

# ИЗВЕСТИЯ

№ 3(47)

2021

# Транссиб



## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. Бессоненко Сергей Анатольевич – заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., профессор.
5. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
6. Глинка ТADEUSZ – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
8. Гуда Александр Николаевич – проректор по научной работе РГУПС, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
9. Зыкина Анна Владимировна – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
10. Исаков Александр Леонидович – заведующий кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
11. Ким Константин Константинович – заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
12. Косарев Александр Борисович – первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
13. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
14. Лившиц Александр Валерьевич – и. о. проректора по научной работе ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
15. Лю Цзянькунь – доктор, профессор, зам. декана Школы гражданского строительства университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
16. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
17. Сидоров Олег Алексеевич – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
18. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛТ, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
19. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПТТУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
20. Харламов Виктор Васильевич – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор.

## EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ilkham Islamovich – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, vice-rector for scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Bessonenko Sergey Anatolievich – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
5. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
6. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
7. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
8. Huda Alexander Nikolaevich – Vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
9. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer sciences» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
10. Isakov Oleg Alexandrovich – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
11. Kim Konstantin Konstantinovich – head of the department «Electrical Engineering and Heat Power Engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
12. Kosarev Alexander Borisovich – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
13. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
14. Livshits Alexandr Valerievich – acting vice-rector for scientific work of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
15. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
16. Paramonov Alexander Mikhailovich – professor of the department «Heat-power» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk).
17. Sidorov Oleg Alexeevich – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
18. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Rolling stock» of ALT, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
19. Fayziyabev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons and wagon facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
20. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Нехаев В. А. Действие продольной шпальной неравноупругости пути на устойчивость движения электровозов.....2
- Джаникулов А. Т., Валиев М. Ш. Исследование крутильных колебаний в режиме запуска дизеля тепловозов типа UzTE16M.....23
- Давыдов Ю. А., Мухин О. О., Заболотный В. В. Оценка влияния системных нецелесообразностей локомотивов на среднесуточный пробег.....31
- Никонов В. А., Коссов В. С., Петров Г. И. Тенденции развития устройств крепления контейнеров.....41
- Меншиков И. А., Космодамианский А. С., Баташов С. И. Совершенствование диагностирования изоляции обмоток статора асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 электровоза 2ЭС10 «Гранит» с помощью спектрального анализа тока.....51
- Хажеева М. Ю., Худонов А. М., Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю. Разработка автоматизированной системы ресурсосберегающего управления электрокалориферной установкой для сушки изоляции тяговых электрических машин.....61
- Маяков Д. М. Определение показателей долговечности элементов колесной пары по информации о распределении контролируемого параметра тепловозов серии 2ТЭ25КМ.....69
- Муравьев Д. В., Супчинский О. П. Методика контроля соосности и радиального биения вкладышей моторно-осевых подшипников тяговых электродвигателей локомотивов.....78
- Обрывалин А. В., Бисерикан М. И., Галиев И. И. Определение максимальной температуры на поверхности катания колеса при его кратковременном движении по рельсу юзом.....89
- Файзибаев Ш. С., Набиев Э. С., Соболева И. Ю. Многослойная наплавка обода колеса грузового вагона.....98
- Комяков А. А., Вильгельм А. С., Шкулов А. И. Разработка алгоритма совместных тяговых и электрических расчетов с учетом характеристик и параметров участков и поездной ситуации.....106

### Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Шепетько Т. В., Зайцев А. А., Тенирядко Н. И., Бучкин В. А. Транспортное развитие северных территорий России.....115

### Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

- Ахмедзянов Г. Г., Дремин В. В. Исследование факторов, влияющих на работу железнодорожного переезда.....130

### Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

- Краснов А. С., Ким К. К. Оценка энергоэффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий.....139

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

**В. А. Нехаев**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ДЕЙСТВИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ШПАЛЬНОЙ НЕРАВНОУПРУГОСТИ ПУТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ

**Аннотация.** Показано, что динамические системы «железнодорожный экипаж – путь» вследствие наличия неравноупругости пути по протяженности должны описываться обыкновенными дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. При переходе на новую парадигму речь может идти об областях динамической неустойчивости, которые в случае простых параметрических резонансов развиваются около критических частот, но это не одна конкретная точка, а зона, которая расширяется с увеличением коэффициентов параметрического возбуждения. Кроме того, наличие трения в системе не гарантирует ограниченности резонансных амплитуд.

Изложена методика анализа дифференциальных уравнений с постоянными, переменными и случайными коэффициентами, описывающих движение узлов электровозов при их движении по неравноупругому по протяженности пути. Установлено влияние коэффициентов параметрического возбуждения на ширину зоны динамической неустойчивости.

Существует много других особенностей в поведении дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, поэтому заменять действие неравноупругости некоторой эквивалентной геометрической неровностью нельзя, так как в настоящее время не существует точного решения проблемы, с которым можно было бы сравнивать результаты приближенных математических моделей.

**Ключевые слова:** подвижной состав, неравноупругость пути, мультипликативное и аддитивное возмущение, обыкновенные дифференциальные уравнения с постоянными, переменными и случайными коэффициентами, область неустойчивости или параметрического резонанса, коэффициент параметрического возбуждения и его критическое значение.

**Viktor A. Nekhaev**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## THE EFFECT OF LONGITUDINAL SLEEPER UNSTIFFNES OF THE RAILWAY TO THE STABILITY OF THE MOVEMENT OF ELECTRIC LOCOMOTIVES

**Abstract.** It is shown that dynamic systems, «rolling stock – way» due to the unevenness of the path on length should be described by ordinary differential equations with variable coefficients, the method of analyzing differential equations with constant, variable and random coefficients describing the movement of electric locomotive nodes when they move along an uneven path.

In the transition to a new paradigm, we can talk about areas of dynamic instability, which in the case of simple parametric resonances develop near critical frequencies, but this is not one specific point, but a zone that expands with increasing coefficients of parametric excitation. In addition, the presence of friction in the system does not guarantee the limitation of resonant amplitudes.

The effect of parametric arousal factors on the width of the dynamic instability zone has been established. There are many other features in the behavior of differential equations with variable coefficients, so it is impossible to replace the action of unevenness with some equivalent geometric irregularity, since at this moment there is no exact solution to the problem with which to compare the results of approximate mathematical models.

**Keywords:** rolling stock, unstiffness of railway, multiplier and additive perturbation, ordinary differential equations with constant, variable and random odds, instability or parametric resonance, parametric arousal factor and its critical importance.

Хорошо известно, что железнодорожный путь не является в продольном направлении равноупругим [1 – 4, 10 – 14, 17 – 24]. Следовательно, математические модели колебаний подвижного состава в принципе не могут представляться системами дифференциальных уравнений с

постоянными коэффициентами, что в действительности имеет место в настоящее время практически во всех работах ученых-железнодорожников.

Нелинейные дифференциальные уравнения, за редкими исключениями, не обладают точными решениями, более того, нет регулярных методов их решения. Существуют только конкретные приближенные методы их интегрирования.

Следовательно, динамика подвижного состава должна описываться системами дифференциальных уравнений со случайными коэффициентами [4 – 6, 11 – 14] (параметрические системы) и случайным возмущением, что в настоящее время чрезвычайно сложно и доступно только математикам. В конце прошлого века в транспортной механике появились работы, посвященные неравноупругости железнодорожного пути [10 – 16]. Причем работа [10] моего учителя, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ Михаила Прокопьевича Пахомова была выполнена раньше, чем появилась знаменитая книга [4], написанная известным российским ученым В. В. Болотиным.

Возможные виды спектральной плотности вертикальной жесткости пути показаны на рисунках 1 и 2, на которых отчетливо видны ее периодические составляющие. На рисунке 1 имеет смысл обратить внимание на «пик» в районе частоты 1,83 Гц. Так, если вычислить величину  $1/0,54$  (0,543 м – междушпальное расстояние при эюре 1840 шт./км), то получим 1,842.

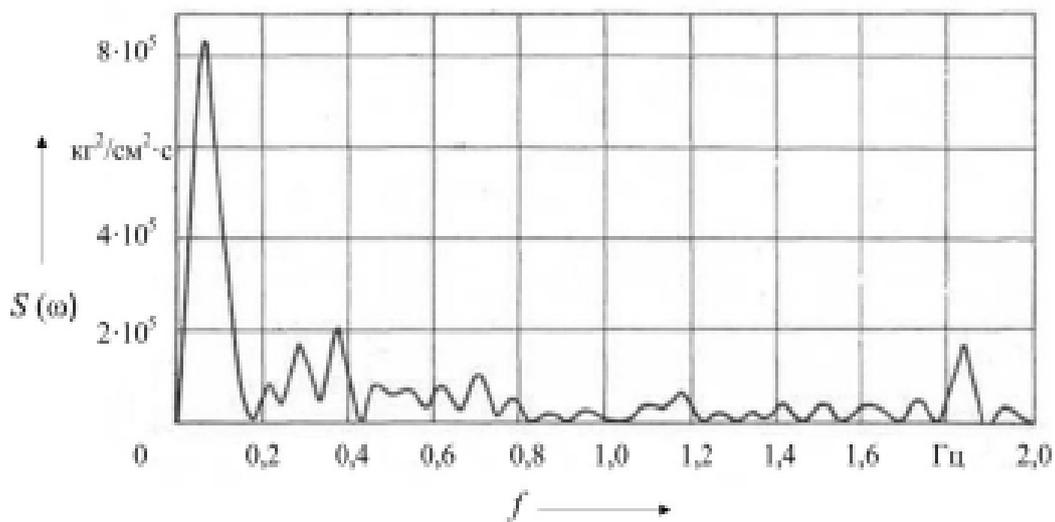


Рисунок 1 – Спектральная плотность вертикальной жесткости железнодорожного пути по результатам натуральных исследований, выполненных сотрудниками ДИИТа [23, 25] в европейской части СССР

Что же касается Норильской железной дороги (рисунок 2), то она проложена за полярным кругом в зоне вечной мерзлоты, т. е. полученные для нее данные весьма специфические, поэтому мы в дальнейшем будем опираться на спектральную плотность, найденную для магистральных железных дорог.

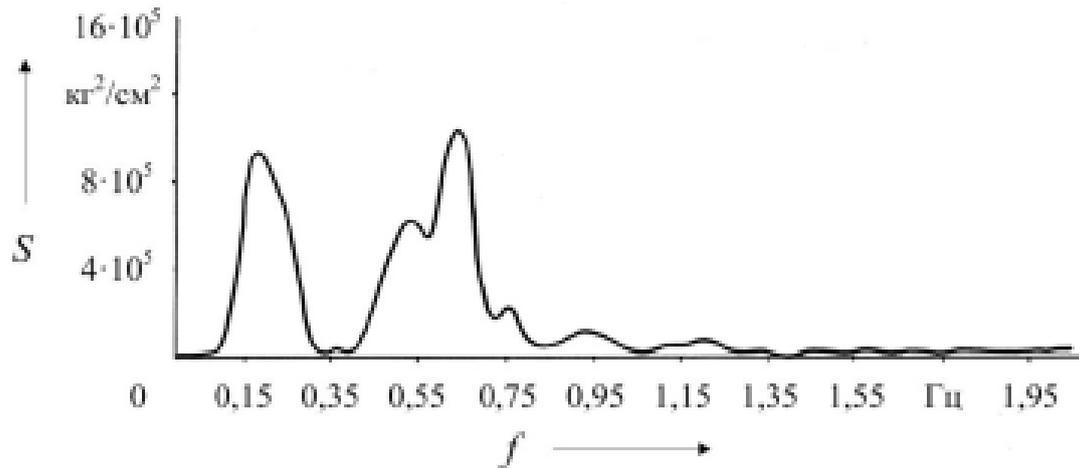


Рисунок 2 – Спектральная плотность вертикальной жесткости пути по результатам натуральных исследований на Норильской железной дороге, полученная сотрудниками ОмИИТа [26]

Следовательно, мы будем в дальнейшем опираться на данные, полученные учеными ДИ-ИТа (теперь ДНУЖТ). В работе [23] приведены, например, такие данные (таблица 1) для вертикальной жесткости железнодорожного пути, полученные на основании представленной выше спектральной плотности жесткости пути.

Таблица 1 – Спектральные составляющие вертикальной жесткости пути

№ п/п	Частота к-й гармоники, Гц	Длина волны к-й составляющей, м	Амплитуда к-й составляющей, тс/мм	Коэффициент параметрического возбуждения к-й составляющей, б/р
1	0,064	15,62	0,19	0,038
2	0,280	5,58	0,27	0,054
3	0,375	3,57	0,10	0,020
4	0,700	1,43	0,06	0,012
5	1,840	0,544	0,08	0,016

Физическое объяснение в таблице 1 можно дать лишь пятой составляющей, имеющей длину волны, равную междушпальному расстоянию (~0,543 м). Остальные составляющие не имеют очевидного и строгого обоснования. Составляющая с наибольшим коэффициентом параметрического возбуждения  $\mu_2 = 0,054$  имеет длину волны  $l_2 = 5,58$  м, и объяснить физически эту гармонику пока невозможно.

Чтобы несколько упростить ситуацию, будем изучать параметрическую систему и из всех факторов, создающих продольную неравноупругость железнодорожного пути, учитываем только наличие шпал. Причем хорошо известно, что технические требования, предъявляемые к эюре шпал, такие жесткие, что мы вправе считать возмущение, которое они вносят в динамическую систему, узкополосным или, на первых порах, гармоническим и представлять в дальнейшем периодической функцией вида:

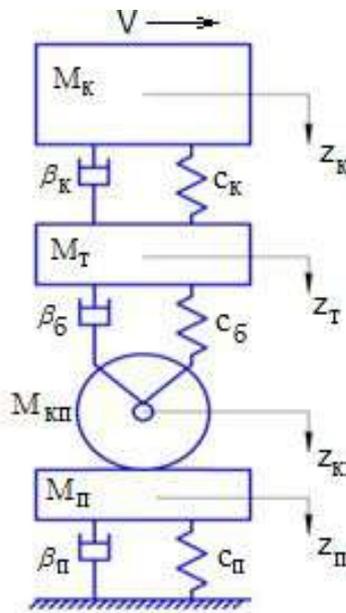
$$f(V, t) = 2\mu \cos 2\Omega t, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент параметрического возбуждения, б/р;  $\Omega = \frac{\pi V}{3,6l_{\text{шп}}}$  – частота параметрического возмущения, 1/с;  $V$  – скорость движения поезда, которую будем считать постоянной, км/ч;  $l_{\text{шп}}$  – расстояние между шпалами, определяемое эюрой шпал, м, например, для эюры

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

1840 шт. на 1 км имеем  $l_{шт} = 0,543; 3,6$  – переводной коэффициент из километров в час в метры в секунду.

Таким образом, должны изучаться динамические системы с детерминированным параметрическим возмущением и случайной правой частью. Если ограничиться экипажем с линейными силовыми характеристиками, то поведение таких систем описывается системами дифференциальных уравнений вида



$$A\ddot{\bar{z}} + 2\gamma B\dot{\bar{z}} + C\bar{z} + 2\mu\Lambda\bar{z} \cos 2\Omega t = \vec{\zeta}(t) + \vec{\xi}(t), \quad (2)$$

где  $\bar{z}(t)$  – вектор обобщенных координат, отсчитываемых от положения статического равновесия, имеющий размерность  $n$  (число степеней свободы подвижной единицы);  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $\Lambda$  – постоянные  $n \times n$ -матрицы, причем матрицы масс, диссипации и жесткостей  $A$ ,  $B$  и  $C$  – симметричные и положительно-определенные;  $\mu$  – коэффициент мультипликативного (параметрического) возбуждения. Через  $\vec{\zeta}(t)$  обозначен вектор случайного внешнего возмущения, представляющего собой стационарный процесс с нулевыми средними значениями и соответствующими спектральными плотностями. Вектор  $\vec{\xi}(t)$  описывает детерминированный возмущающий фактор с частотой  $\Omega$ , связанный с продольной, шпальной неравноупругостью железнодорожного пути.

Рисунок 3 – Обобщенный одноосный железнодорожный экипаж

Рассматривать влияние продольной неравноупругости железнодорожного пути на динамику подвижного состава будем на расчетной схеме эквивалентного одноосного экипажа, обладающего тремя степенями свободы (рисунок 3).

Уравнения движения такой динамической системы легко находятся с помощью энергетического метода – уравнений Лагранжа второго рода. Опуская рутинные действия, связанные с вычислением кинетической и потенциальной энергии, и диссипативной функции, и взятием прямых и частных производных от соответствующих энергетических характеристик, запишем систему дифференциальных уравнений, которые представляют математическую модель экипажа, в виде:

$$\begin{cases} m_k \ddot{z}_k + \beta_{\text{ц}}(\dot{z}_k - \dot{z}_t) + c_{\text{ц}}(z_k - z_t) = m_k g; \\ m_t \ddot{z}_t - \beta_{\text{ц}}(\dot{z}_k - \dot{z}_t) + \beta_{\text{б}}(\dot{z}_t - \dot{z}_{\text{кп}}) - c_{\text{ц}}(z_k - z_t) + c_{\text{б}}(z_t - z_{\text{кп}}) = m_t g; \\ m_{\text{кп}} \ddot{z}_{\text{кп}} - \beta_{\text{б}}(\dot{z}_t - \dot{z}_{\text{кп}}) + \beta_{\text{п}}(\dot{z}_{\text{кп}} - \dot{\eta}) - c_{\text{б}}(z_t - z_{\text{кп}}) + c_{\text{п}}(z_{\text{кп}} - \eta) = m_{\text{кп}}(g + \ddot{\eta}). \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $m_k$ ,  $m_t$ ,  $m_{\text{кп}}$  – соответственно масса кузова, тележки и колесной пары, приходящаяся на одну колесную пару экипажа;  $\beta_k$ ,  $\beta_t$ ,  $\beta_{\text{п}}$  – коэффициенты вязкого трения в центральном и буксовом подвешивании подвижного состава и пути;  $c_{\text{ц}}$ ,  $c_{\text{б}}$ ,  $c_{\text{п}}$  – жесткости центрального и буксового подвешивания подвижного состава и пути;  $z_k$ ,  $z_t$ ,  $z_{\text{кп}}$  – подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары экипажа;  $\eta$  – геометрическая неровность железнодорожного пути, имеющая случайный характер;  $g$  – ускорение свободно падающего тела.

