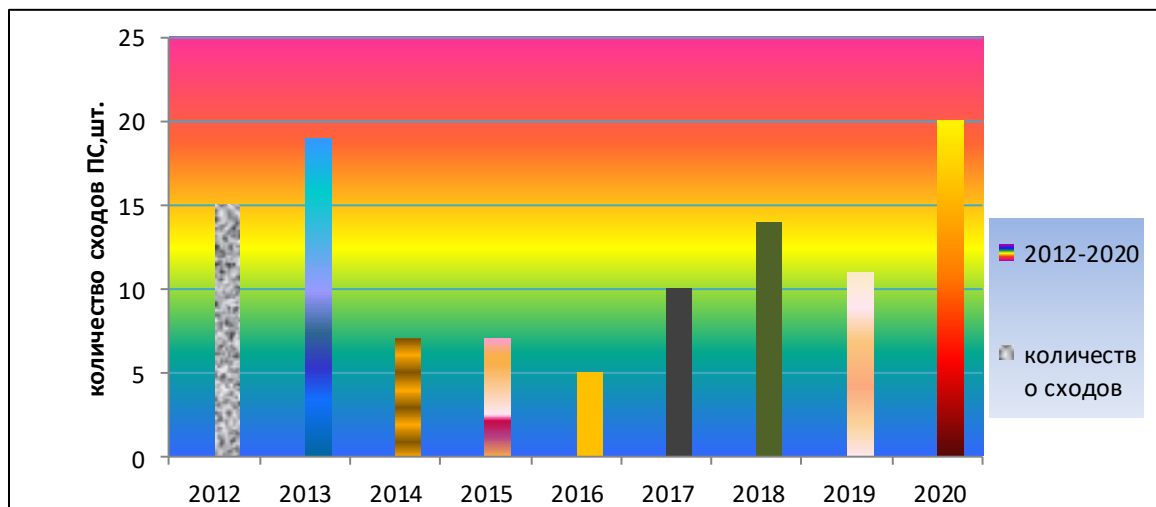


Рис. 3. Количество сходов за 2012–2020 гг. на Восточно-Сибирской железной дороге

Fig. 3. The number of retreats for 2012–2020. on the East Siberian Railway

содержание рельсовой колеи; режимы ведения подвижного состава (особенно в кривых участках пути); техническое состояние поверхности катания рельса и колеса (ползуны, выщербины); степень неисправности и техническое состояние систем вагона (автосцепки, пятник-подпятниковых узлов, рессорного комплекта, буксовых узлов и др.). Полученные расчетные параметры системы «локомотив – вагон – путь» сводились в таблицу исходных значений и результатов решения по отдельным объектам: «локомотив», «вагон», «путь». Обработка результатов многолетних расследований показала, что наиболее опасными объектами сходов являются те, у которых размерность отклоненных параметров превышает норму в 1,5–2 раза.

Математическая модель и анализ неисправностей в системе «локомотив – вагон – путь»

Количественные и качественные характеристики системы «локомотив – вагон – путь» были сняты с каждого участка схода и занесены как отдельные параметры в таблицу, по которой можно определить неисправности, приведшие к сходу подвижного состава. Прежде всего значимые дефекты, которые характеризуются отклонениями от стандартных (нормативных), могут быть относительными и абсолютными. Используя известные математические выражения из теоремы Барбашина – Красовского можно рассчитать относительные отклонения $d(C_j, K_j)$ в механической системе («локомотив – вагон – путь») по каждому классу объекта исследования

$$d(C_i, K_j) = \sum_n (p_n - k_n)^2 / p_n^2, \quad (1)$$

где p_n и k_n – значения параметров одного и того же класса, соответственно схода C_i и ядра класса K_j .