Нетрудно видеть, что в правых частях дифференциальных уравнений системы (3) стоят постоянные величины, от которых необходимо избавиться, что упростит алгоритм поиска решения. Положим, что

$$\begin{cases} z_k = f_k + q_k; \\ z_T = f_T + q_T; \\ z_{k.п} = f_{k.п} + q_{k.п}, \end{cases} \quad (4)$$

здесь  $f_k, f_T, f_{k.п}$  – переменные, подлежащие определению из условия, что обнуляют правые части, кроме последнего уравнения системы (3);  $q_k, q_T, q_{k.п}$  – новые обобщенные координаты, отсчитываемые от положений статического равновесия, ибо жесткость железнодорожного пути по протяженности является функцией времени в предположении движения экипажа с постоянной скоростью:

$$c_n = c_0 (1 - 2\mu \cos 2\Omega t), \quad (5)$$

где  $\mu = \frac{1}{2} \frac{c_{\max} - c_{\min}}{c_{\max} + c_{\min}}$  – коэффициент параметрического возбуждения от шпальной неравноупругости;  $c_{\max}$  – жесткость железнодорожного пути над серединой шпалы;  $c_{\min}$  – жесткость железнодорожного пути в середине междушпального ящика;  $c_0 = \frac{1}{2}(c_{\max} + c_{\min})$  – средняя на рельсовом звене жесткость пути, которая определяется регионом расположения железной дороги и сезоном года (зима, лето).

Подстановка уравнений (4) в систему (3) и несложные преобразования приводят нас к системе алгебраических уравнений для определения переменных  $f$ :

$$C\vec{f} = \vec{m}g, \quad (6)$$

здесь  $C = \begin{pmatrix} c_{\Pi} & -c_{\Pi} & 0 \\ -c_{\Pi} & c_{\Pi} + c_{\sigma} & -c_{\sigma} \\ 0 & -c_{\sigma} & c_{\sigma} + c_{\Pi} \end{pmatrix}$  – матрица жесткостных коэффициентов железнодорожного экипажа;

$\vec{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}$  – вектор отыскиваемых переменных;  $\vec{m} = \begin{pmatrix} m_k \\ m_T \\ m_{k.п} \end{pmatrix}$  – вектор масс экипажа.

Решение САУ (6) дается следующими формулами:

$$\begin{cases} f_1 = \Delta_{\Pi \text{ ст}} + \Delta_{\sigma \text{ ст}} + \frac{(m_k + m_T + m_{k.п})g}{c_{\Pi}}; \\ f_2 = \Delta_{\sigma \text{ ст}} + \frac{(m_k + m_T + m_{k.п})g}{c_{\Pi}}; \\ f_3 = f_{\Pi \text{ ст}} = \frac{(m_k + m_T + m_{k.п})g}{c_{\Pi}}, \end{cases} \quad (7)$$

где 
$$\begin{cases} \Delta_{\text{ц ст}} = \frac{m_{\text{к}} g}{c_{\text{ц}}} = \text{const}; \\ \Delta_{\text{б ст}} = \frac{(m_{\text{к}} + m_{\text{т}}) g}{c_{\text{б}}} = \text{const} \end{cases} \quad - \text{статические прогибы центрального и буксового подвешива-}$$

ния железнодорожного подвижного состава. Отдельно рассмотрим последнее выражение в системе (7):

$$f_3 = \frac{(m_{\text{к}} + m_{\text{т}} + m_{\text{к.п}}) g}{c_0 (1 - 2\mu \cos 2\Omega t)} = \frac{f_0}{1 - 2\mu \cos 2\Omega t} \approx f_0 (1 + 2\mu \cos 2\Omega t), \quad (8)$$

здесь  $f_0 = \frac{m_{\text{к}} + m_{\text{т}} + m_{\text{к.п}}}{c_0} g$  – средний статический прогиб пути под статической нагрузкой от экипажа.

Формулы (7) тогда следует записать в виде:

$$\begin{cases} f_1 = \Delta_{\text{ц ст}} + \Delta_{\text{б ст}} + f_3; \\ f_2 = \Delta_{\text{б ст}} + f_3; \\ f_3 = f_0 (1 + 2\mu \cos 2\Omega t). \end{cases} \quad (9)$$

Отсюда нетрудно видеть, что переменные  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  являются функциями времени  $t$ , поэтому возьмем от уравнений (9) первую и вторую прямые производные по времени, в результате имеем:

$$\begin{cases} \dot{f}_1 = \dot{f}_2 = \dot{f}_3 = -4\mu\Omega f_0 \sin 2\Omega t; \\ \ddot{f}_1 = \ddot{f}_2 = \ddot{f}_3 = -8\mu\Omega^2 f_0 \cos 2\Omega t. \end{cases} \quad (10)$$

Подставляя выражения (4) и (10) в систему (3), после несложных преобразований получим математическую модель, описывающую вертикальные колебания подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары экипажа при движении по неравноупругому железнодорожному пути в продольном направлении с постоянной скоростью:

$$\begin{cases} m_{\text{к}} \ddot{q}_{\text{к}} + \beta_{\text{ц}} (\dot{q}_{\text{к}} - \dot{q}_{\text{т}}) + c_{\text{ц}} (q_{\text{к}} - q_{\text{т}}) = -m_{\text{к}} \ddot{f}_1; \\ m_{\text{т}} \ddot{q}_{\text{т}} - \beta_{\text{ц}} (\dot{q}_{\text{к}} - \dot{q}_{\text{т}}) + \beta_{\text{б}} (\dot{q}_{\text{т}} - \dot{q}_{\text{к.п}}) - c_{\text{ц}} (q_{\text{к}} - q_{\text{т}}) + c_{\text{б}} (q_{\text{т}} - q_{\text{к.п}}) = -m_{\text{т}} \ddot{f}_2; \\ m_{\text{к.п}} \ddot{q}_{\text{к.п}} - \beta_{\text{б}} (\dot{q}_{\text{т}} - \dot{q}_{\text{к.п}}) + \beta_{\text{п}} \dot{q}_{\text{к.п}} - c_{\text{б}} (q_{\text{т}} - q_{\text{к.п}}) + c_{\text{п}} q_{\text{к.п}} = -m_{\text{к.п}} \ddot{f}_3 + m_{\text{к.п}} \ddot{\eta} + \beta_{\text{п}} \dot{\eta} + c_{\text{п}} \eta. \end{cases} \quad (11)$$

Возмущение от геометрических неровностей железнодорожного пути, действующее лишь на колесную пару, в виде вектора записывается так:

$$\vec{\zeta}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ m_{к.п} \ddot{\eta} + \beta_{п} \dot{\eta} + c_0 \eta \end{pmatrix}, \quad (12)$$

а вектор воздействия от продольной, шпальной неравноупругости имеет вид:

$$\vec{\xi}(t) = - \begin{pmatrix} m_{к} \ddot{f}_1 \\ m_{т} \ddot{f}_2 \\ m_{к.п} \ddot{f}_3 \end{pmatrix} \quad (13)$$

и физически представляет собой переносные ускорения, действующие на кузов, тележку и колесную пару подвижного состава.

Вводя матрицы масс, диссипации и упругости

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \begin{pmatrix} m_{к} & 0 & 0 \\ 0 & m_{т} & 0 \\ 0 & 0 & m_{к.п} \end{pmatrix} = \text{diag}(m_{к}, m_{т}, m_{к.п}); \\ B = \begin{pmatrix} \beta_{ц} & -\beta_{ц} & 0 \\ -\beta_{ц} & \beta_{ц} + \beta_{\sigma} & -\beta_{\sigma} \\ 0 & -\beta_{\sigma} & \beta_{\sigma} + \beta_{п} \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} c_{ц} & -c_{ц} & 0 \\ -c_{ц} & c_{ц} + c_{\sigma} & -c_{\sigma} \\ 0 & -c_{\sigma} & c_{\sigma} + c_0 \end{pmatrix}; \\ \Lambda = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_0 \end{pmatrix}, \end{array} \right. \quad (14)$$

и вектор обобщенных координат

$$\vec{z} = \begin{pmatrix} q_{к} \\ q_{т} \\ q_{к.п} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

в конечном итоге приходим к форме записи дифференциальных уравнений (2). Проверяем условие малости диссипативных сил в подвижном составе [7]:

$$\frac{\|(A^{-1}B)^2\|}{\|A^{-1}C\|} = 0,321 \ll 1. \quad (16)$$

Здесь символ  $\|\dots\|$  означает евклидову норму матрицы. Действительно, недиагональные элементы матрицы коэффициентов диссипативных сил малы по сравнению с элементами, стоящими на главной диагонали. Это подтверждает вычисление отношения норм матриц (16), которое выполняем с помощью математического пакета Mathcad 13, в результате получаем  $0,321 \ll 1$ . Кроме того, колебания экипажа считаем малыми (это обычное допущение дисциплины «Динамика подвижного состава»), а движение колесной пары по рельсам – безотрывным.

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для нашего примера воспользуемся значениями инерционных, жесткостных и диссипативных параметров электровоза 2ЭС6 и железнодорожного пути.

Определяем собственные частоты консервативной системы с помощью стандартной функции математического пакета Mathcad 13  $\omega = \text{eigenvals}(A^{-1} \cdot C)$ , вычисляющей собственные векторы матрицы, в результате имеем данные, представленные в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Собственные частоты подпрыгиваний частей экипажа в консервативном случае

Кузов	Тележка	Колесная пара
7,7970 рад/с (1,2409 Гц)	24,5068 рад/с (3,900378 Гц)	130,5413 рад/с (20,7763 Гц)

Таблица 3 – Парциальные частоты подпрыгивания частей экипажа

Кузов	Тележка	Колесная пара
10,6381 рад/с (1,6931 Гц)	23,6341 рад/с (3,7614 Гц)	130,5016 рад/с (20,7699 Гц)

Из рассмотрения данных таблиц 2 и 3 следует, что ошибка парциальных частот может быть достаточно большой, так, например, если взять для сравнения данные по кузову экипажа, то различие достигает почти 36,439 %, а для тележки – 3,692 % и колесной пары – 0,03 %. Поэтому парциальные частоты можно, видимо, использовать только в экспертных оценках динамических качеств подвижного состава железных дорог России, но ошибка для кузова электровоза будет достаточно большой. Другой важной характеристикой колебательной механической системы является коэффициент колебаний, представленный в таблице 4.

Таблица 4 – Парциальные коэффициенты колебаний частей экипажа

Кузов	Тележка	Колесная пара
0,4662	0,4252	0,3488

Из анализа данных таблицы 4 можно сделать вывод о том, что колебания подпрыгивания кузова и тележки электровоза 2ЭС6 несколько передемпфированы, а колебания подпрыгивания колесной пары можно считать нормально демпфированными.

К данным, представленным в таблице 4, нужно подходить с той же меркой, о которой говорилось выше. Однако согласно критерию (16) диссипативные силы, действующие в экипаже, являются малыми. Это утверждение можно усилить рассмотрением матрицы парциальных коэффициентов колебаний, если ввести такое понятие:

$$\Delta = \begin{pmatrix} \frac{b_{1,1}}{2m_1\omega_{01}} & -\frac{b_{1,1}}{2m_1\omega_{01}} & 0 \\ -\frac{b_{1,1}}{2m_2\omega_{02}} & \frac{b_{2,2}}{2m_2\omega_{02}} & -\frac{b_{2,3}}{2m_2\omega_{02}} \\ 0 & -\frac{b_{2,3}}{2m_3\omega_{03}} & \frac{b_{3,3}}{2m_3\omega_{03}} \end{pmatrix},$$

значения этой матрицы таковы:

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$\Delta = \begin{pmatrix} 0,438188 & -0,438188 & 0 \\ -0,278057 & 0,422623 & -0,144566 \\ 0 & -0,04184 & 0,276344 \end{pmatrix}.$$

Нетрудно видеть, что при сравнении элементов главной диагонали матрицы, показанной выше, и данных таблицы 4 можно утверждать – парциальные коэффициенты колебаний кузова, тележки и колесной пары меняются несущественно.

Нормальная форма Коши в случае равноупругого железнодорожного пути такова:

$$G = \begin{pmatrix} 0 & E \\ -A^{-1}C & -A^{-1}B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -113,1703 & 113,1703 & 0 & -6,8332 & 6,8332 & 0 \\ 225,7143 & -558,5714 & 332,8571 & 13,6286 & -20,7143 & 7,0857 \\ 0 & 513,1444 & -17030,6688 & 0 & 10,9236 & -72,1485 \end{pmatrix}, (17)$$

для нее с помощью известного численного метода Фаддеева, реализованного в виде программы на языке программирования Mathcad, были найдены коэффициенты характеристического полинома электровоза 2ЭС6 (таблица 5).

Таблица 5 – Коэффициенты характеристического уравнения

Коэффициент	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>
Значения коэффициента	1	99,696	19660,937	516385,93	12295172,97	53120315,74	622207418,9

С использованием стандартной функции polyroots (...) математического пакета Mathcad были определены корни данного характеристического полинома экипажа (таблица 6).

Таблица 6 – Корни характеристического уравнения электровоза 2ЭС6

Элемент экипажа	Кузов	Тележка	Колесная пара
Корень	-1,2137 ± 7,8097i	-12,3911 ± 20,8115i	-36,2432 ± 125,1629i

Следует отметить, что корни характеристического полинома найдены для демпфированной механической системы. Поэтому мы можем оценить влияние вязкого трения электровоза как на коэффициенты колебания, так и на собственные частоты кузова, тележки и колесной пары. Коэффициенты колебания для кузова, тележки и колесной пары равны 0,155; 0,595 и 0,29 (они определяют максимальные, резонансные амплитуды колебаний элементов электровоза 2ЭС6). Если полученные цифры сравнить с данными таблицы 3, то нетрудно прийти к выводу о том, что кузов и колесная пара демпфированы нормально, а тележка экипажа немного передемпфирована. Другими словами, делать какие-либо выводы по парциальным величинам практически нельзя. Что касается собственных частот подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары, то имеем такие ошибки: 0,2 %; 17,8 %; 4,3 %. Причем собственная частота кузова несущественно выросла, а частота тележки и колесной пары уменьшилась.

Пользуясь уже указанным математическим пакетом Mathcad 13, перейдем в системе уравнений (11) к нормальным координатам с помощью матрицы нормированных собственных векторов системы  $V = \text{eigenvecs}(A^{-1} \cdot C)$ :

$$\begin{cases} \bar{z} = V\bar{x}; \text{ переход к нормальным координатам;} \\ \tilde{C} = V^{-1}A^{-1}CV = \text{diag}(\omega_{0к}, \omega_{0т}, \omega_{0к.п}); \\ \tilde{B} = V^{-1}A^{-1}BV; \\ \tilde{\Lambda} = V^{-1}A^{-1}\Lambda V; \\ \tilde{\zeta} = V^{-1}A^{-1}\bar{\zeta}; \\ \tilde{\xi} = V^{-1}A^{-1}\bar{\xi}. \end{cases} \quad (18)$$

Теперь можно написать окончательное выражение для математической модели, в которой действует как мультипликативное, так и аддитивное внешние воздействия:

$$E\ddot{\bar{x}} + \tilde{B}\dot{\bar{x}} + \tilde{C}\bar{x} + 2\mu\tilde{\Lambda}\bar{x} \cos 2\Omega t = \tilde{\zeta}(t) + \tilde{\xi}(t), \quad (19)$$

где  $E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \text{diag}(1, 1, 1)$  – единичная матрица;

$$\tilde{B} = \begin{pmatrix} 6,0757 & -7,1928 & -3,1671 \\ -12,4538 & 61,771087 & -14,1409 \\ -8,8787 & -22,8959 & 181,3932 \end{pmatrix} \text{ – матрица диссипативных коэффициентов для нор-}$$

мальных координат электровоза 2ЭС6;

$$\tilde{C} = \begin{pmatrix} 60,7948 & 0 & 0 \\ 0 & 600,5832 & 0 \\ 0 & 0 & 17041,03254 \end{pmatrix} = \text{diag}(60,7947; 600,5832; 17041,0325) \text{ – мат-}$$

рица жесткостных коэффициентов для нормальных координат электровоза (или квадратов собственных частот консервативной системы, когда  $B \equiv 0$ );

$$\tilde{\Lambda} = \begin{pmatrix} -0,950003 & -2,274797 & -74,792311 \\ -3,938624 & -9,431101 & -310,082129 \\ -209,671672 & -502,062276 & -16507,143299 \end{pmatrix} \text{ – матрица коэффициентов параметри-}$$

ческого возбуждения для нормальных координат электровоза.

Отсюда нетрудно видеть, что нормальные координаты не разделились, а связаны между собой через матрицы диссипативных коэффициентов и коэффициентов мультипликативного возмущения. Этого, разумеется, следовало ожидать: три матрицы практически никогда не приводятся к диагональным видам одновременно (известный математический факт).

Кроме указанной формы записи системы дифференциальных уравнений в виде (19) часто исследователями используется другая форма записи, имеющая вид:

$$E\ddot{\bar{q}} + \tilde{B}\dot{\bar{q}} + \tilde{C}(E + 2\mu\tilde{F} \cos 2\Omega t)\bar{q} = \tilde{\xi}(t) + \tilde{\zeta}(t), \quad (20)$$

где

$$\tilde{C}^{-1}V^{-1}A^{-1}\tilde{\Lambda}V = \tilde{F} = \begin{pmatrix} -0,0156 & -0,0374 & -1,2302 \\ -0,00656 & -0,0157 & -0,5163 \\ -0,0123 & -0,0295 & -0,9687 \end{pmatrix} \text{ – матрица коэффициентов пара-}$$

метрического возмущения; другие матрицы были расшифрованы выше.

Преимущество последней формы записи заключается в том, что для нее уже найдены с помощью метода малого параметра формулы для определения границ простых и комбинационных параметрических резонансов в первом приближении. Так, для главных областей неустойчивости (параметрических резонансов) имеем [5 – 7]:

простые параметрические резонансы:

$$\Omega_{1,2} \approx \omega_k \left( 1 \pm \sqrt{\mu^2 \tilde{f}_{k,k}^2 - 4\gamma_k^2} \right) \quad (k = 1, 2, 3); \quad (21)$$

комбинационные резонансы суммарного типа:

$$\Omega_{1,2} \approx \frac{\omega_i + \omega_k}{2} \pm \frac{\gamma_i \omega_i + \gamma_k \omega_k}{4\sqrt{\gamma_i \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 \tilde{f}_{i,k} \tilde{f}_{k,i} - 4\gamma_i \gamma_k} \quad (i, k = 1, 2, 3); \quad (22)$$

комбинационные резонансы разностного типа:

$$\Omega_{1,2} \approx \frac{|\omega_i - \omega_k|}{2} \pm \frac{|\gamma_i \omega_i - \gamma_k \omega_k|}{4\sqrt{\gamma_i \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 |\tilde{f}_{i,k} \tilde{f}_{k,i}| - 4\gamma_i \gamma_k} \quad (i, k = 1, 2, 3). \quad (23)$$

Здесь введенный в формулы (21) – (23) коэффициент  $\gamma$  является парциальным коэффициентом колебания  $\gamma_i = b_{i,i}/\omega_i$  (так, например, для одноступенной механической системы это есть  $\delta = n/\omega_0$ ).

Для рассматриваемого подвижного состава вектор  $\gamma$ :

$$\vec{\gamma} = \begin{pmatrix} 0,311 \\ 1,187 \\ 0,579 \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Чтобы разобраться с комбинационными параметрическими резонансами суммарного или разностного типа, составим матрицу произведений:

$$\begin{pmatrix} f_{1,1}^2 & f_{1,2}f_{2,1} & f_{1,3}f_{3,1} \\ f_{2,1}f_{2,1} & f_{2,2}^2 & f_{2,3}f_{3,2} \\ f_{3,1}f_{1,3} & f_{3,2}f_{2,3} & f_{3,3}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,000244 & 0,000245 & 0,015137 \\ 0,000245 & 0,000247 & 0,015211 \\ 0,015137 & 0,015211 & 0,938322 \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Критические коэффициенты параметрического возбуждения определяются из условий равенства нулю подкоренных выражений в формулах (21) – (23), в результате найдем матрицу:

$$\mu_{кр} = \begin{pmatrix} 1273,762 & 2475,809 & 28,046 \\ 2475,809 & 4812,223 & 54,513 \\ 28,046 & 54,513 & 0,618 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

По главной диагонали стоят критические коэффициенты параметрического возбуждения для кузова, тележки и колесной пары электровоза 2ЭС6 для простых параметрических резонансов соответственно. Матрица (26) симметрична относительно главной диагонали, ибо совершенно не имеет значения, как выразится комбинационный параметрический резонанс суммарного или разностного типа для кузова и тележки (или тележки и кузова), кузова и колесной пары (или колесной пары и кузова), тележки и колесной пары (или колесной пары и тележки). Следовательно, нижнюю часть матрицы (26) можно просто обнулить.

Из рассмотрения матрицы (26) следует такой вывод: простые параметрические резонансы на экипаже не возникают, так как критические коэффициенты параметрического возбуждения чрезвычайно большие – от 0,618 до 1273,762, более того, и комбинационные параметрические резонансы любого типа также не развиваются потому, что для их возбуждения нужны очень большие коэффициенты параметрического воздействия – от 28,046 до 2475,809. Отметим, что наименьшие значения коэффициента параметрического воздействия всегда меньше для колесной пары (см. третий столбец матрицы (26)).

Зона динамической неустойчивости для колесной пары экипажа показана на рисунке 4.

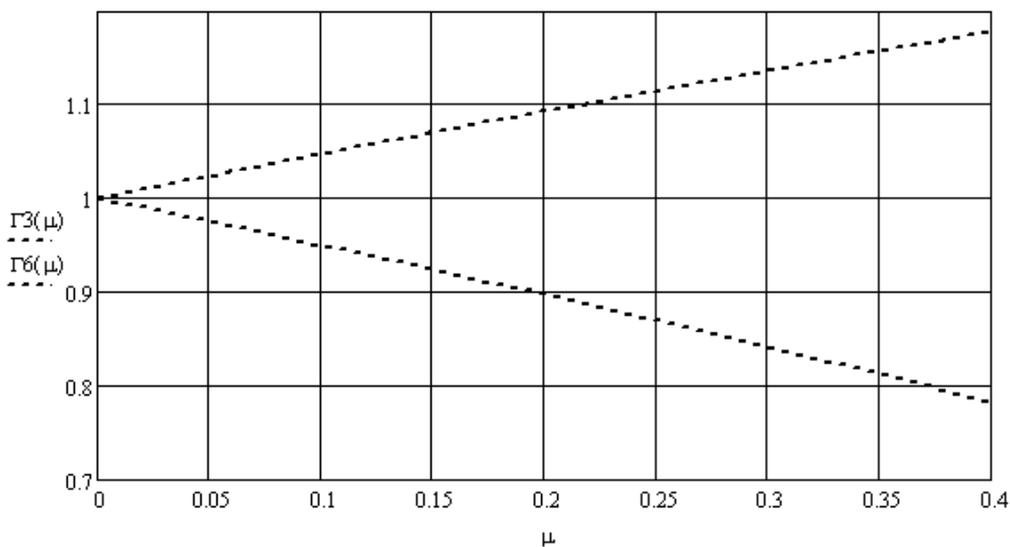


Рисунок 4 – Область простого параметрического резонанса колесной пары электровоза 2ЭС6 в консервативном случае

Следует указать на такой факт: внутри зоны, очерченной пунктирными кривыми, с высокой долей вероятности может развиваться взаимодействие параметрически возбуждаемых и вынужденных колебаний от действия геометрических неровностей на поверхностях катания рельсов. В этой зоне вынужденная амплитуда колебаний колесной пары электровоза может увеличиваться или уменьшаться за счет неравноупругости железнодорожного пути, характер воздействия определяется сдвигом фаз между вынужденными и параметрическими колебаниями.

Перейдем в выражениях (21) – (23) к скорости движения экипажа, в результате получим такие формулы:

$$V_{k1,2} \approx \frac{3,6l_{шп}}{\pi} \omega_k \left( 1 \pm \sqrt{\mu^2 \tilde{f}_{k,k}^2 - 4\gamma_k^2} \right) \quad (k=1, 2, 3); \quad (27)$$

$$V_{ik1,2} \approx \frac{3,6l_{\text{шп}}}{\pi} \left[ \frac{\omega_i + \omega_k}{2} \pm \frac{\gamma_i \omega_i + \gamma_k \omega_k}{4\sqrt{\gamma_i \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 \tilde{f}_{i,k} \tilde{f}_{k,i} - 4\gamma_i \gamma_k} \right] \quad (i, k = 1, 2, 3); \quad (28)$$

$$V_{ik1,2} \approx \frac{3,6l_{\text{шп}}}{\pi} \left[ \frac{|\omega_i - \omega_k|}{2} \pm \frac{|\gamma_i \omega_i - \gamma_k \omega_k|}{4\sqrt{\gamma_i \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 |\tilde{f}_{i,k} \tilde{f}_{k,i}| - 4\gamma_i \gamma_k} \right] \quad (i, k = 1, 2, 3). \quad (29)$$

На рисунке 5 представлена зона изменения скорости движения экипажа для простого параметрического резонанса колесной пары электровоза 2ЭС6 в консервативном случае.

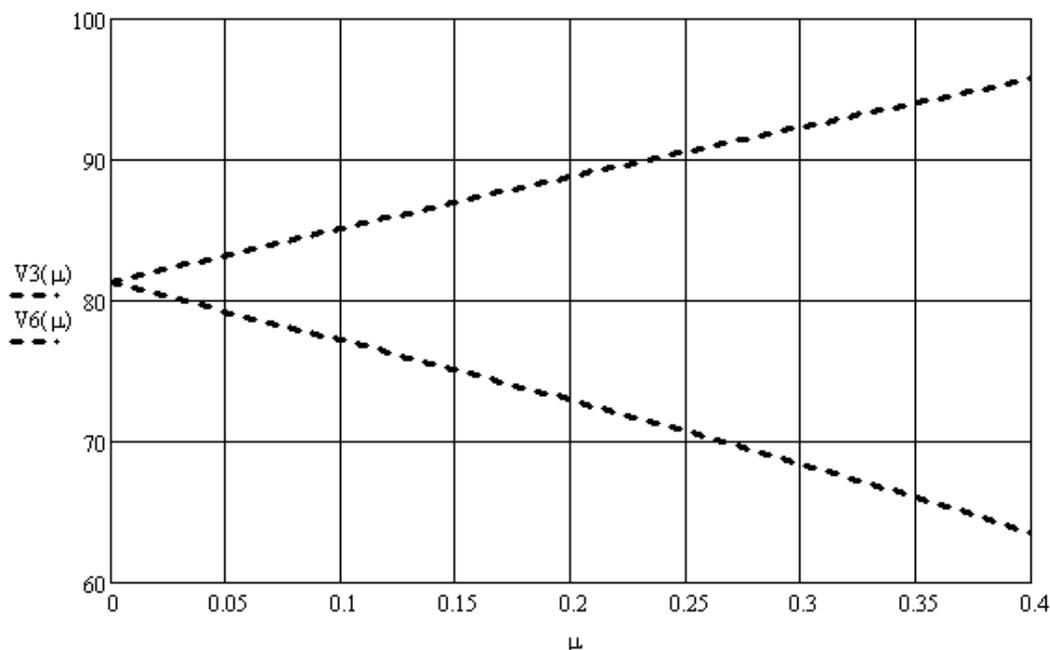


Рисунок 5 – Область скоростей экипажа, в которой будут взаимодействовать вынужденные и параметрически возбуждаемые колебания в консервативном случае для электровоза 2ЭС6

Расчетом установлено, что критические коэффициенты параметрического возбуждения (в смысле, что подкоренные выражения должны быть положительными или равными нулю) для простых параметрических резонансов кузова, тележки и колесной пары значительно больше единицы. Следовательно, в чистом виде простых параметрических резонансов на железнодорожном подвижном составе не существует, так как коэффициент параметрического возбуждения  $\mu$ , зарегистрированный на практике, находится в пределах 0,04 – 0,06. Но это не означает, что можно забыть о продольной неравноупругости железнодорожного пути, ибо существует возможность взаимодействия параметрически возбуждаемых и вынужденных колебаний. Причем из рисунка 5 очевидно, что взаимодействие параметрически возбуждаемых и вынужденных колебаний будет происходить в зоне эксплуатационных скоростей движения поездов.

Аналогичные графики изменения границ зон параметрического резонанса в консервативном случае для электровоза ЭП2К показаны на рисунках 6 – 8.

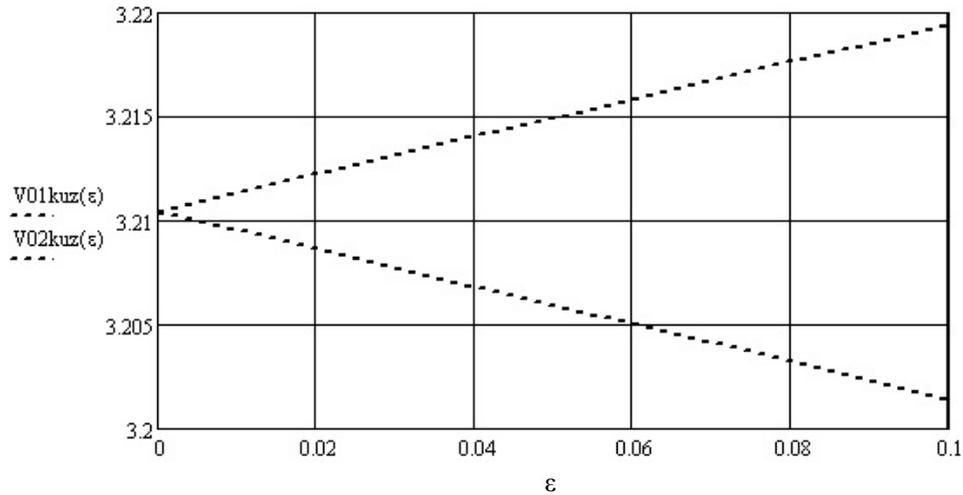


Рисунок 6 – Главная область неустойчивости кузова ЭП2К для консервативного случая, км/ч

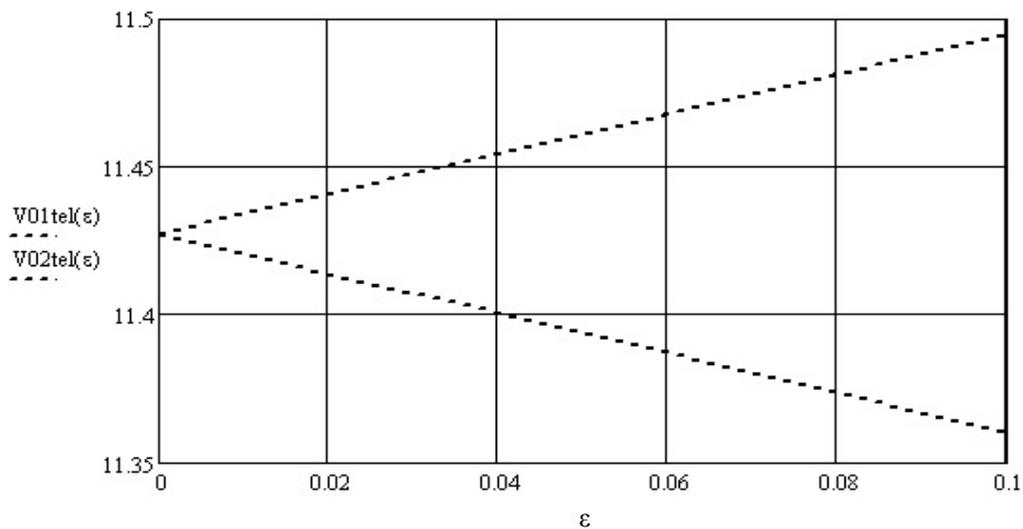


Рисунок 7 – Главная область неустойчивости тележки ЭП2К в консервативном случае, км/ч

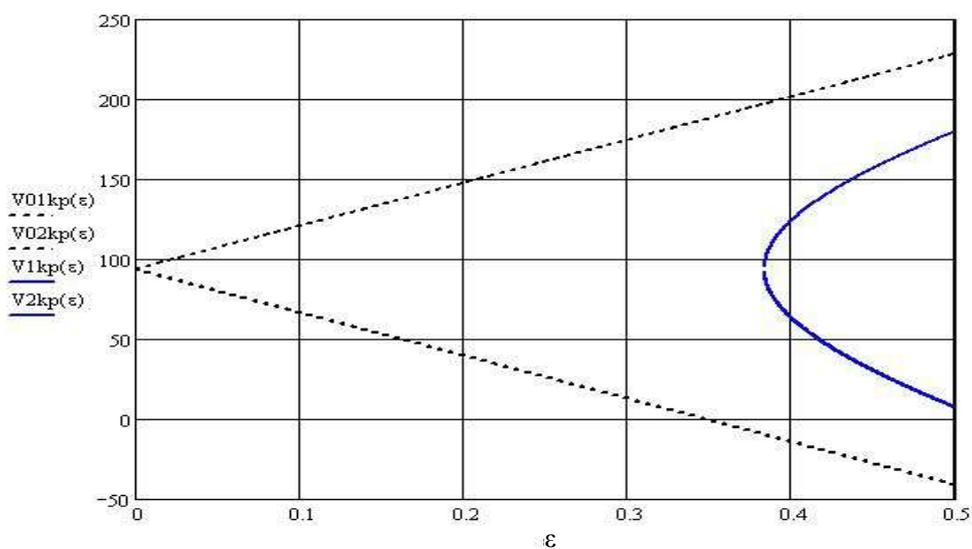


Рисунок 8 – Главная область неустойчивости колесной пары ЭП2К: пунктирная кривая для консервативного случая, сплошная кривая для диссипативного случая, км/ч

Из приведенных на рисунках 6 и 7 графиков можно сделать очевидный вывод о том, что резонансные скорости кузова и тележки электровоза ЭП2К находятся значительно ниже зоны эксплуатационных скоростей. Да и диссипативные силы в локомотиве таковы, что критические значения коэффициентов параметрического возмущения чрезвычайно велики (об этом речь пойдет далее).

Из рисунка 8 следует, что колесная пара может находиться в области главного параметрического резонанса, но он в чистом виде невозможен, ибо критическое значение коэффициента мультипликативного возбуждения все же достаточно высоко и равно 0,3844.

Кроме приведенных выше исследований было выполнено численное интегрирование дифференциального уравнения движения колесной пары электровоза по неравноупругому пути в Сибирском регионе. На рисунке 9 показано изменение жесткости пути, полученное экспериментально.