Используя дополнительное значение числового коэффициента $t_g = \frac{1}{R_i}$, который отражает особую значимость и важность в сравнении с другими факторами, он показывает отклонение R_i в системе (например, «уширение», «уклон», «толщина гребня», «износ») и позволяет оценить влияние каждого фактора в этой сложной технической системе. Перечень из множества неисправностей выбран единично из предположения их возможного участия в сходе, т. е. выборка усредненная. При одинаковых значениях исследуемых переменных в теории вероятностей и математической статистике эти отклонения увеличиваются на кратность m_j . Для устранения влияния различного числа параметров в каждом классе причин схода усредненные значения параметров следует проводить путем умножения мер близости на соответствующее число параметров в каждом классе m_j по формуле (2).

$$d(C_i, K_j) = \sum_n (p_n - k_n)^2 / p_n^{2*} m_j. \quad (2)$$

Например, просадка наружной и внутренней рельсовой нити увеличивает дефект вдвое. Для практических вычислений вводятся дополнительные обозначения: i – перечисление объектов «путь», «вагон», «локомотив» и т. д. (общим количеством N); j – признаки в каждом объекте, какими выделены «уширение», «уклон», или «толщина гребня» и т. д. (общим числом N_j).

$$N_i = \sum_{j=1}^{N_j} \frac{P_{ij} - R_{ij}}{R_{i^2 j}}, \quad (3)$$

где P_{ij} , R_{ij} – показатели изношенных и стандартных деталей в каждом объекте и его признаке.

Все полученные расчетные значения ранжируют по данному критерию меры близости и вероятности Q_j отнесения данного схода к соответствующему классу. Рассмотрим усреднение относительных мер близости D_j по каждому классу.

Очевидно, что причина аварии должна прямо зависеть от числовых значений дефектов локомотива, вагона и пути. Обозначим:

- $S_{\text{путь}}$ – относительная мера неисправностей пути при условии схода;
- $S_{\text{вагон}}$ – относительная мера неисправностей вагона при условии схода;
- $S_{\text{локомотив}}$ – относительная мера неисправностей вагона при условии схода.

Расчетные формулы по объектам:

$$S_{\text{п}} = \frac{D_{\text{п}}}{D_{\text{п}} + D_{\text{в}} + D_{\text{л}}}, \quad (4)$$

$$S_{\text{л}} = \frac{D_{\text{л}}}{D_{\text{л}} + D_{\text{п}} + D_{\text{в}}}, \quad (5)$$

$$S_{\text{в}} = \frac{D_{\text{в}}}{D_{\text{в}} + D_{\text{п}} + D_{\text{л}}}, \quad (6)$$

где $D_{\text{п}}$ – усредненное отклонение неисправностей пути; $D_{\text{л}}$ – усредненное отклонение неисправностей локомотива и нарушения режима ведения подвижного состава; $D_{\text{в}}$ – усредненное отклонение неисправностей вагона и нарушение правил размещения и крепления груза.

Для трех объектов (локомотив, путь, вагон соответственно) получаем значения вероятностей схода подвижного состава по каждому классу отдельно $Q_{\text{п}}$, $Q_{\text{в}}$, $Q_{\text{л}}$:

$$Q_{\text{п}} = \frac{D_{\text{в}} D_{\text{л}}}{D_{\text{п}} D_{\text{в}} + D_{\text{п}} D_{\text{л}} + D_{\text{в}} D_{\text{л}}}, \quad (7)$$

$$Q_{\text{в}} = \frac{D_{\text{п}} D_{\text{л}}}{D_{\text{п}} D_{\text{в}} + D_{\text{п}} D_{\text{л}} + D_{\text{в}} D_{\text{л}}}, \quad (8)$$

$$Q_{\text{л}} = \frac{D_{\text{п}} D_{\text{в}}}{D_{\text{п}} D_{\text{в}} + D_{\text{п}} D_{\text{л}} + D_{\text{в}} D_{\text{л}}}. \quad (9)$$

Расчетные параметры системы уравнений (7)–(9) сводятся в таблицу одного объекта – пути. Ниже приведен пример анализа объекта для пути с минимальными параметрами, аналогично заполняются таблицы для двух других объектов – локомотива и вагона.