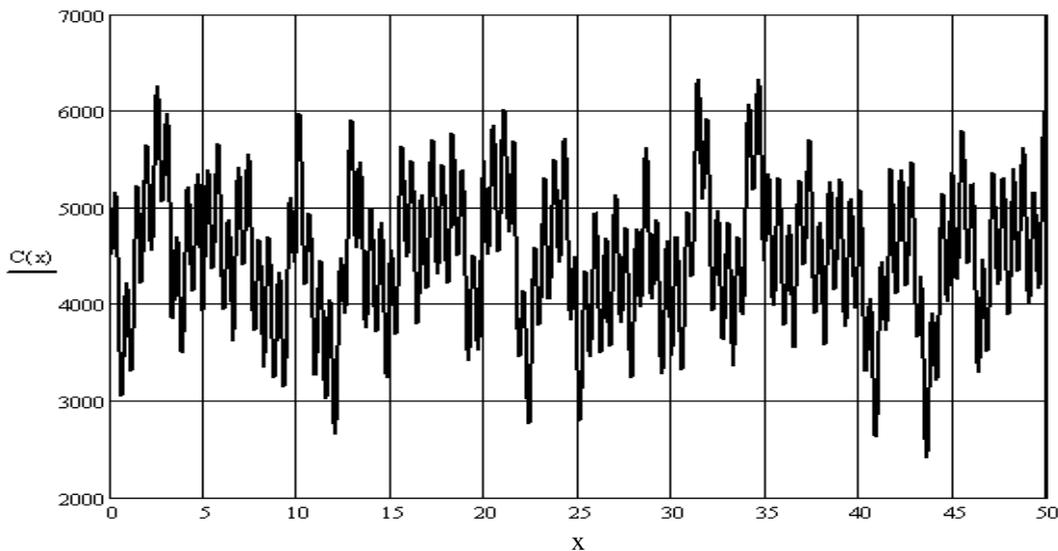


Рисунок 9 – Изменение жесткости железнодорожного пути в Сибирском регионе, тс/м

Из рисунка 9 видно, что жесткость железнодорожного пути содержит в своем составе не только шпальную неравноупругость, но и другие гармоники. Отметим, что жесткость пути хорошо аппроксимируется рядом Фурье с числом гармоник 128. Средняя жесткость пути составляет 6870 тс. Система дифференциальных уравнений колебания колесной пары в форме Коши имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2; \\ \dot{z}_2 = \frac{P_{ст}}{m} - 2nz_2 - k_0^2 \left( 1 - 2\mu\xi \left( \frac{Vt}{3,6} \right) \right) z_1, \end{cases} \quad (30)$$

где  $P_{ст} = 25$  – статическое давление колесной пары на путь, тс;  $n = 29,653$  – коэффициент демпфирования колесной пары;  $k_0 = 118,612$  – собственная частота подпрыгивания колесной пары, рад/с;  $V$  – скорость движения, км/ч; 3,6 – переводной коэффициент из километров в час в метры в секунду. Результаты математического моделирования приведены на рисунках 10 и 11.

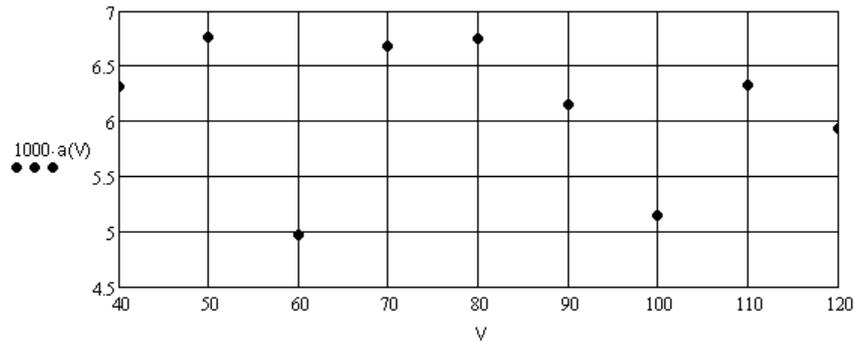


Рисунок 10 – Максимальные значения амплитуды колебаний подпрыгивания колесной пары в Сибирском регионе, мм

Значения амплитуды колебаний подпрыгивания находятся в пределах от 5 до 7 мм. Нетрудно обнаружить три пика амплитуды на скоростях 50, 80 и 110 км/ч. Для нахождения непрерывного графика, видимо, необходимо шаг скорости сделать меньше 10 км/ч.

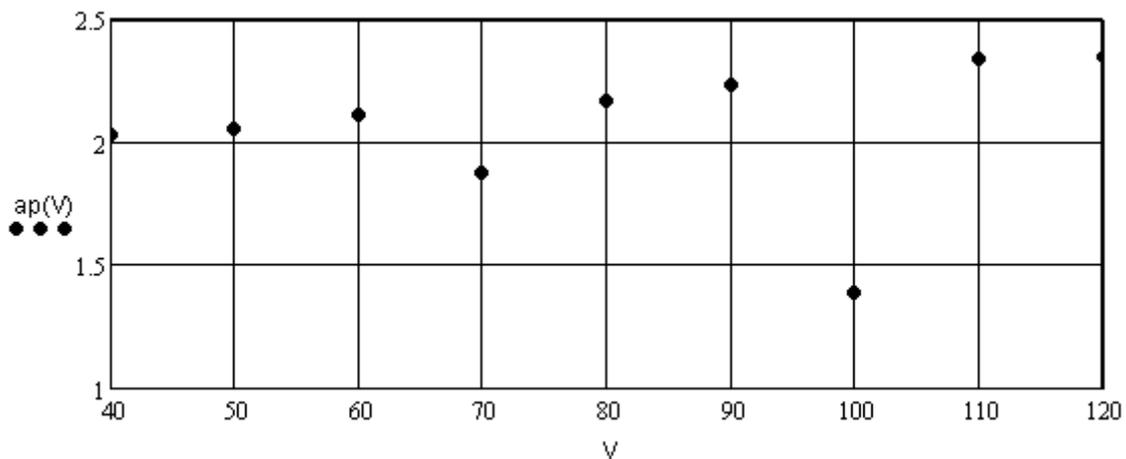


Рисунок 11 – Абсолютное ускорение колесной пары электровоза в Сибирском регионе в долях  $g$

В известном сборнике научных трудов ЦНИИ МПС [27] отмечено, что колесная пара экипажа совершает ровно столько колебаний подпрыгивания, сколько шпал на рельсовом звене, и что ускорение колесной пары в середине рельсового звена составляет порядка  $2 - 3g$ . Таким образом, продольная неравноупругость железнодорожного пути должна регламентироваться, как это было сделано с геометрической неровностью на поверхности катания рельсов (лимитирован градиент неровности).

Относительно комбинационных параметрических резонансов суммарного или разностного типов можно утверждать, что, во-первых, в консервативных системах они в принципе не могут возникнуть и развиваться и, во-вторых, критические коэффициенты параметрического возбуждения комбинационных резонансов чрезвычайно высоки (см. недиагональные элементы матрицы (26)).

У не совсем искушенного исследователя, вероятно, возникнет вопрос – зачем мы переходим в другую парадигму, если ничего в чистом виде нельзя наблюдать. Ответ на этот «немой» вопрос такой.

Во-первых, при исследовании учтена только продольная, шпальная неравноупругость железнодорожного пути. Также хорошо известно из работ ученых ДИИТа (ныне ДНУИЖТа), что имеются и другие длины скрытых периодичностей в спектральной плотности жесткости пути и по величине они гораздо больше междушпального расстояния. Следовательно, на них могут среагировать как кузов, так и тележка экипажа.

Во-вторых, нельзя забывать о том, что продольная, шпальная неравноупругость железнодорожного пути создает кроме мультипликативного еще и аддитивное возмущение в правой части (это переносные ускорения соответствующих частей экипажа).

Кроме того, в зонах простых параметрических колебаний обычно возможно возникновение и развитие явления взаимодействия параметрически возбуждаемых и чисто вынужденных колебаний (в рассматриваемом случае внешнее возмущение должно содержать скрытую периодичность с длиной волны, равной, например, двум междушпальным расстояниям).

Профессорами М. Ф. Вериго и А. Я. Коганом на основании анализа ими осциллограмм записей колебаний необрессоренных масс подвижного состава высказано утверждение [28], что последние совершают около 50 колебаний при движении по рельсам длиной 25 м. Следовательно, наличие шпал – это главный источник вынужденных колебаний неподдресоренных масс подвижного состава железных дорог.

Главный вопрос – как учесть шпальную неравноупругость железнодорожного пути в математических моделях динамики подвижного состава. Математика утверждает, что данное внешнее воздействие должно входить мультипликативным образом в левые части дифференциальных уравнений и аддитивным образом в их правые части [1]. Так как поведение дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами и с параметрическими коэффициентами принципиально разные, то заменить продольную неравноупругость пути некоторой так называемой эквивалентной геометрической неровностью весьма проблематично. Расширять понятие «эквивалентная» не представляется возможным.

Таким образом, остаются пока не разрешенными две проблемы – это влияние продольной неравноупругости железнодорожного пути на случайное возмущение, действующее со стороны пути на колесные пары (прохождение геометрических неровностей). Конечно же, математической моделью такой задачи является система дифференциальных уравнений (18), когда в правой части отсутствует аддитивное возмущение от продольной неравноупругости пути. Это во-первых.

Во-вторых, необходимо, на наш взгляд, нормировать продольную неравноупругость пути, как это уже сделано для геометрической неровности, где нормируется ее градиент. Математическая модель для решения данного вопроса также выводится из системы дифференциальных уравнений (18) с учетом того, что геометрических неровностей на пути нет. Напоминаем, что хотя исходная математическая модель является параметрической, она остается линейной и для нее справедлив принцип суперпозиции.

В-третьих, развитие такой науки, как «Динамика подвижного состава», требует этого, что в конечном счете позволит оценить погрешности ныне используемых математических моделей (теперь уже приближенных).

### *Список литературы*

1. Нехаев, В. А. Неравноупругость железнодорожного пути как возмущающий фактор / В. А. Нехаев, Р. Д. Сабилов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2013. – № 3 (15). – С. 42–54.
2. Нехаев, В. А. Особенности составления математической модели условной двухосной тележки, движущейся по неравноупругому железнодорожному пути в продольном направлении / В. А. Нехаев, Р. Д. Сабилов. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение качества подвижного состава : материалы всерос. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 185–191.
3. Нехаев, В. А. Взаимодействие экипажа с квазиинвариантной системой подвешивания и неравноупругого по протяженности пути : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нехаев Виктор Алексеевич ; Омский ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Омск, 1983. – 217 с. – Текст : непосредственный.

4. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – Москва : ГИТТЛ, 1956. – 600 с. – Текст : непосредственный.
5. Диментберг, М. Ф. Случайные процессы в динамических системах с переменными параметрами / М. Ф. Диментберг. – Москва : Наука, 1989. – 176 с. – Текст : непосредственный.
6. Болотин, В. В. Случайные колебания упругих систем / В. В. Болотин. – Москва : Наука, 1979. – 336 с. – Текст : непосредственный.
7. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. / пред. ред. совета В. Н. Челомей. – Т.1. Колебания линейных систем / под ред. В. В. Болотина. – Москва : Машиностроение, 1978. – 352 с. – Текст : непосредственный.
8. Понтрягин, Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Л. С. Понтрягин. – Москва : Наука, 1970. – 332 с. – Текст : непосредственный.
9. Смирнов, В. И. Курс высшей математики : в 5 т. – Москва : Наука, 1974. – Т. 2. – 656 с. – Текст : непосредственный.
10. Пахомов, М. П. Воздействие электровоза на путь в зоне стыка / М. П. Пахомов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1957. – № 4. – С. 30–34.
11. Пахомов, М. П. Экспериментальные исследования колебаний электровозов и их воздействия на путь / М. П. Пахомов. – Текст : непосредственный // Науч. тр. МИИТа. – 1958. – Вып. 108. – С. 44–64.
12. Панькин, Н. А. Колебательные движения экипажей при параметрическом возмущении / Н. А. Панькин, И. М. Стесин, В. П. Ценов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1978. – № 1. – С. 27–30.
13. Панькин, Н. А. Вертикальные колебания экипажа, возникающие при движении по неравноупругому пути / Н. А. Панькин, И. М. Стесин, Ю. Г. Беленькая. – Текст : непосредственный // Науч. тр. МИИТа. – 1979. – Вып. 640. – С. 24–32.
14. Бурчак, Г. П. Колебания неподрессоренной массы на неравноупругом пути с неровностями / Г. П. Бурчак. – Текст : непосредственный // Науч. тр. Академии коммун. хоз-ва им. К. Л. Памфилова. – Москва : Транспорт, 1980. – Вып. 175. – С. 84–98.
15. Гавриленко, А. К. Планирование подъемочного ремонта и планово-предупредительной выправки железнодорожного пути с учетом критерия неравноупругости : специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гавриленко Александр Константинович ; Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2007. – 121 с. – Текст : непосредственный.
16. Привалов, С. В. Влияние жесткости подрельсового основания на взаимодействие экипажа и пути : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Привалов Сергей Владимирович ; ВНИИЖТ. – Москва, 2004. – 118 с. – Текст : непосредственный.
17. Фришман, М. А. Влияние эпюры укладки железобетонных шпал на работу элементов пути / М. А. Фришман, И. С. Леванков, В. В. Говоруха. – Текст : непосредственный // Науч. тр. ДИИТа. – 1965. – Вып. 57. – С. 21–28.
18. Леванков, И. С. Влияние неравножесткости пути на шпалах и междушпальных пролетах на силы взаимодействия пути и подвижного состава / И. С. Леванков. – Текст : непосредственный // Науч. тр. ДИИТа. – 1965. – Вып. 57. – С. 63–79.
19. Фришман, М. А. Еще раз к вопросу об определении модуля упругости подрельсового основания / М. А. Фришман, И. С. Леванков. – Текст : непосредственный // Науч. тр. ДИИТа. – 1965. – Вып. 57. – С. 4–8.
20. Леванков, И. С. О выборе расчетных значений модуля упругости подрельсового основания / И. С. Леванков. – Текст : непосредственный // Науч. тр. ДИИТа. – 1967. – Вып. 78. – С. 83–88.

21. Леванков, И. С. Исследование влияния изменения жесткости вдоль звена пути на характер и силы взаимодействия пути и подвижного состава / И. С. Леванков. – Текст : непосредственный // Науч. тр. ДИИТа. – 1969. – Вып. 99. – С. 76–93.

22. Леванков, И. С. Качественный анализ свободных колебаний системы «неподдрессоренная масса – путь» при периодическом изменении жесткости пути по его длине / И. С. Леванков. – Текст : непосредственный // Науч. тр. ДИИТа. – 1972. – Вып. 138. – С. 57–73.

23. Фришман, М. А. Исследование особенностей изменения вертикальной жесткости пути по его длине / М. А. Фришман, И. С. Леванков. – Текст : непосредственный // Науч. тр. ДИИТа. – 1972. – Вып. 138. – С. 48–57.

24. Леванков, И. С. К вопросу определения величины вертикальной силы, действующей от колеса на рельс в динамике / И. С. Леванков. – Текст : непосредственный // Науч. тр. ДИИТа. – 1973. – Вып. 142. – С. 95–103.

25. Фришман, М. А. Об особенностях изменения вертикальной жесткости вдоль пути с тяжелым типом верхнего строения / М. А. Фришман, И. С. Леванков. – Текст : непосредственный // Науч. тр. ДИИТа. – 1973. – Вып. 142. – С. 3–10.

26. Теоретические и натурно-экспериментальные исследования динамических процессов взаимодействия подвижного состава и пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях зимой и летом : отчет о НИР (заключит.) / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп.; Руководитель М. П. Пахомов. № ГР 76005445; Инв. № Б862362. – Омск, 1980. – 198 с. – Текст : непосредственный.

27. Тележечные экипажи локомотивов для повышенных скоростей движения / Науч. тр. ВНИИЖТа / под ред. К.П. Королева. – Москва : Трансжелдориздат, 1962. – 304 с. – Текст : непосредственный.

28. Вериги, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериги, А. Я. Коган; под ред. М. Ф. Вериги. – Москва : Транспорт, 1986. – 559 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. Nekhaev V. A., Sabirov R. D. Irregular resilience railway track as a disturbing factor [Neravnouprugost' zheleznodorozhnogo puti kak vozmushchaiushchii faktor]. *Izvestiia Transsiba – The Journal Of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 3 (15), pp. 42 – 54.

2. Nekhaev V. A., Sabirov R. D. Features of drawing up a mathematical model of a conditional biaxial trolley moving along an unequally elastic railway track in the longitudinal direction [Osobnosti sostavleniia matematicheskoi modeli uslovnoi dvukhosnoi telezhki, dvizhushcheisia po neravnouprugomu zheleznodorozhnomu puti v prodol'nom napravlenii]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie kachestva podvizhnogo sostava : materialy vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Technological maintenance of repair and quality improvement of rolling stock : materials of the All-Russian conference with international participation). – Омск, 2013, pp. 185 – 191.

3. Nekhaev V. A. *Vzaimodeistvie ekipazha s kvaziinvariantnoi sistemoi podveshivaniia i neravnouprugogo po protiazhennosti puti* (Interaction of the crew with a quasi-invariant suspension system and an unequally elastic path along the length). Doctor's thesis, Омск, Омск Institute of Railway Transport Engineers, 1983, 217 p.

4. Bolotin V. V. *Dinamicheskaiia ustoichivost' uprugikh system* (Dynamic stability of elastic systems). Moscow: GITTL Publ., 1956, 600 p.

5. Dimentberg M. F. *Sluchainye protsessy v dinamicheskikh sistemakh s peremennymi parametrami* (Random processes in dynamic systems with variable parameters). Moscow: Nauka Publ., 1989, 176 p.

6. Bolotin V. V. *Sluchainnye kolebaniia uprugikh system* (Random oscillations of elastic systems). Moscow: Nauka Publ., 1979, 336 p.

7. Chelomei V. N. ed. *Vibratsii v tekhnike: spravochnik: v 6 tomakh. T. 1. Kolebaniia lineinykh system* (Vibrations in engineering: handbook: in 6 volumes. Vol. 1. Vibrations of linear systems). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978, 352 p.
8. Pontriagin L. S. *Obyknovennye differentsial'nye uravneniia* (Ordinary differential equations). Moscow: Nauka Publ., 1970, 332 p.
9. Smirnov V. I. *Kurs vysshei matematiki : v 5 tomakh T. 1.* (The course of higher mathematics: in 5 volumes Vol. 1.). Moscow: Nauka Publ., 1974, 656 p.
10. Pakhomov M. P. The impact of an electric locomotive on the track in the junction area [Vozdeistvie elektrovoza na put' v zone styka]. *Vestnik VNIIZhTa – Bulletin of VNIIZHT*, 1957, no. 4, pp. 30 – 34.
11. Pakhomov M. P. Experimental studies of electric locomotives' vibrations and their impact on the track [Eksperimental'nye issledovaniia kolebaniia elektrovozov i ikh vozdeistviia na put']. *Nauchnye trudy MIITa – Scientific works of MIIT*, 1958, issue 108, pp. 44 – 64.
12. Pan'kin N. A., Stesin I. M., Tsenov V. P. Oscillatory movements of crews under parametric perturbation [Kolebatel'nye dvizheniia ekipazhei pri parametricheskom vozmushchenii]. *Vestnik VNIIZhTa – Bulletin of VNIIZHT*, 1978, no. 1, pp. 27 – 30.
13. Pan'kin N. A., Stesin I. M., Belen'kaia Iu. G. Vertical vibrations of the crew that occur when moving along an unevenly elastic path []. *Nauchnye trudy MIITa – Scientific works of MIIT*, 1979, issue 640, pp. 24 – 32.
14. Burchak G. P. Fluctuations of unsprung mass on an unevenly elastic path with irregularities [Kolebaniia nepodressorennoi massy na neravnouprugom puti s nerovnostiami]. *Nauchnye trudy akademii kommunal'nogo khoziaistva im. K. L. Pamfilova – Scientific works of the K. L. Pamfilov Academy of Public Utilities*, 1980, issue 175, pp. 84 – 98.
15. Gavrilenko A. K. *Planirovanie pod"emochnogo remonta i planovo-predupreditel'noi vypravki zheleznodorozhnogo puti s uchetom kriteriia neravnouprugosti* (Planning of lifting repairs and planned preventive alignment of the railway track, taking into account the criterion of non-elasticity). Doctor's thesis, Ekaterinburg, USURT, 2007, 121 p.
16. Privalov S. V. *Vliianie zhestkosti podrel'sovogo osnovaniia na vzaimodeistvie ekipazha i puti* (The effect of the rigidity of the sub-rail base on the interaction of the crew and the track). Doctor's thesis, Moscow, VNIIZHT, 2004, 118 p.
17. Frishman M. A., Levankov I. S., Govorukha V. V. Influence of the plot of laying reinforced concrete sleepers on the work of the track elements [Vliianie epiury ukladki zhelezobetonnykh shpal na rabotu elementov puti]. *Nauchnye trudy DIITa – Scientific works of DIIT*, 1965, issue 57, pp. 21 – 28.
18. Levankov I. S. The influence of the non-rigidity of the track on sleepers and interspan spans on the interaction forces of the track and rolling stock [Vliianie neravnozhestkosti puti na shpalakh i mezhdushpal'nykh proletakh na sily vzaimodeistviia puti i podvizhnogo sostava]. *Nauchnye trudy DIITa – Scientific works of DIIT*, 1965, issue 57, pp. 63 – 79.
19. Frishman M. A., Levankov I. S. Once again to the question of determining the modulus of elasticity of the sub-rail base [Eshche raz k voprosu ob opredelenii modulua uprugosti podrel'sovogo osnovaniia]. *Nauchnye trudy DIITa – Scientific works of DIIT*, 1965, issue 57, pp. 4 – 8.
20. Levankov I. S. On the choice of calculated values of the elastic modulus of the sub-rail base [O vybore raschetnykh znachenii modulua uprugosti podrel'sovogo osnovaniia]. *Nauchnye trudy DIITa – Scientific works of DIIT*, 1967, issue 78, pp. 83 – 88.
21. Levankov I. S. Investigation of the effect of changes in stiffness along the link of the track on the nature and strength of the interaction of the track and rolling stock [Issledovanie vliianiia izmeneniia zhestkosti vdol' zvena puti na kharakter i sily vzaimodeistviia puti i podvizhnogo sostava]. *Nauchnye trudy DIITa – Scientific works of DIIT*, 1969, issue 99, pp. 76 – 93.
22. Levankov I. S. Qualitative analysis of free oscillations of the unsprung mass – path system with periodic changes in the stiffness of the path along its length [Kachestvennyi analiz svobodnykh

kolebanii sistemy «nepodressorennaiia massa – put'» pri periodicheskom izmenenii zhestkosti puti po ego dline]. *Nauchnye trudy DIITa – Scientific works of DIIT*, 1972, issue 138, pp. 57 – 73.

23. Frishman M. A., Levankov I. S. Investigation of the peculiarities of changing the vertical stiffness of the path along its length [Issledovanie osobennosti izmeneniia vertikal'noi zhestkosti puti po ego dline]. *Nauchnye trudy DIITa – Scientific works of DIIT*, 1972, issue 138, pp. 48 – 57.

24. Levankov I. S. On the issue of determining the magnitude of the vertical force acting from the wheel to the rail in dynamics [K voprosu opredeleniia velichiny vertikal'noi sily, deistvuiushchei ot kolesa na rel's v dinamike]. *Nauchnye trudy DIITa – Scientific works of DIIT*, 1973, issue 142, pp. 95 – 103.

25. Frishman M. A., Levankov I. S. About the peculiarities of the change in vertical stiffness along the path with a heavy type of upper structure [Ob osobennostiakh izmeneniia vertikal'noi zhestkosti vdol' puti s tiazhelym tipom verkhnego stroeniia]. *Nauchnye trudy DIITa – Scientific works of DIIT*, 1973, issue 142, pp. 3 – 10.

26. *Teoreticheskie i naturno-eksperimental'nye issledovaniia dinamicheskikh protsessov vzaimodeistviia podvizhnogo sostava i puti v vertikal'noi i gorizontal'noi ploskostiakh zimoi i letom: otchet o NIR (zakliuchitel'nyi)* [Theoretical and field-experimental studies of dynamic processes of interaction of rolling stock and track in vertical and horizontal planes in winter and summer: research report (final)]. Head M. P. Pakhomov. Omsk, Omsk Institute of Railway Transport Engineers, 1980, 198 p.

27. Korolev K. P. ed. *Telezhechnye ekipazhi lokomotivov dlia povyshennykh skorostei dvizheniia. Nauchnye trudy VNIIZhTa* (Bogie carriages of locomotives for increased speeds. Scientific works of VNIIZhT). Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1962, 304 p.

28. Verigo M. F., Kogan A. Ia., Verigo M. F. ed. *Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava* (Interaction of track and rolling stock). Moscow: Transport Publ., 1986, 559 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Нехаев Виктор Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7(3812) 37-60-82, +7(3812) 31-16-88.

E-mail: NehaevVA@rambler.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Nekhaev Viktor Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the department «Theoretical and applied mechanics», OSTU.

Phone: +7(3812) 37-60-82, +7(3812) 31-16-88.

E-mail: NehaevVA@rambler.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Нехаев, В. А. Действие продольной шпальной неравноупругости пути на устойчивость движения электровозов / В. А. Нехаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 2 – 22.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nekhaev V. A. The effect of longitudinal sleeper un-stiffness of the railway to the stability of the movement of electric locomotives. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 3 (47), pp. 2 – 22 (In Russian).

**А. Т. Джаникулов, М. Ш. Валиев**

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В РЕЖИМЕ ЗАПУСКА ДИЗЕЛЯ ТЕПЛОВОЗОВ ТИПА UzTE16M

**Аннотация.** Перед железнодорожным транспортом стоят задачи не только по бесперебойному обеспечению перевозок народнохозяйственных грузов, но и по освоению новых локомотивов и повышению экономичности их использования. В частности, принятый в настоящее время режим запуска дизеля тепловозов типа UzTE16M приводит к дополнительному расходу топливных ресурсов, поэтому исследования по разработке и улучшению условий запуска дизелей тепловозов данного типа являются актуальными. На основании изучения проведенных ранее исследований и конструкций различных систем с целью облегчения запуска дизелей тепловозов с электрической передачей необходимо установить имеющиеся резервы силовой цепи и цепей управления. В статье рассмотрена математическая модель крутильных колебаний в системе запуска дизель-генератора (ДГ) с двумя сосредоточенными массовыми моментами инерции. Крутильные колебания между тяговым генератором и коленчатым валом дизеля тепловозов типа UzTE16M ранее не рассматривались. В данной статье решена задача крутильных колебаний приведенных масс якоря тягового генератора и дизеля в режиме запуска ДГ от аккумуляторной батареи и дополнительных устройств. Методом Лагранжа выведена система уравнений колебаний масс по обобщенным координатам упругих колебаний между массами якоря тягового генератора и дизеля с переменным массовым моментом инерции. Для полученной системы уравнений методом операционного исчисления выполнено решение с учетом принятых функций массовых моментов инерций, моментов движущих сил и сопротивлений. Сделаны выводы о том, что работа системы запуска дизеля на тепловозах типа UzTE16M определяется функциями приведенного массового момента инерции дизеля, движущего момента и функцией угловой скорости; полученное решение дает возможность рассчитать движущий момент и диапазон изменения угловой скорости при запуске дизель-генераторной установки тепловозов UzTE16M для дальнейшего сравнения с экспериментальными данными; при использовании рекомендуемой электрической схемы запуска дизеля тепловоза достигается увеличение движущего момента коленчатого вала дизеля и угловой скорости разгона движения якоря тягового генератора. На основе разработанной модели рекомендовано определение угловой скорости коленчатого вала дизеля.

**Ключевые слова:** тяговый генератор, постоянный ток, энергия, потенциал, метод Лагранжа.

**Akhat T. Djanikulov, Mukhammad Sh.Valiev**

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

## RESEARCH OF TORSIONAL VIBRATIONS DURING START-UP OF DIESEL LOCOMOTIVES TYPE UzTE16M

**Abstract:** Railway transport faces the challenges not only to ensure uninterrupted transportation of national economic goods, but also to develop new locomotives and increase the efficiency of their use. In particular, the currently accepted mode of starting diesel locomotives of the UzTE16M type leads to additional consumption of fuel resources, therefore, research on the development and improvement of the conditions for starting diesel locomotives of this type is relevant. Based on the study of previous studies and designs of various systems in order to facilitate the start of diesel locomotives with electric transmission, it is necessary to establish the available reserves of the power circuit and control circuits. The article considers a mathematical model of torsional oscillations in a diesel generator start-up system with two concentrated mass moments of inertia. Torsional oscillations between the traction generator and the crankshaft of diesel locomotives of the UzTE16M type have not been previously considered. In this article, the problem of torsional oscillations of the reduced masses of the armature of the traction generator and diesel engine in the mode of starting the DG from the battery and additional devices is solved. The Lagrange method has derived a system of mass oscillation equations based on generalized coordinates of elastic oscillations between the masses of the armature of a traction generator and a diesel engine with a variable mass moment of inertia. For the resulting system of equations, the solution is performed by the method of operational calculus, taking into account the accepted functions of mass moments of inertia, moments of driving forces and resistances. Conclusions are drawn that the operation of the diesel starting system on diesel locomotives of the UzTE16M type is determined by the functions of the reduced mass moment of inertia of the

*diesel, the driving torque and the angular velocity function; the resulting solution makes it possible to calculate the driving torque and the range of angular velocity changes when starting the diesel generator set of UzTE16M locomotives for further comparison with experimental data; when using the recommended electric scheme for starting a diesel locomotive, an increase in the driving torque of the diesel crankshaft and the angular acceleration speed of the traction generator armature is achieved. Based on the developed model, it is recommended to determine the angular velocity of the diesel crankshaft.*

**Keywords:** traction generator, direct current, energy, potential, Lagrange method

Перед железнодорожным транспортом стоят задачи не только по бесперебойному обеспечению перевозок народнохозяйственных грузов, освоению новых локомотивов, но и по повышению экономичности их использования. Одним из дорогостоящих узлов тепловоза является аккумуляторная батарея. В процессе эксплуатации тепловозов типа UzTE16M нередко случаи затрудненного запуска дизелей в связи со снижением емкости аккумуляторной батареи. Теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых приведены в работах [2, 3], показали, что большинство аккумуляторных батарей ТПЖН – 550 тепловозов типа UzTE16M – имеют срок эксплуатации на АО «Узбекистон темир йуллари» от 10 до 18 лет. У части этих тепловозов не глушится дизель одной из секций, чтобы запустить вторую. Это приводит к дополнительному расходу топливных ресурсов. Поэтому исследования по разработке и улучшению условий запуска дизелей тепловозов типа UzTE16M в Республике Узбекистан и на территории стран СНГ являются актуальными [9, 10].

Ранее были проведены исследования по обоснованию параметров систем, облегчающих процесс запуска дизелей тепловозов с электрической передачей постоянного и переменного тока [1]. В ряде таких систем были использованы новые контакторы и аппараты, которые усложняли управление и снижали надежность тепловозов в целом. При этом не были использованы имеющиеся резервы в совершенствовании существующих систем и электрических аппаратов.

Поэтому на основании изучения проведенных ранее исследований и конструкций различных систем с целью облегчения запуска дизелей тепловозов с электрической передачей постоянного (ЭП ПТ) и переменного-постоянного тока (ЭП ППТ) необходимо выяснить имеющиеся резервы силовой цепи и цепей управления.

В ранее выполненных исследованиях [4 – 6] анализировались преимущественно электро-механические явления в цепях и аппаратах, обеспечивающих запуск дизелей. При этом не была изучена взаимосвязь между частотами вращения якоря  $\omega_{\text{я}}(t)$  тягового генератора (ТГ), работающего в режиме электродвигателя, и коленчатого вала  $\omega_{\text{д}}(t)$  запускаемого дизеля. В данной статье решена задача крутильных колебаний приведенных масс  $J_{\text{я}}(t)$  якоря ТГ и дизеля  $J_{\text{д}}(t)$  в режиме запуска ДГ от аккумуляторной батареи и дополнительных устройств.

Для решения задачи использовались следующие допущения.

1. В качестве расчетной использовалась модель крутильных колебаний двухмассовой упругосвязанной системы, характеризуемой [7]:

функциями приведенных массовых моментов инерции  $J_{\text{я}}(t)$  – якоря тягового генератора в режиме электродвигателя и дизеля  $J_{\text{д}}(t)$ , зависящих от времени  $t$  длительности процесса запуска  $t = t \div t_3$ ;

функцией  $\varphi_{\text{я}}(t)$  «кинематических» колебаний массы  $J_{\text{я}}(t)$ , нагруженной движущим моментом  $M_{\text{я}}(t)$ ;

функцией  $\varphi_{\text{д}}(t)$  упругих колебаний массы  $J_{\text{д}}(t)$  относительно массы  $J_{\text{я}}(t)$  под действием крутящего момента сил сопротивлений  $M_{\text{д}}(t)$ , приложенного к  $J_{\text{д}}(t)$ ; при этом

крутильную жесткость упругой связи  $C_D$  между  $J_{я}(t)$  и  $J_D(t)$  считаем постоянной в течение времени  $t = 0 \div t_3$ .

2. Для вывода уравнений крутильных колебаний для модели по п. 1 использовался метод Лагранжа с выражениями из работ [8, 11]:

для кинетической энергии –

$$T = \frac{1}{2} \left[ J_{я}(t) \cdot \left( \frac{d\varphi_{я}}{dt} \right)^2 + J_D(t) \cdot \left( \frac{d\varphi_{я}}{dt} + \frac{d\varphi_D}{dt} \right)^2 \right]; \quad (1)$$

потенциальной энергии –

$$\Pi = \frac{1}{2} C_D \varphi_D^2(t); \quad (2)$$

работы внешних сил –

$$dA = M_{я}(t) \partial \varphi_{я} - M_D(t) (\partial \varphi_{я} + \partial \varphi_D). \quad (3)$$

Уравнения Лагранжа по обобщенным координатам  $\varphi_{я}(t)$  и  $\varphi_D(t)$  имеют вид:

$$\begin{aligned} & [J_{я}(t) + J_D(t)] \cdot \frac{d^2 \varphi_{я}}{dt^2} + \frac{d\varphi_{я}}{dt} \cdot \left[ \frac{dJ_{я}(t)}{dt} + \frac{dJ_D(t)}{dt} \right] + \\ & + J_D(t) \frac{d^2 \varphi_D}{dt^2} + \frac{d\varphi_D}{dt} \cdot \frac{dJ_D(t)}{dt} = M_{я}(t) - M_D(t); \end{aligned} \quad (4)$$

$$J_D(t) \frac{d^2 \varphi_{я}}{dt^2} + \frac{dJ_D(t)}{dt} \frac{d\varphi_{я}}{dt} + J_D(t) \frac{d^2 \varphi_D}{dt^2} + \frac{d\varphi_D}{dt} \left[ \frac{dJ_D(t)}{dt} + K_3 \right] + c_3 \varphi_D = -M_D(t). \quad (5)$$

Полученная система уравнений (4), (5) характеризуется переменными коэффициентами и допускает приближенные решения.

Выполним приближенные решения этих уравнений с введением допущений.

О постоянном значении  $J_{я}$ , равном массовому моменту инерции якоря и приближенной функции

$$J_D(t) = J_0 e^{\beta t}, \quad (6)$$

где

$$\beta = \frac{1}{t_3} \ln \frac{J_D}{J_0}, \quad (7)$$

здесь  $J_0$  – массовый момент инерции вращающихся узлов дизеля, приведенных к угловой скорости коленчатого вала, и соответствующий круговой частоте  $\omega_{я}(t)$  вращения якоря главного генератора;

$J_D$  – приведенный массовый момент инерции всех вращающихся и поступательно движущихся масс дизеля в конце периода времени  $t = t_3$  завершения его запуска.

При этом  $J_{я} = \text{const}$  (для всех вращающихся масс вала и якоря главного генератора в режиме его работы разгонным электродвигателем для масс дизеля за время  $t = 0 \div t_3$ ).