Исходные значения и результаты решения контрольного примера
для класса пути при сходе подвижного состава
Baseline values and test case solving results
for the track class in case of rolling stock derailment

Объект (класс, причины схода)	Наименование параметра	Значения параметров		Абсолютная манхэттенская мера близости	Наименование параметра t_g коэф.	Эвклидовы меры близости			Относительная мера неисправностей вагона при условии схода %
		Полученные	Ядра класса			Абсолютные	Относительные	Усредненные	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Путь, 1 класс	Уширение, мм	18	26	8	2	64	0,09	0,117	64
	Сужение, мм	6	12	6	3	36	0,25		
	Перекос, мм	13	20	7	8	49	0,122		
	Просадка, мм	20	28	8	10	64	0,086		
	Отступление в плане, мм	20	28	8	8	64	0,086		
	Отклонение по уровню, мм	20	29	9	5	81	0,096		
	Уклон отвода возвышения, мм/м	2,5- 2,7	3,6	1,1	6	1.21	0,093		

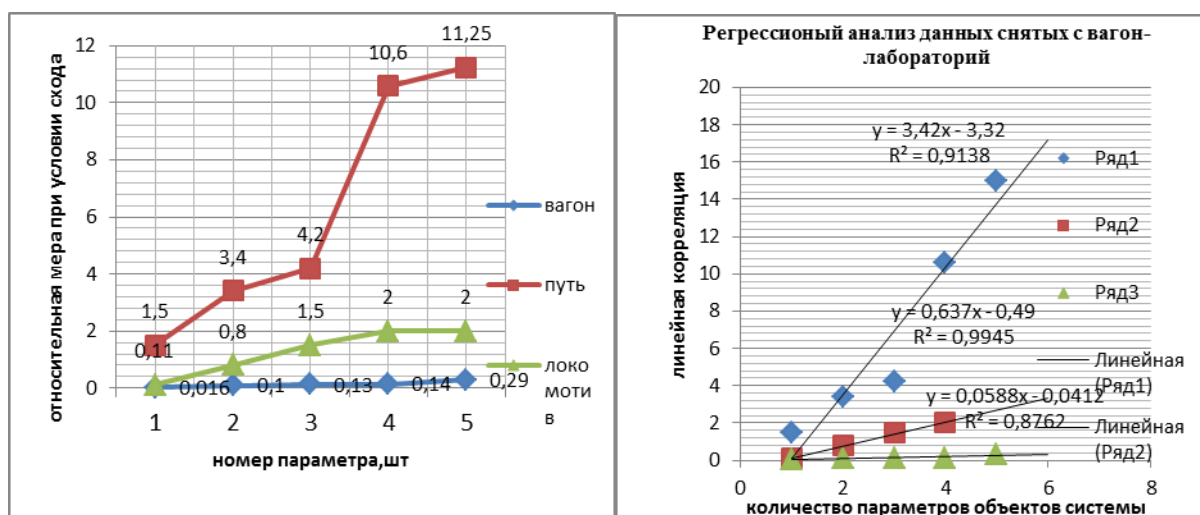


Рис. 4 Графики вероятности событий сходов по классу пути
Fig. 4. Graphs of the probability of deviation events according to the track class

В результате получилось, что минимальная усредненная мера близости (0,117) соответствует классу пути, вероятность причастности к сходу которого составила 64 %. Из сопоставления минимальных значений мер относительной близости в графе 8 (см. табл.) можно установить, что наибольшее влияние на такие результаты классификации причин схода внесли следующие отклонения: уширение 0,09 мм, уклон отвода ширины колеи и просадка пути – 0,086 мм.

Главный критерий оценки при сходе по неисправностям можно представить в виде графика, построенного по табличным значениям в точечной диаграмме или линейной зависимости для рассматриваемых объектов.

Заключение

Поскольку величина и характер параметров исследуемых объектов обусловлены случайными сочетаниями различных факторов, то результат действия одной величины может по-разному сказываться на опасности схода, что видно по разбросу точек на графиках. Аппроксимация позволяет исследовать числовые характеристики и качественные свойства объекта, сводя задачу к изучению более простых или более удобных объектов (например, таких, характеристики которых легко вычисляются или свойства которых уже известны). В теории чисел изучаются диофантовы приближения, в частности, приближения иррациональных чисел рациональным.

Квадрат коэффициента корреляции (r^2) называется коэффициентом детерминации или аппроксимации и обозначается RI или R^2 . Этот коэффициент показывает долю (%) тех изменений, которые в данном явлении зависят от изучаемого фактора. Коэффициент детерминации является более непосредственным и прямым способом выражения зависимости одной величины от другой, и в этом отношении он предпочтительнее коэффициента корреляции. В случаях, где известно, что независимая переменная Y находится в причинной связи с независимой переменной X , значение r^2 показывает ту долю элементов в вариации Y , которая определена влиянием X . Регрессионный анализ заключается в том, чтобы отыскать

линию (прямую в случае линейной корреляции), наиболее точно выражающую зависимость одного признака от другого. Кроме того, при помощи регрессионного анализа можно выявить ошибку опытных данных, влияющих на конечные результаты исследования (схода). Так, например, значение коэффициента корреляции, приведенного на графике, указывает на чувствительность системы «локомотив – вагон – путь» к различным дефектам и позволяет ранжировать их опасность.