Уточняем функции крутящих моментов:

движущего, приложенного к валу якоря, –

$$M_{я}(t) = a_0 + a_1 t + \dots; \quad (8)$$

сил сопротивления вращению масс дизеля –

$$M_{\text{Д}}(t) = d_0 + d_1 t + \dots, \quad (9)$$

где  $a_i$  и  $d_i$  – коэффициенты полиномов – известные постоянные величины, определяемые для условий:

$$t = 0, \text{ когда } M_{\text{Я}}(0) = a_0, \quad M_{\text{Д}}(0) = d_0; \quad (10)$$

$$t = t_3, \text{ когда } M_{\text{Я}}(t) = a_0 + a_1 t = M_{\text{ЯМ}}, \quad M_{\text{Д}}(t) = d_0 + d_1 t = M_{\text{ДМ}}. \quad (11)$$

При таких допущениях получим следующую систему уравнений:

$$(J_{\text{Я}} + J_0 e^{\beta t}) \frac{d^2 \varphi_{\text{Я}}}{dt^2} + \frac{d\varphi_{\text{Я}}}{dt} \beta J_0 e^{\beta t} + J_0 e^{\beta t} \frac{d^2 \varphi_{\text{Д}}}{dt^2} + \frac{d\varphi_{\text{Д}}}{dt} \beta J_0 e^{\beta t} = a_0 - d_0 + t(a_1 - d_1); \quad (12)$$

$$J_0 e^{\beta t} \frac{d^2 \varphi_{\text{Я}}}{dt^2} + \frac{d\varphi_{\text{Я}}}{dt} \beta J_0 e^{\beta t} + J_0 e^{\beta t} \frac{d^2 \varphi_{\text{Д}}}{dt^2} + \frac{d\varphi_{\text{Д}}}{dt} \beta J_0 e^{\beta t} + C_3 \varphi_{\text{Д}} = -d_0 - d_1 t.$$

В системе уравнений (12) проводим замену функций на основе  $\varphi_{\text{Я}}$  и  $\varphi_{\text{Д}}$ :

$$\frac{d\varphi_{\text{Д}}}{dt} = \omega_{\text{Д}}; \quad \frac{d\varphi_{\text{Я}}}{dt} = \omega_{\text{Я}}, \quad \frac{d^2 \varphi_{\text{Д}}}{dt^2} = \frac{d\omega_{\text{Д}}}{dt}, \quad \frac{d^2 \varphi_{\text{Я}}}{dt^2} = \frac{d\omega_{\text{Я}}}{dt}, \quad (13)$$

а затем выполняем дифференцирование всех членов уравнений (4), (5) по времени  $t$  с учетом условий (6), (7) и после деления всех членов на  $J_0 e^{\beta t}$  получаем новую систему уравнений:

$$\frac{d^2 \omega_{\text{Я}}}{dt^2} \left( \frac{J_{\text{Я}}}{J_0} e^{-\beta t} + 1 \right) + 2\beta \frac{d\omega_{\text{Я}}}{dt} + \beta^2 \omega_{\text{Я}} + \frac{d^2 \omega_{\text{Д}}}{dt^2} + 2\beta \frac{d\omega_{\text{Д}}}{dt} + \beta^2 \omega_{\text{Д}} = \frac{a_1 - d_1}{J_0} e^{-\beta t} = b_1 e^{-\beta t}; \quad (14)$$

$$\frac{d^2 \omega_{\text{Я}}}{dt^2} + 2\beta \frac{d\omega_{\text{Я}}}{dt} + \beta^2 \omega_{\text{Я}} + \frac{d^2 \omega_{\text{Д}}}{dt^2} + 2\beta \frac{d\omega_{\text{Д}}}{dt} + \beta^2 \omega_{\text{Д}} + \frac{C_3 \omega_{\text{Д}}}{J_0} e^{-\beta t} = -\frac{d_1}{J_0} e^{-\beta t}. \quad (15)$$

Выполняем дополнительное осреднение функций за период времени  $t_3$

$$A_{\text{Я}} = \frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} \left( \frac{J_{\text{Я}}}{J_0} e^{-\beta t} + 1 \right) dt = 1 + \frac{J_{\text{Я}}}{J_0} \ln \frac{J_{\text{Д}}}{J_0} \left( 1 - e^{-\ln \frac{J_{\text{Д}}}{J_0}} \right); \quad (16)$$

$$P_{\text{Д}}^2 = \frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} \left( \frac{C_3}{J_0} e^{-\beta t} dt \right) = \frac{C_3}{J_0} \ln \frac{J_{\text{Д}}}{J_0} \left( 1 - e^{-\ln \frac{J_{\text{Д}}}{J_0}} \right). \quad (17)$$

Для системы (16), (17) принимаем начальные условия нулевыми:  $\frac{d^2 \varphi_{\text{Д}}}{dt^2} = 0$  и  $\frac{d\varphi_{\text{Д}}}{dt} = \frac{d\varphi_{\text{Я}}}{dt}$ .

Решение выполним методом операционного исчисления [7] и получим изображения решения:

$$\omega_{\text{Я}}(p)(A_{\text{Я}} p^2 + 2\beta p + \beta^2) + \omega_{\text{Д}}(p)(p^2 + 2\beta p + \beta^2) = \frac{b_1 p}{p + \beta}; \quad (18)$$

$$\omega_{\text{Я}}(p)(p^2 + 2\beta p + \beta^2) + \omega_{\text{Д}}(p)(p^2 + 2\beta p + P_{\text{Д}}^2) = -\frac{d_1 p}{p + \beta}. \quad (19)$$

Для решения системы (18), (19) как алгебраической относительно изображений предварительно составляем определитель из коэффициентов при  $\omega_{\text{Я}}(p)$  и  $\omega_{\text{Д}}(p)$ :

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} A_{я}p^2 + 2\beta p + \beta^2 & p^2 + 2\beta p + \beta^2 \\ p^2 + 2\beta p + \beta^2 & p^2 + 2\beta p + P_{д}^2 \end{vmatrix} =$$

$$= (A_{я}p^2 + 2\beta p + \beta^2)(p^2 + 2\beta p + P_{д}^2) - (p^2 + 2\beta p + \beta^2)^2. \quad (20)$$

Обозначим:  $A_{я}p^2 + 2\beta p + \beta^2 = c_1$ ;  $p^2 + 2\beta p + P_{д}^2 = c_2$ ;  $(p^2 + 2\beta p + \beta^2)^2 = c_3$ .

Для отыскания последней функции решаем уравнение  $\Delta_2 = 0$ . При этом учитываем условия, что  $c_1 > c_3$  и  $c_2 > c_3$ , а  $c_1 c_2 \gg c_3^2$ . Поэтому получаем приближенное решение в виде

$$\Delta_2 \approx A_{я}(p^2 + 2\beta_1 p + \beta_2^2)(p^2 + 2\beta p + P_{д}^2) = 0, \quad (21)$$

корни которого имеют вид:

$$p_{1,2} = -\beta_1 \pm i\alpha_1 = -\beta_1 \pm i\sqrt{\beta_2^2 - \beta_1^2}; \quad (22)$$

$$p_{3,4} = -\beta \pm i\alpha_3 = -\beta \pm i\sqrt{P_{д}^2 - \beta^2}. \quad (23)$$

Далее получим изображения функций приближенным методом:

$$\omega_{я}(p) = \frac{1}{\Delta_2} \frac{p}{p + \beta} \begin{vmatrix} b_1 & p^2 + 2\beta p + \beta^2 \\ d_1 & p^2 + 2\beta p + P_{д}^2 \end{vmatrix} \approx \frac{pb_1}{(p + \beta)(p + \beta_1 - i\alpha_1)(p + \beta_1 + \alpha_1)}; \quad (24)$$

$$\omega_{д}(p) = \frac{1}{\Delta_2} \frac{p}{p + \beta} \begin{vmatrix} A_{я}p^2 + 2\beta p + \beta^2 & b_1 \\ p^2 + 2\beta p + \beta^2 & -d_1 \end{vmatrix} \approx \frac{pd_1}{(p + \beta)(p + \beta_1 - i\alpha_3)(p + \beta_1 + \alpha_3)}, \quad (25)$$

затем – оригиналы приближенных решений:

$$\omega_{я}(t) = \frac{b_1 e^{-\beta t}}{A_{я}[(\beta - \beta_1)^2 + d_1^2]} \left[ 1 + \left( \frac{\beta - \beta_1}{\alpha_1} \sin \alpha_1 t_3 - \cos \alpha_1 t_3 \right) \cdot e^{(\beta - \beta_1)t} \right]; \quad (26)$$

$$\omega_{д}(t) = -\frac{d_1 e^{-\beta t}}{P_{д}^2 - \beta^2} [1 - \cos \alpha_3 t]. \quad (27)$$

При окончании времени  $t = t_3$  запуска дизеля получим из выражений (26), (27) значения угловых скоростей:

$$\omega_{я}(t_3) = \omega_{я3} = \frac{b_1 e^{-\ln \frac{J_{д}}{J_0}}}{A_{я}[(\beta - \beta_1)^2 + \alpha_1^2]} \left[ 1 + \left( \frac{\beta - \beta_1}{\alpha_1} \sin \alpha_1 t_3 - \cos \alpha_1 t_3 \right) \cdot e^{\frac{\ln \frac{J_{д}}{J_0} - \beta t_3}{J_0}} \right]; \quad (28)$$

$$\omega_{д}(t) = -\frac{d_1}{P_{д}^2 - \beta^2} e^{-\ln \frac{J_{д}}{J_0}} [1 - \cos \alpha_3 t_3]. \quad (29)$$

Для оценки осредненных значений функции  $\omega_{я}(t)$  воспользуемся выражением

$$\frac{d\omega_{я}}{dt} = \frac{M_{я} - M_{ДС}}{J_{ДС}}, \quad (30)$$

где  $M_{я} - M_{ДС}$  – среднеарифметические значения движущих моментов и сопротивлений за время  $t = 0 \div t_3$ , и получим:

$$d\omega_{YS}(t) = \frac{M_{YS} - M_{DS}}{J_{YS}} t. \quad (31)$$

Итоговая функция угловой скорости модели разгона двигателя представлена уравнением

$$\omega_Y(t) = \omega_{YS}(t) + \omega_Y(t_3). \quad (32)$$

В соответствии с рекомендациями работы [5] во время запуска после 3 – 5 с процесса начинаются вспышки в определенных цилиндрах, поэтому для рассмотрения приняты первые 5 с:  $t_3 = 0 \div 5$ . Выполнены расчеты изменения угловой скорости и движущего момента для двух вариантов электрических схем запуска дизеля тепловозов – существующей в настоящее время и рекомендуемой в работе [12] – в интервале времени 0 – 5 с. Расчетные значения угловых скоростей якоря приведены в таблице.

Расчетные значения угловых скоростей якоря дизель-генератора тепловоза типа UzTE16M

t, с	J <sub>Д</sub> , кгм·с <sup>2</sup>	Серийная схема				Рекомендуемая схема			
		$\omega_{яс}(t), c^{-1}$	$\omega_{я1}(t), c^{-1}$	$\omega_{я}(t), c^{-1}$	M <sub>Д</sub> <sup>с</sup> (t), Нм	$\omega_{яс}(t), c^{-1}$	$\omega_{я1}(t), c^{-1}$	$\omega_{я}(t), c^{-1}$	M <sub>Д</sub> <sup>р</sup> (t), кгм
0,8	3	0	-0,01	0,01	2800	0,8	0,2	1,0	2200
1	6	0,5	-0,06	0,44	2600	1,5	0,25	1,75	2500
2	11,7	3,2	-0,25	2,95	1800	5,1	0,36	5,46	2700
3	17	5,8	-0,56	5,24	1200	8,7	0,6	9,3	1700
4	23	8,5	-0,99	7,41	950	12,3	0,72	13,02	1000
5	30	11,7	-1,51	10,19	800	15,9	0,65	16,55	750

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Работа системы запуска дизеля на тепловозах типа UzTE16M определяется функциями приведенного массового момента инерции дизеля  $J_D(t)$ , движущего момента  $M_D^c(t)$ , и функцией угловой скорости  $\omega_{я}^c(t)$ .

2. Полученное решение дает возможность рассчитать движущий момент  $M_D^p(t)$  и диапазон изменения угловой скорости  $\omega_{я}^p(t)$  при запуске дизель-генераторной установки тепловозов UzTE16M для дальнейшего сравнения с экспериментальными данными.

3. При использовании рекомендуемой схемы достигается увеличение движущего момента  $M_D^p(t)$  по графе 10 и угловой скорости  $\omega_{я}^p(t)$  разгона движения по графе 9 (см. таблицу).

### Список литературы

1. Аникиев, И. П. Усовершенствованная схема конденсаторной системы пуска дизеля / И. П. Аникиев, А. Н. Корнев. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2000. – № 4. – С. 29.
2. Джаникулов, А. Т. Моделирование динамических явлений в механизмах запуска дизелей магистральных тепловозов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Джаникулов Ахат Турдибекович ; Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2006. – 19 с. – Текст : непосредственный.
3. Моделирование процесса пуска двигателя внутреннего сгорания электрическим стартером / Н. В. Клиначев, С. Г. Воронин [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С.49–56.
4. Романов, В. И. К расчету коэффициента динамичности с учетом зазоров в вертикальной передаче при пуске дизелей типа 10Д100 / В. И. Романов. – Текст : непосредственный //

Межвуз. сб. тр. (Труды ТашИИТа. – Вып. 5 (157)). – Ташкент : Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп., 1975. – С. 27–34.

5. Романов, В. И. Совершенствование систем пуска дизелей тепловозов / В. И. Романов. – Текст : непосредственный // Вопросы повышения надежности электрических машин и электрооборудования тепловозов в условиях Средней Азии и Казахстана : межвуз. сб. науч. тр. (Труды ТашИИТа. – Вып. 9 (161)). – Ташкент : Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп., 1980. – С. 37–42.

6. Романов, В. И. Диагностика вертикальной передачи и системы пуска дизелей 10Д100 тепловозов типа ТЭ10 / В. И. Романов. – Текст : непосредственный // Межвуз. сб. тр. (Труды ТашИИТа. – Вып. 16 (169)). – Ташкент : Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп., 1981. – С. 55–62.

7. Гарнер, М. Ф. Переходные процессы в линейных системах с сосредоточенными постоянными. / М. Ф. Гарнер, Дж. Бернс. – Москва : Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 451 с. – Текст : непосредственный.

8. Система пуска дизеля тепловоза с использованием импульсных конденсаторов сверхвысокой электроемкости: Техническое описание и инструкция ПКБ ЦТ МПС РФ. – Москва : МПС РФ, 1995. – 50 с. – Текст : непосредственный.

9. Валиев, М. Ш. Применение датчика содержания кислорода для контроля величины коэффициента избытка воздуха тепловозного дизеля / М. Ш. Валиев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 2 (30). – С. 9–17.

10. Валиев, М. Ш. Диагностика рабочего процесса тепловозного дизеля в условиях эксплуатации. / М. Ш. Валиев. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 1 (25). – С. 35–39.

11. Жидков, В. Н. Некоторые переходные процессы в энергетической цепи тепловозов типа ТЭ10 / В. Н. Жидков, А. Х. Газиев. – Текст : непосредственный // Межвуз. сб. тр. (Труды ТашИИТа. – Вып. 88). – Ташкент : Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп., 1977. – С. 17–23.

12. Патент № 2213250 Российская Федерация. F02N11/08. Устройство для запуска дизеля тепловоза : № 20011106157/06 : заявлено 03.06.2001 : опубликовано 27.09.2003 / Бирюков В. А., Джаникулов А. Т., Жидков В. Н., Кошевой В. А., Кулахмедов Б. Т. – 4 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. Anikiev I. P., Kornev A. N. Improved scheme of the condenser system of diesel start-up [Usovershenstvovannaya skhema kondensatornoj sistemy puska dizelya]. *Lokomotiv – The Locomotive*, 2000, no. 4, pp. 29.

2. Dzhaniukulov A. T. *Modelirovanie dinamicheskikh yavlenij v mekhanizmah zapuska dizelej magistral'nyh teplovozov* (Modeling of dynamic phenomena in the mechanisms of starting diesel main locomotives). PhD's thesis abstract, Tashkent, TashIIT, 2006, 19 p.

3. Klinachev N. V., Voronin S. G. et al. Simulation of the process of starting an internal combustion engine with an electric starter [Modelirovanie processa puska dvigatelya vnutrennego sgoraniya elektricheskimi starterom]. *Vestnik IuUrGU. Seriya «Energetika» – Bulletin of South Ural State University. Series «Power Engineering»*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 49 – 56.

4. Romanov V. I. To calculation of coefficient of dynamism taking into account gaps in vertical transmission at start of diesels of type 10D100 [K raschetu koefficienta dinamichnosti s uchetom zazorov v vertikal'noj peredache pri puske dizelej tipa 10D100]. *Mezhvuzovskii sbornik trudov (Trudy TashIITa, vyp. 5 (157))* (Intercollegiate collection of works (Works of TashIIT, issue 5 (157))). – Tashkent, 1975. – pp. 27 – 34.

5. Romanov V. I. Improvement of diesel locomotive start-up systems. Interuniversity collection of proceedings [Sovershenstvovanie sistem puska dizelej teplovozov]. *Voprosy povysheniia nadezhnosti elektricheskikh mashin i elektrooborudovaniia teplovozov v usloviakh Srednei Azii i Kazakhstana: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov (Trudy TashIITa, vyp. 9 (161))* (Issues of improving the reliability of electric machines and electric equipment of locomotives in the conditions of Central

Asia and Kazakhstan: interuniversity collection of scientific papers (Proceedings of TASHIIT, issue 9 (161))). – Tashkent, 1980. – pp. 37 – 42.

6. Romanov V. I. Diagnostics of vertical transmission and starting system of 10D100 diesel locomotives of TE10 type [Diagnostics of vertical transmission and starting system of 10D100 diesel locomotives of TE10 type]. *Mezhvuzovskii sbornik trudov (Trudy TashIITa, vyp. 5 (157)* (Intercollegiate collection of works (Works of TashIIT, issue 16 (169))). – Tashkent, 1981. – pp. 55 – 62.

7. Garner M. F., Berns Dzh. *Perekhodnye processy v linejnyh sistemah s sosredotochennymi postoyannymi* (Transients in linear systems with concentrated constants). Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1961, 451p.

8. *Sistema pushka dizelya teplovoza s ispol'zovaniem impul'snyh kondensatorov sverkhvysokoj elektroemkosti. Tekhnicheskoe opisanie i instrukciya PKB CT MPS RF* (Diesel locomotive start-up system using ultrahigh electric capacity pulse capacitors. Technical description and user manual PKB TST MPs of the Russian Federation). Moscow, 1995, 50 p.

9. Valiev M. Sh. Application of oxygen content sensor for monitoring the excess air ratio of diesel locomotive. [Primenenie datchika sodержaniya kisloroda dlya kontrolya velichiny koefficienta izbytko vozduha teplovoznogo dizelya] *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 2 (30), pp. 9 – 17.

10. Valiev M. Sh. Diagnostics of the working process of diesel locomotive under operating conditions [Diagnostika rabocheho processa teplovoznogo dizelya v usloviyah ekspluatatsii]. *Vestnik transporta Povolzh'ya – The Journal of Samara State Transport University*, 2011, no. 1 (25), pp. 35 – 39.