Имея математическую модель поиска дефекта в системе «локомотив – вагон – путь», можно провести глубокий анализ ранжирования неисправностей и степени их опасности.

Список литературы

1. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 560 с.
2. Грачева Л.О., Певзнер В.О., Анисимов П.С. Показатели динамики и воздействия на путь грузовых четырехосных вагонов при различных износах тележек и отступлениях от норм содержания в прямых участках пути // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Вып. 549. М.: Транспорт, 1976. С. 4–25.
3. Гребенюк П.Т., Долганов А.Н., Некрасов О.А., Лисицын А.Л., Стромский П.П., Боровиков А.П., Чукова Т.С., Григоренко В.Г., Первушина В.М. Правила тяговых расчетов для поездной работы // М.: Транспорт, 1985. 287 с.
4. Доронин И.С. Расчет шейки оси колесной пары на продольную нагрузку // Вестник ВНИИЖТ, 1978. С. 33–34.
5. Ершков О.П. Расчет рельса на действие боковых сил в кривых // Тр. ЦНИИ МПС. Вып. 192. М.: Трансжелдориздат, 1960. С. 5–58.
6. Желнин Г.Г., Певзнер В.О., Шинкарев Б.С. Исследование зависимостей между показателями динамики подвижного состава и воздействия его на путь // Тр. ВНИИЖТ. Вып. 542. М.: Транспорт, 1975. С. 84–92.
7. Жуков И.В. Автономное устройство регистрации расширяет возможности испытательных поездов (Вагон тормозоиспытательный) // Вагоны и вагонное хозяйство. Приложение к журналу «Локомотив», М.: 2019. №1(49). С. 40–41.
8. Комиссаров А.Ф. Итоги работы проектно-конструкторского бюро вагонного хозяйства за 2018 год // Вагоны и вагонное хозяйство. Приложение к журналу «Локомотив», М.: 2019. №1(49). С. 5–6.
9. Кудрявцев Н.Н. Исследования динамики неподрессоренных масс вагонов // Тр. ВНИИЖТ. Вып. 287. М.: Транспорт, 1965. 168 с.
10. Кузович В.М. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Динамическая нагруженность специализированных вагонов в криволинейных участках пути». Москва, 2010, 211 с.
11. Кудрявцева Н.Н. Динамические нагрузки ходовых частей грузовых вагонов // Тр. ВНИИЖТ. Вып. 572. М.: Транспорт, 1977. 144 с.
12. Кудрявцев Н.Н. Исследования динамики неподрессоренных масс вагонов // Тр. ВНИИЖТ. Вып. 287. М.: Транспорт, 1965. 168 с.
13. Лукин В.В., Анисимов В.Н., Котуранов В.Н. Конструирование и расчет вагонов: учебник, 2-е изд., перераб. и доп. М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. 688 с.
14. Лысюк В.С. Причины и механизмы схода колеса с рельса. М.: Транспорт, 2002. 215 с.
15. Скалов А.Д., Коваль В.А. Методика исследования вертикальных и боковых сил при износных испытаниях рельсов // Вестник ВНИИЖТ, 1980. № 6. 216 с.
16. Ромен Ю.С., Николаев В.Е. Исследование влияния детерминированных неровностей пути в плане на уровень боковых сил при движении грузового вагона // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Киев: Наукова думка, 1980. С. 40–42.
17. Рудановский В.М. Методика определения причин сходов подвижного состава в условиях неопределенностей // Вестник ВНИИЖТ, 2011. № 4. 10–15 с.
18. Шахуняц Г.М. Железнодорожный путь. Москва: Транспорт, 1987. 479 с.