11. Zhidkov V. N., Gaziev A. H. Some transients in the energy chain of TE10 locomotives. [Nekotorye perekhodnye processy v energeticheskoy cipi teplovoznov tipa TE10.]. *Mezhvuzovskii sbornik trudov (Trudy TashIITa, vyp. 5 (157)* (Intercollegiate collection of works (Works of TashIIT, 88)). – Tashkent, 1977. – pp. 17 – 23.

12. Biryukov V.A., Dzhaniukulov A. T., Zhidkov V. N., Koshevoj V. A., Kulakhmedov B.T. *Patent RU 2213250 F02N11/08, 27.09.2003.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Джаникулов Ахат Турдибекевич**

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Адылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство», ТГТрУ.

Тел.: +998 (97)764-89-50.

E-mail: djanikulov7575@mail.ru

**Валиев Мухаммад Шералиевич**

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Адылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство», ТГТрУ.

Тел.: +998 (97)446-14-61.

E-mail: valiev.m.sh@gmail.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Джаникулов, А. Т. Исследование крутильных колебаний в режиме запуска дизеля тепловозов типа UzTE16M / А. Т. Джаникулов, М. Ш. Валиев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 23 – 30.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Djanikulov Akhat Turdibekovich**

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Adilhodjaev st., Tashkent, 100167, Republic Of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, associate professor of the department «Locomotives and locomotive equipment», TSTU.

Phone: +998 (97) 764-89-50.

E-mail: djanikulov7575@mail.ru

**Valiev Mukhammad Sheralievich**

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Adilhodjaev st., Tashkent, 100167, Republic Of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, associate professor of the department «Locomotives and locomotive equipment», TSTU.

Phone: +998 (97) 446-14-61.

E-mail: valiev.m.sh@gmail.com

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Djanikulov A. T., Valiev M. S. Research of torsional vibrations during start-up of diesel locomotives type UzTE16M. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 3 (47), pp. 23 – 30 (In Russian).

УДК 629.488 : 629.423.1

Ю. А. Давыдов, О. О. Мухин, В. В. Заболотный

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИСТЕМНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЛОКОМОТИВОВ НА СРЕДНЕСУТОЧНЫЙ ПРОБЕГ

**Аннотация.** Ежегодно локомотивостроительными заводами, поставщиками оборудования и сервисными компаниями разрабатываются организационно-технические мероприятия, направленные на повышение надежности выпускаемой продукции. Так в рамках договора на поставку и обеспечение сервисного обслуживания электровозов серии «Ермак» реализован ряд корректирующих мероприятий по более, чем тридцати направлениям, по многим из которых достигнут положительный результат. Однако, в ходе продолжительной эксплуатации выявляются все более новые скрытые технические дефекты, также в редких случаях принятых мер оказывается недостаточно. Проявление системных несоответствий несет в себе случайный характер, тем самым они негативно влияют на динамику среднесуточного пробега и на совершенный за весь жизненный цикл линейный пробег, вызывая непредсказуемые колебания, и как следствие на организацию планирования сервисного обслуживания и формирование бюджета для поддержки жизненного цикла локомотивов. Ввиду чего появляется необходимость в разработки модели по более точному прогнозу среднесуточного пробега на длительный период с учетом влияния системных несоответствий и корректирующих мероприятий по повышению надежности узлов. В статье по принципу Парето выполнен анализ системных неисправностей локомотивов производства ООО «ПК «НЭВЗ» за период эксплуатации с 2018 по 2021 год, произведен анализ динамики среднесуточного пробега локомотивного парка приписки Дальневосточной дирекции тяги с применением статистически-аналитического метода, анализ влияния неисправностей на среднесуточный пробег с применением метода прогнозирования временных рядов Фурье. На примере неисправностей силовых токоведущих шин выпрямительно-инверторного преобразователя и неисправностей защелок высоковольтного вакуумного выключателя выполнена оценка влияния неисправностей критических узлов.

**Ключевые слова:** контракт жизненного цикла, жизненный цикл, «Ермак», 3ЭС5К, прогнозирование, метод Фурье, системные неисправности, сезонные колебания.

Yuri A. Davydov, Oleg O. Mukhin, Vladimir V. Zabolotnyy

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

## ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF SYSTEM FAILURES OF LOCOMOTIVES ON AVERAGE DAY RUN

**Abstract.** Annually locomotive-building plants, equipment suppliers and service companies develop organizational and technical measures aimed at improving the reliability of products. Thus, within the framework of the contract for the supply and maintenance of electric locomotives of the ERMAK series, a number of corrective measures have been implemented in more than thirty directions, many of which have achieved a positive result. However, during the long-term operation, more and more new hidden technical defects are revealed, and in rare cases, the measures taken are not enough. The manifestation of systemic inconsistencies is random in nature, thereby they negatively affect the dynamics of the average daily mileage and the linear mileage completed over the entire life cycle, causing unpredictable fluctuations, and as a result, the organization of service planning and budgeting to support the life cycle of locomotives. Therefore, there is a need to develop a model for a more accurate forecast of the average daily mileage for a long period, considering the impact of system inconsistencies and corrective measures to improve the reliability of nodes. The article uses the Pareto principle to analyze system malfunctions of locomotives manufactured by PC NEVZ LLC for the period of operation from 2018 to 2021, analyzes the dynamics of the average daily mileage of the locomotive fleet of the Far Eastern Traction Directorate with the use of a statistical and analytical method, analyzes the impact of failures on the average daily mileage using the Fourier time series forecasting method. On the example of malfunctions of power current-carrying buses of a rectifier-inverter converter and malfunctions of latches of a high-voltage vacuum circuit breaker, the influence of malfunctions of critical nodes is evaluated.

**Keywords:** life cycle contract, life cycle, «Ermak», 3ES5K, forecasting, Fourier method, system malfunctions, seasonal fluctuations.

Одной из задач локомотивного комплекса согласно Стратегии развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года является переход на приобретение отдельных видов оборудования и локомотивов на основе контракта жизненного цикла (далее – КЖЦ) [1, 2]. Для реализации поставленной задачи в рамках КЖЦ, заключенного между ОАО «РЖД» и АО «Рослокомотив», продолжается поставка новых локомотивов в эксплуатационные локомотивные депо.

В ходе эксплуатации новых электровозов производства ООО «ПК «НЭВЗ», поставляемых в период с 2018 г. по настоящее время в рамках КЖЦ, выявлен ряд системных несоответствий по качеству оборудования и узлов в отношении заявленных требований технических условий и показателей надежности. Так, 44,67 % всех неисправностей допущены по вине завода-изготовителя.

За 2021 г. в границах Дальневосточной железной дороги произошло 1284 случая отказов технических средств по электровозам серии «Ермак». Из них доля отказов, приходящаяся на новые локомотивы, на гарантии завода-изготовителя, 23,6 %. Однако стоит отметить, что наработка на отказ гарантийных локомотивов выше на 2,3 сл./млн км, чем у не гарантийного парка. При этом наработка на отказ новых составляет 17,5 сл./млн км, а у устаревшего парка 15,3 сл./млн км при норме, установленной в технических условиях, 11 сл./млн км. Сохраняется длительный простой при выполнении неплановых ремонтов на базе сервисных локомотивных депо Восточного полигона, в среднем он составляет 31,3 ч.

На рисунке 1 представлена диаграмма распределения неисправностей оборудования новых локомотивов 3ЭС5К, разработанная по принципу Парето, за период их эксплуатации с 2018 по 2020 г. Точка пересечения пунктирной линии с кумулятивной линией на уровне 80 % своей проекцией делит диаграмму на два участка: левый – основные несоответствия, правый – прочие маловажные несоответствия [3, 4]. На первом месте по количеству неисправностей находится стеклопластиковый кожух зубчатой передачи (КЗП), на втором – якорь тягового электродвигателя (ТЭД), на третьем – коллекторно-щеточный аппарат ТЭД, на четвертом – быстродействующий выключатель (ВБ-8) и так далее до конца границы основных несоответствий.

Контрактом предусмотрен комплекс работ по улучшению технико-экономических характеристик тягового подвижного состава путем проведения модернизаций. В общих чертах корректирующие мероприятия представляют собой замену отдельных элементов или всего узла более надежными аналогами иных производителей, доработку конструкции, установку устройств защиты, установку элементов, снижающих влияние негативных факторов, повышение контроля за состоянием критических узлов со стороны сервисных организаций. За период эксплуатации локомотивов заводом-изготовителем был принят ряд мероприятий по исключению системных несоответствий узлов и оборудования, эффективность и результативность которых можно определить путем сравнения распределения неисправностей за два периода: до момента ввода мероприятий (см. рисунок 1) и после.

На рисунке 2 представлена диаграмма распределения неисправностей узлов и оборудования в 2021 г. после введения корректирующих мероприятий.

Надежность рассматриваемых узлов и оборудования заметно увеличилась по сравнению с прошлым периодом. Несмотря на это количество неисправностей по якорю ТЭД, низковольтным цепям управления, коллекторно-щеточному аппарату, КЗП, шинному монтажу выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИПа) также находятся в основной зоне 80 % несоответствий, что свидетельствует о недостаточной эффективности принятых мер [5, 6]. Кроме того, в основную зону переместились такие узлы, как конденсаторы типа КПС, защелки высоковольтного вакуумного выключателя (ВБО), блоки *Gersys* микропроцессорной системы диагностики (МСУД-015), микропереключатели датчиков давления (ДЕМ-105С), гофры металлорукавов (RS331) и др.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

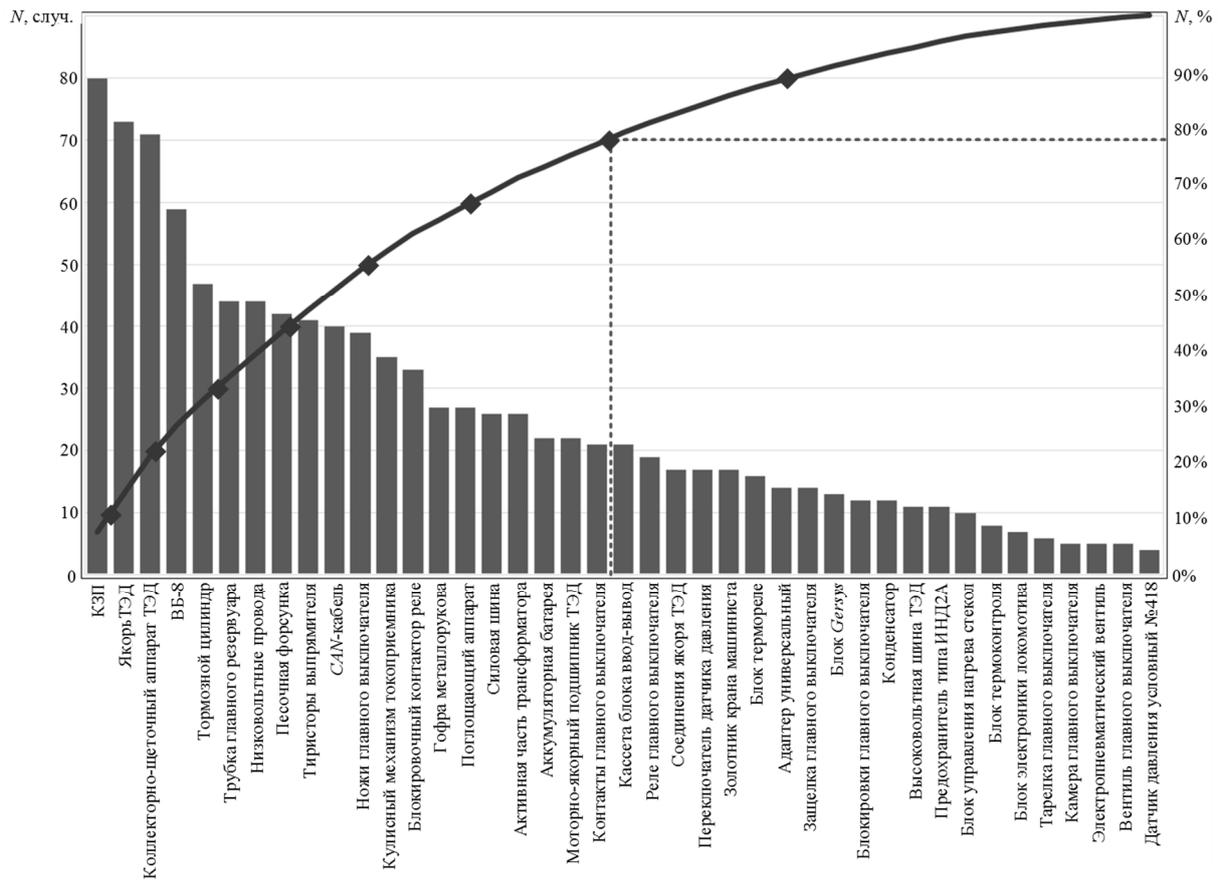


Рисунок 1 – Диаграмма распределения неисправностей узлов и оборудования

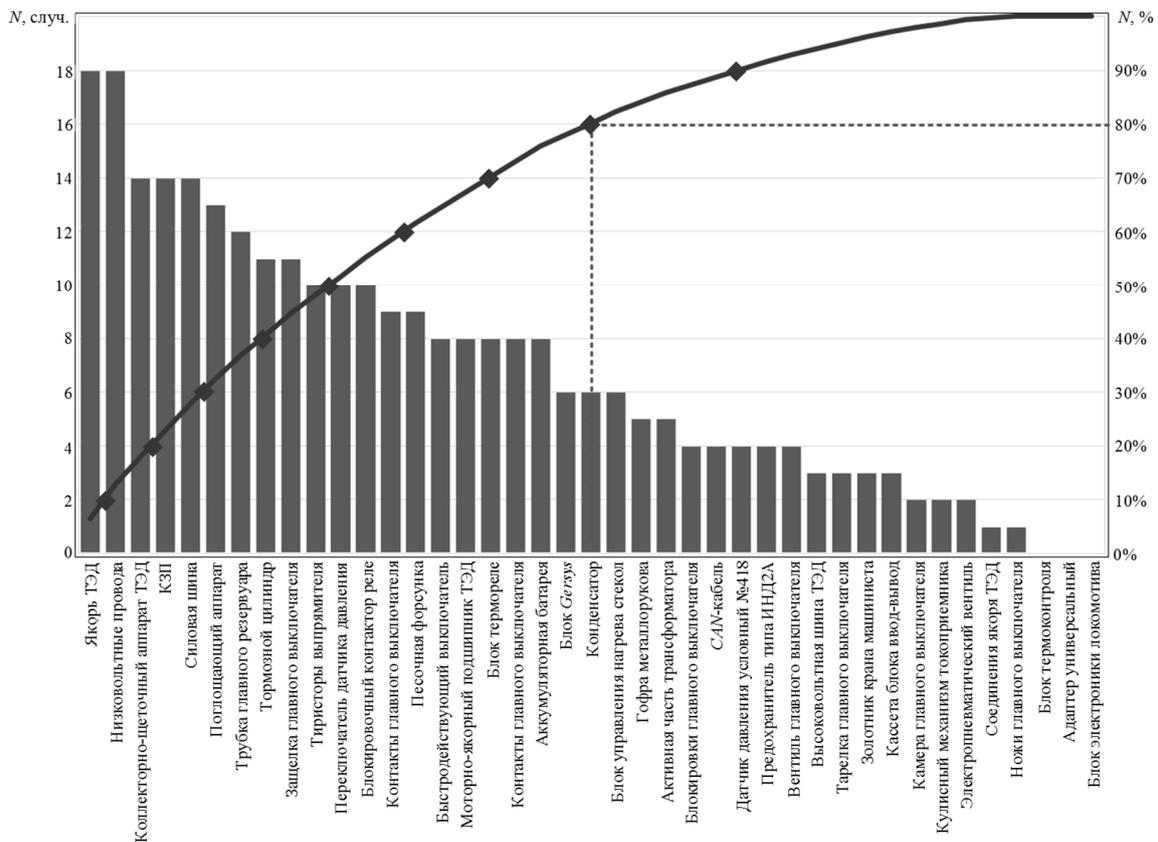


Рисунок 2 – Диаграмма распределения неисправностей узлов и оборудования после введения корректирующих мероприятий

Рассматриваемые узлы, находящиеся в основной зоне несоответствий диаграммы Парето, напрямую влияют не только на снижение линейного пробега локомотивов на всем жизненном цикле (ЖЦ) вследствие длительного простоя на ремонте, но и на возникновение случайных колебаний в динамике среднесуточного пробега, что в свою очередь затрудняет планирование программы ремонта и прогнозирование затрат на стоимость ЖЦ локомотивов. Для оценки влияния неисправностей на динамику среднесуточного пробега и эффективности разработанных мероприятий по повышению надежности критических узлов необходимо учесть потерянное время на проведение сверхцикловых работ, связанных с восстановлением работоспособности локомотива, а также время задержки поезда в результате отказа. Возникает необходимость в разработки модели, позволяющей при планировании учесть положительный эффект от реализованных модернизаций.

Для начала требуется разработать модель прогнозирования среднесуточного пробега локомотивов на всем ЖЦ. На рисунке 3 представлена динамика среднесуточного пробега рабочего парка локомотивов серии ЗЭС5К приписки эксплуатационных локомотивных депо Хабаровск-II и Смоляниново за период с января 2015 по июнь 2021 г. согласно данным информационных систем ОАО «РЖД». Динамика имеет сезонный характер колебания. Для прогнозирования динамики подобрана линия тренда – пунктирная линия на графике (см. рисунок 3), на основании которой справедливо утверждать, что среднесуточный пробег в будущем будет расти [7].

Уравнение тренда имеет вид:

$$\hat{y} = 0,411x + 536,445, \quad (1)$$

где  $\hat{y}$  – значение среднесуточного пробега в соответствующем месяце, км/сут;  $x$  – искомый параметр времени, порядковый номер месяца [7 – 14].