References

1. Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava [Interaction of the track and rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1986. 560 p.
2. Gracheva L.A., Pevzner V.O., Anisimov P.S. Pokazateli dinamiki i vozdeistviya na put' gruzovykh chetyrekhosnykh vagonov pri razlichnykh iznosakh telezhok i ostupleniyakh ot norm soderzhaniya v pryamykh uchastkakh puti [Indicators of performance and track impact of cargo four-axle railcars with different degrees of trolley wear and deviations from standards in the straight sections of the track]. *Sb. nauch. tr. VNIIZhT [Works of the Railway Research Institute]*, Vol. 549. Moscow: Transport Publ., 1976. Pp. 4–25.
3. Grebenyuk P.T., Dolganov A.N., Nekrasov O.A., Lisitsyn A.L. et al. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty [Rules of traction calculations for train work]. Moscow: Transport Publ., 1985. 287 p.

4. Doronin I.S. Raschet sheiki osi kolesnoi pary na prodol'nyu nagruzku [Calculation of the wheel pair axle neck for longitudinal load]. *Vestnik VNIIZHT [VNIIZHT Scientific Journal]*, 1978. P. 33–34.
5. Ershkov O.P. Raschet rel'sa na deistvie bokovykh sil v krivykh [Calculation of the rail on the action of side forces in curves]. *Tr. TSNII MPS [Proceedings of the Central Research Institute of Railway Transport of the Ministry of Railways]*, Issue 192. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1960. Pp. 5–58.
6. Zhelmin G.G., Pevzner V.O., Shinkarev S.B. Issledovanie zavisimosti mezhdu pokazatelyami dinamiki podvizhnogo sostava i vozdeistviya ego na put' [A study of the dependencies between the indicators of the dynamics of the rolling stock and its influence on the track]. *Trudy VNIIZhT [Works of the Railway Research Institute]*, Vol. 542. Moscow: Transport Publ., 1975. Pp. 84–92.
7. Zhukov I.V. Avtonomnoe ustroystvo registratsii rasshryaet vozmozhnosti ispytatel'nykh poezdov (Vagon tormozoprytatel'nyi) [A stand-alone registration device extends test trains (A brake-testing railcar)]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo. Prilozhenie k zhurnalu «Lokomotiv» [Railcars and rolling stock facilities. The appendix to the “Locomotive” journal]*, No. 1 (49). Moscow, 2019. Pp. 40–41.
8. Komissarov A.F. Itogi raboty proektno-konstruktorskogo byuro vagonnogo khozyaistva za 2018 god [Results of the work of the design bureau of rolling stock facilities for 2018]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo. Prilozhenie k zhurnalu «Lokomotiv» [Railcars and rolling stock facilities. The appendix to the “Locomotive” journal]*, No. 1 (49). Moscow, 2019. Pp. 5–6.
9. Kudryavtsev N.N. Issledovaniya dinamiki nepodressorenykh mass vagonov [Studies of dynamics of unsprung masses of cars]. *Trudy VNIIZhT [Works of the Railway Research Institute]*, Iss. 287. Moscow: Transport Publ., 1965. 168 p.
10. Kuzovich V.M. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk po teme «Dinamicheskaya nagruzhennost' spetsializirovannykh vagonov v krivolineinykh uchastkakh puti». [Dynamic loading of specialized railcars in curved sections of the track. A Ph.D. (Engineering) diss.]. Moscow, 2010, 211 p.
11. Kudryavtseva N.N. Dinamicheskie nagruzki khodovykh chastei gruzovykh vagonov [Dynamic loads of running parts of freight cars]. *Trudy VNIIZhT [Works of the Railway Research Institute]*, Iss. 572. Moscow: Transport Publ., 1977. 144 p.
12. Kudryavtsev N.N. Issledovaniya dinamiki nepodressorenykh mass vagonov [Studies of the dynamics of unsprung railcar masses]. *Trudy VNIIZhT [Works of the Railway Research Institute]*, Iss. 287. Moscow: Transport Publ., 1965. 168 p.
13. Lukin V.V., Anisimov V.N., Koturanov V.N. Konstruirovaniye i raschet vagonov: uchebnik, 2-e izd., pererab. i dop. [Design and calculation of railcars: a textbook, 2nd ed., revised and abridged]. Moscow: Federal state educational institution “Educational and methodological center of education in railway transport” Publ., 2011, 688 p.
14. Lysyuk V.S. Prichiny i mekhanizmy skhoda koleasa s rel'sa [Causes and mechanisms of wheel derailment]. Moscow: Transport Publ., 2002. 215 p.
15. Skalov A.D., Koval V.A. [Metodika issledovaniya vertikal'nykh i bokovykh sil pri iznosnykh ispytaniyakh rel'sov [A method of investigation of vertical and lateral forces during wear tests of rails]. *Vestnik VNIIZHT [VNIIZHT Scientific Journal]*, 1980. No. 6. 216 p.
16. Romen Yu.S., Nikolaev V.E. Issledovanie vliyaniya determinirovannykh nerovnostei puti v plane na uroven' bokovykh sil pri dvizhenii gruzovogo vagona [Investigation of the influence of deterministic track irregularities in the plan on the level of lateral forces when moving a freight car]. *Problemy mekhaniki zheleznodorozhnogo transporta [Problems of railway transport mechanics]*, Kiev: Naukova Dumka Publ., 1980. Pp. 40–42.
17. Rudanovskii V.M. Metodika opredeleniya prichin skhodov podvizhnogo sostava v usloviyakh neopredelennosti [A method of determining the causes of rolling stock derailments in conditions of uncertainty]. *Vestnik VNIIZHT [VNIIZHT Scientific Journal]*, 2011. No. 4. Pp. 10–15.
18. Shakhunyan G.M. Zheleznodorozhnyi put'. [Railway track]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.

Информация об авторах

Железняк Василий Никитович – канд. техн. наук, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: zheleznyak_vn@irgups.ru

Мартыненко Любовь Викторовна – старший преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru

Information about the authors

Vasilii N. Zheleznyak – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Railcars and Rolling Stock Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: zheleznyak_vn@irgups.ru

Lyubov' V. Martynenko – senior lecturer of the Subdepartment of Railcars and Rolling Stock Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru



Д.т.н., профессор Черняк С.С.

Саул Самуилович Черняк родился 24 марта 1926 года в городе Курске. Детство прошло в городе Орле.

В июле 41-го семья эвакуировалась в село Синодское Пензенской области, а затем в Пензу.

Саулу нужно было обязательно устроиться на завод: рабочим полагалась 800-граммовая пайка хлеба. Саул пришел на Пензенский завод №744, назвавшись фрезеровщиком, хотя не знал, как подойти к станку. Но потом всему научился.

В 1942 году Черняки переехали в Восточную Сибирь, в город Иркутск, где жила сестра отца. Саул пошел учиться в авиационный техникум, окончил ускоренные курсы «Холодная обработка металлов» и в 1946 году попал по распределению на Иркутский завод тяжелого машиностроения имени В.В. Куйбышева. Вскоре его поставили мастером. Одновременно он учился на факультете «Технология машиностроения» Иркутского горного института (ныне ИрНИТУ).

Сталь, её свойства всё больше и больше увлекали молодого рабочего. Ему хотелось знать о металле всё: его структуру, его ковкость, удельную вязкость, параметры прочности. На ИЗТМ

им. Куйбышева была открыта Центральная заводская лаборатория, одно из подразделений которой – металлографическую лабораторию – возглавил С.С. Черняк. Через несколько лет Саул Самуилович стал начальником всей Центральной заводской лаборатории. Он сумел поставить научно-исследовательскую работу по микрорегирированию стали на ИЗТМ на очень высоком уровне.

В эти годы по всей стране среди учёных-металлургов развернулась борьба за улучшение свойств стали и снижение её себестоимости за счёт введения в металл различных химических элементов. Прочитав специальную литературу, Саул Самуилович решил добавить в сплав барий из соли бария. Этот эксперимент вошел в практику металловедения как солевая обработка металлов.

Вскоре Саул Черняк защитился и стал первым кандидатом технических наук завода тяжелого машиностроения. Но Саул Самуилович не только сам защитился. Он помог защититься и своим соратникам: под его руководством защитили кандидатские диссертации двадцать человек. В числе защитившихся были и четверо директоров завода.

В жизни Черняка была ещё одна история, о которой тогда писали все центральные и даже заграничные газеты. В Бодайбинском районе, на прииске Маракан было обнаружено богатейшее месторождение золота. Но вся сложность добычи этого золота заключалась в том, что оно залегалось на очень большой глубине, под толстым слоем вечной мерзлоты и твёрдого гранита. Нужна была невиданная по своей мощности драга с 600-литровыми черпаками из сверхпрочной стали. Такой стали в СССР тогда не было. Не существовало и такой драги. Советское министерство сделало запрос о постройке необходимой драги по всем заводам тяжёлого машиностроения, но желающих выплавить 600-литровые черпаки для драги в России не нашлось. И тогда министерство тяжёлого машиностроения купило нужные черпаки в Англии из знаменитой на весь мир стали Гадфилда.

«Английские черпаки фирмы Гадфилда выглядели красиво, – рассказывает Саул Самуилович, – Но при первом же испытании на Маракане дражная цепь не выдержала нагрузки и порвалась. Нужно было найти свой «рецепт» сверхпрочной стали. За решение этой задачи взялась Центральная лаборатория Иркутского завода тяжёлого машиностроения. При решении этой проблемы был откорректирован химический состав высокомарганцевой стали: резко снижено содержание фосфора, введено модифицирование ванадием, уточнено содержание других элементов. Дражная цепь ИЗТМ им. В.В. Куйбышева в течение долгого времени успешно работала в исключительно тяжёлых горно-геологических условиях».

Изготовление 600-литровой дражной цепи получило отклики в США, Англии и других странах.

Разработки учёного по совершенствованию стали для работы в условиях Крайнего Севера легли в основу его докторской диссертации, которую он защитил в 1973-ем году.

После защиты диссертации Саул Самуилович продолжал научную деятельность в Центральной заводской лаборатории завода имени Куйбышева. Геолог Воробьев из Иркутского института Геохимии принес Черняку интересный минерал – кальциево-бариево-стронциевый карбонат. И произошло новое открытие:

после добавки карбоната в сталь Гадфильда её ударная вязкость возросла в два раза. С лёгкой руки иркутских металлургов этот карбонат стали применять на многих металлургических предприятиях.

В перестройку завод закрыли. Все, что буквально выбрасывали с завода, все высокоточные приборы, дорогостоящие станки Саул Самуилович перевозил в железнодорожный институт (ИрИИТ), где начал работать с 1981 года и организовал кафедру технологии металлов и материаловедения (ТМиМ). Были созданы механическая, сварочная и металловедческая лаборатории. Они были укомплектованы оборудованием, которое позволяло выполнять учебные программы по металловедению и технологии конструкционных материалов.

Совместно с Центральной лабораторией Новокузнецкого металлургического комбината ОАО «НКМК» проведена комплексная научно-исследовательская работа по созданию износостойких железнодорожных рельсов для условий Сибири. В течение 15 лет изготавливали опытные рельсы с последующей эксплуатацией в условиях Восточно-Сибирской дороги. За это время коллективом было получено 10 патентов на новые рельсовые стали. Производственные испытания опытных рельсов показали повышение эксплуатационной стойкости в условиях ВСЖД до 50-80 %.

На кафедре, которую создал Саул Самуилович, в восьмидесятых годах трудились: профессор Корчевин Николай Алексеевич, профессор Синеговская Лидия Михайловна, доцент Гусаров Александр Владимирович, доцент Лобов Иван Павлович, старшие преподаватели Булатникова Тамара Алексеевна и Якимова Галина Анатольевна.

Он каждый день в университете. У профессора Черняка множество учеников и последователей и в университете путей сообщения и в техническом университете.

Его помнят и любят все, кто когда-либо с ним сталкивался.

Данная статья готовилась, когда Саул Самуилович был с нами.

К глубокому сожалению д.т.н., профессор С.С. Черняк скончался 17 апреля 2021 г.

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

№ 1 (69)
2 0 2 1

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор **С.К. Каргапольцев**
Ответственный за выпуск **В.Е. Гозбенко**

Подписано в печать 23.04.2021. Формат 60x84/8.
Дата выхода в свет 29.04.2021
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 29.
Уч.-изд. л. 27. Тираж 500 экз. Заказ № 3548
Подписной индекс по каталогу «Роспечать»: 64556
ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно
публикуются в международной справочной системе
по периодическим и продолжающимся изданиям
«Ulrich's Periodicals Directory»
ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется
Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Иркутский государственный университет путей сообщения
Телефон: 8(3952) 38-76-72, E-mail: irgups-journal@yandex.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Учредитель: ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет путей сообщения
(664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)