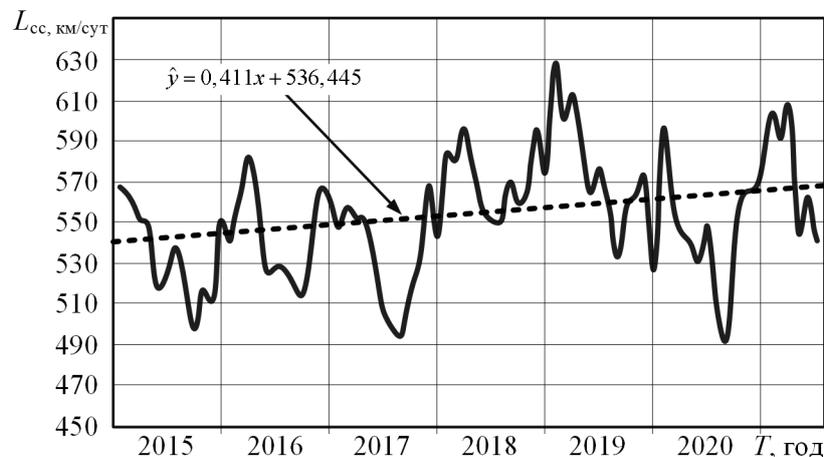


Рисунок 3 – Динамика среднесуточного пробега локомотивов серии ЗЭС5К

Для разработки модели прогнозирования динамики целесообразно использовать метод Фурье, уравнение имеет вид:

$$Y_k t = a_0 + \sum_{k=1}^{k=T/2} \left( a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{T} \right), \quad (2)$$

где  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  – неизвестные параметры Фурье, которые определяются по методу наименьших квадратов;  $k$  – гармоника ряда ( $k < T / 2$ );  $T$  – прогнозируемый период, рад [7 – 11]. Коэффициенты уравнения  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  определяются при помощи метода наименьших квадратов из следующих соотношений:

$$a_k = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^{\frac{\pi}{6}} y \cos kt; \quad (3)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^{\frac{\pi}{6}} y \sin kt; \quad (4)$$

$$a_0 = \frac{\sum y}{T}, \quad (5)$$

где  $y$  – исходное значение среднесуточного пробега в соответствующем месяце, км/сут [7–14].

Модель прогноза среднесуточного пробега локомотивов, поставляемых в 2021 г., имеет вид:

$$y_k t = \hat{y} + \sum_{k=1}^{k=T/2} (a_k \cos kt + b_k \sin kt), \quad (6)$$

где  $\hat{y}$  соответствует уравнению тренда по формуле 1, тогда формула (6) примет вид:

$$y_k t = 0,411t + 536,445 + \sum_{k=1}^{k=T/2} (a_k \cos kt + b_k \sin kt). \quad (7)$$

По итогам гармонического анализа определены лучшие гармоники – со второй по седьмую, описывающие сезонные колебания в динамике. В итоге модель прогнозирования среднесуточного пробега локомотивов серии «Ермак» на всем ЖЦ имеет вид:

$$f(t) = Yt = 0,411t + 536,445 + \sum_{k=2}^{k=7} (a_k \cos kt + b_k \sin kt) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2. \quad (8)$$

На рисунке 4 представлен прогноз динамики среднесуточного пробега на период от шести месяцев 2021 г. (40 рад) до конца 2023 г. (50 рад).

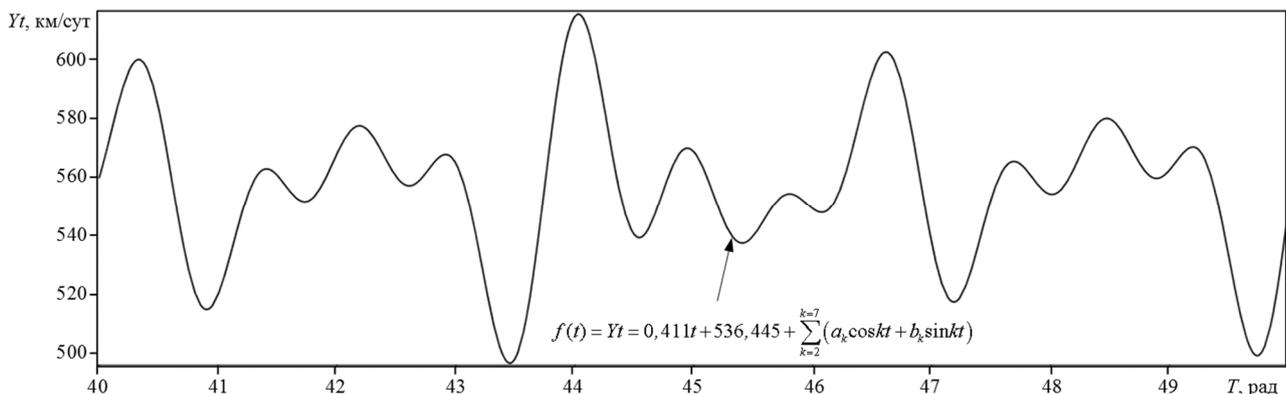


Рисунок 4 – График прогноза среднесуточного пробега

Анализ влияния системных несоответствий проведен в отношении неисправностей силовых токоведущих шин ВИПа, защелок ВБО – требуется определить потери среднесуточного пробега в результате неисправностей этих узлов. Потери среднесуточного пробега на один локомотив от неисправности  $i$ -го оборудования за период  $t$  рассчитываются по выражению

$$\varepsilon_i = N_i \tau_i V_t / d, \quad (9)$$

где  $\tau_i$  – время простоя локомотива на ремонте и на линии по причине неисправности  $i$ -го узла, приходящееся на рассматриваемый период, ч, принимается как среднее значение простоя локомотивов;  $N_i$  – количество неисправностей за рассматриваемый период  $t$ ;  $N_i \tau_i$  – общее время

простоя локомотива за период  $t$  по причине неисправности, ч;  $d$  – количество календарных дней в рассматриваемом периоде;  $V_t$  – средняя скорость движения в рассматриваемом периоде, км/ч, определяется так:

$$V_t = Yt / 24, \quad (10)$$

где  $Yt$  – прогнозируемое значение среднесуточного пробега локомотива по формуле (8), км/сут; 24 – количество часов в сутках.

Количество неисправностей локомотивов за период с 2018 по шесть месяцев 2021 г. по причине выхода из строя защелки составляет 25 случаев, при этом простой на ремонте за четыре года составил 105,25 ч, время простоя, приходящееся на один месяц – 2,193 ч. Количество неисправностей шинного монтажа ВИПа – 40 случаев, общий простой – 62,1 ч, приходящийся на один месяц – 1,292 ч [5, 6]. Для оценки влияния системных неисправностей необходимо выполнить прогноз потерь, связанных с длительным простоем на неплановых ремонтах.

Коэффициенты  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  уравнения ряда Фурье в соответствии с формулами (3) – (5) в этом случае определяются так:

$$a_k = \frac{2}{T} \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{6}} N_i \tau_i \cos kt; \quad (11)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{6}} N_i \tau_i \sin kt; \quad (12)$$

$$a_0 = \frac{\sum N_i \tau_i}{T}. \quad (13)$$

В качестве коэффициента  $a_0$  принимается среднее значение общего времени простоя локомотивов на ремонте в результате неисправностей. По формулам (12) – (14) в *Maple* определены коэффициенты уравнения Фурье; более подходящее итоговое уравнение прогнозирования значения простоя на ремонте по причине неисправности защелок, состоящее из первой, четвертой и восьмой гармоник [15], имеет вид:

$$Y_1 = 1,3052 + 1,0824 \cos t + 0,143 \sin t + 0,418 \cos 8t + 0,143 \sin 8t + 0,418 \cos 4t + 0 \sin 4t, \quad (14)$$

а по причине неисправности силовых токоведущих шин, состоящее из первой и седьмой гармоник:

$$Y_2 = 1,23 - 1,461 \cos t + 0,818 \sin t - 0,0764 \cos 7t + 0,141 \sin 7t. \quad (15)$$

На рисунке 5 представлены графики сезонных колебаний длительности простоя локомотивов на ремонте по причинам неисправностей шинного монтажа и защелок, полученные методом Фурье, за период с 2018 (0 рад) по 2021 г. (22 рад).

Тогда в соответствии с формулами (9) и (10) потери среднесуточного пробега на один локомотив от неисправностей защелок за период  $t$  рассчитывается так:

$$\varepsilon_1 = (1,3052 + 1,0824 \cos t + 0,143 \sin t + 0,418 \cos 8t + 0,143 \sin 8t + 0,418 \cos 4t + 0 \sin 4t) \cdot Yt / 24 / d, \quad (16)$$

а потери среднесуточного пробега на один локомотив от неисправностей силового шинного монтажа:

$$\varepsilon_2 = (1,23 - 1,461 \cos t + 0,818 \sin t - 0,0764 \cos 7t + 0,141 \sin 7t) \cdot Yt / 24 / d, \quad (17)$$

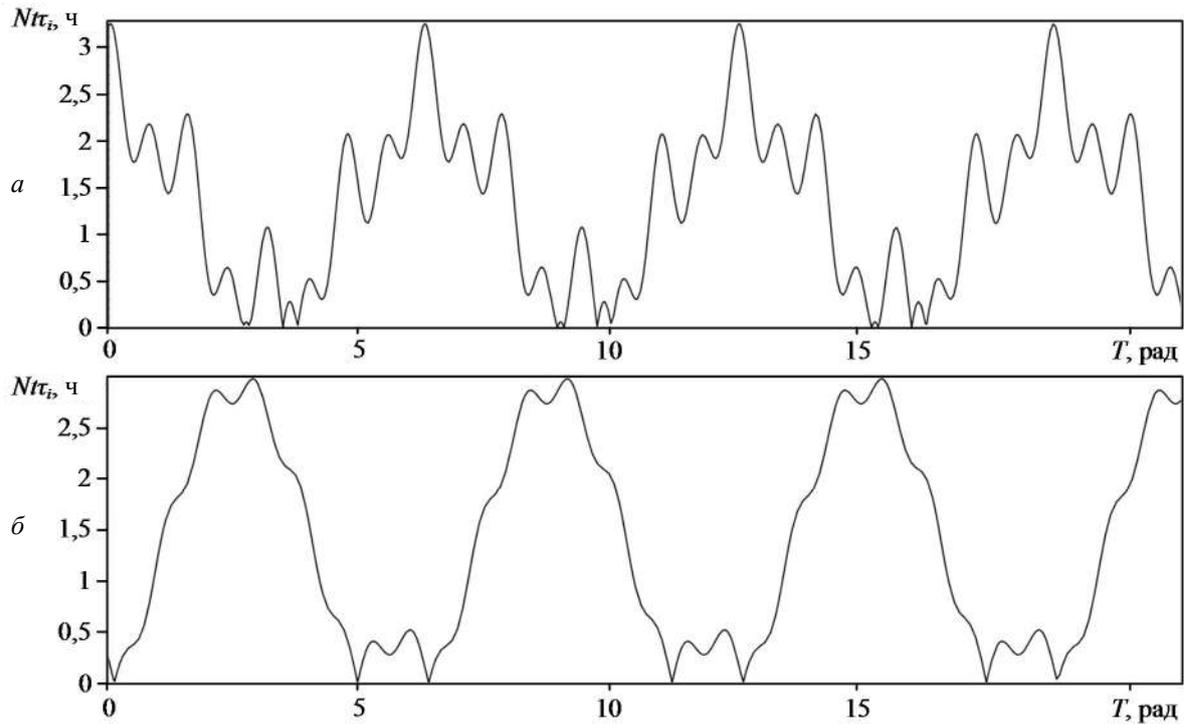


Рисунок 5 – Графики гармоник: *a* – длительность простоя по неисправностям защелок ВБО; *б* – длительность простоя по неисправностям шинного монтажа ВИПа

На рисунке 6 представлен прогноз среднесуточного пробега локомотивов с учетом влияния повышения надежности шинного монтажа ВИПа и защелок ВБО.

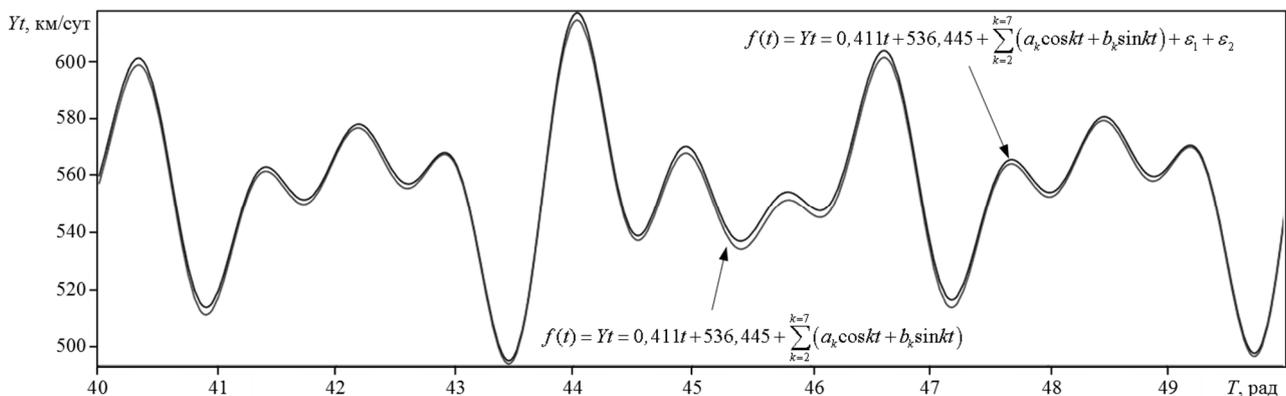


Рисунок 6 – График прогноза динамики среднесуточного пробега с учетом повышения надежности шинного монтажа ВИПа и защелок ВБО

Интегрирование уравнения (8) позволит определить полный линейный пробег локомотива:

$$L_{\text{лин}} = \frac{D}{T} \int_{t_0}^T Yt dt, \quad (18)$$

где  $T$  – прогнозируемый период, рад;  $D$  – период, календарные дни;  $t_0$  – начало эксплуатации локомотива, рад.

Тогда линейный пробег с учетом влияния повышения надежности узлов, по которым были допущены системные несоответствия, рассчитывается так:

$$L_{\varepsilon} = \frac{D}{T} \int_{t_0}^T (Yt + \sum \varepsilon_i) dt. \quad (19)$$

По формулам (18), (19) в *Maple* произведен расчет линейного пробега на всем сроке службы (33 года) одного локомотива серии «Ермак» [15, 16]:

$$L_{\text{лин}} = \frac{D}{T} \int_{t_0}^T Yt dt = 7186100 \text{ км}; \quad (20)$$

$$L_{\varepsilon} = 57,26 \int_{40,32}^{250,8} (Yt + \varepsilon_1 + \varepsilon_2) dt = 7211150 \text{ км}. \quad (21)$$

Разница между общим прогнозируемым линейным пробегом одного локомотива серии ЗЭС5К, совершенного за весь ЖЦ, и прогнозируемым линейным пробегом с учетом повышения надежности лимитирующих узлов рассчитывается как  $7211150 - 7186100 = 25250$  км.

Таким образом, повышение надежности и исключение системных несоответствий по силовым токоведущим шинам ВИПа, защелкам ВБО в дальнейшем увеличит линейный пробег электровоза на 25 тыс. км, или на 0,35 %. Стоимость полного сервисного обслуживания одного локомотива ЗЭС5К на всем ЖЦ при стоимости одного километра пробега 16,22 руб./км увеличится на 409555 руб.

По полученным результатам можно сделать вывод о незначительном влиянии неисправностей двух лимитирующих узлов на среднесуточный пробег одного локомотива, однако при учете всего парка совершенный за весь ЖЦ линейный пробег значительно увеличится. С целью минимизации влияния на пробег локомотивов дополнительно появляется необходимость в разработке действенных мер, направленных на повышение надежности критических узлов.

Разработанная методика оценки влияния системных несоответствий позволяет провести также оценку эффективности и результативности корректирующих мероприятий по повышению надежности узлов и оборудования, позволяет реализовать более точный прогноз среднесуточного, линейного пробега с учетом исключения системных недостатков, что в свою очередь дает возможность более точно спланировать программу ремонта, спрогнозировать стоимость ЖЦ локомотивов.

### Список литературы

1. Стратегия развития транспортного машиностроения Российской Федерации до 2030 года, утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 августа 2017 г. № 1756-п // [www.government.ru](http://www.government.ru): сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://static.government.ru/media/files/klnxiLOfYHPRsEe6cD9NsI0KM32LMacz.pdf> (дата обращения: 10.08.2021).
2. ГОСТ 31539–2012 Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 14 с. – [www.docs.cntd.ru](http://www.docs.cntd.ru): сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097621> (дата обращения: 10.08.2021).
3. Козырев, В. А. Менеджмент на железнодорожном транспорте : учебное пособие / В. А. Козырев, М. И. Ковальская, А. Н. Лисенков, С. В. Палкин ; под ред. В. А. Козырева. – Москва : ФГБОУ Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 675 с. – [www.umczdt.ru](http://www.umczdt.ru): сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://umczdt.ru/books/45/62152/> (дата обращения: 10.08.2021).
4. Соколов, Ю. И. Менеджмент качества на железнодорожном транспорте : учебное пособие. – Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. – 196 с. – [www.umczdt.ru](http://www.umczdt.ru): сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://umczdt.ru/books/45/62139/> (дата обращения: 10.08.2021).

5. 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. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 170–177.
6. Давыдов, Ю. А. Модернизация защелки вакуумного выключателя ВБО-25 электровоза серии 2,3,4ЭС5К / Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин, О. О. Мухин. – Текст : непосредственный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 3 (20). – С. 6–9.
7. Сажин, Ю. В. Анализ временных рядов и прогнозирование / Ю. В. Сажин, А. В. Катынь, Ю. В. Сарайкин. – Саранск : Мордовский ун-т, 2013. – 192 с. – Текст : непосредственный.
8. Химмельблау, Д. Анализ процессов статическими методами / Д. Химмельблау. – Москва : Мир, 1973. – 957 с. – Текст : непосредственный.
9. Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. – Москва : Наука, 1968. – 289 с. – Текст : непосредственный.
10. Теория прогнозирования и принятия решений / С. А. Саркисян, В. И. Каспин, В. А. Лисичкин, [и др.]. – Москва : Высшая школа, 1997. – 351 с. – Текст : непосредственный.
11. Shmueli G., Kenneth C., Lichtendahl Jr. Practical Time Series Forecasting with R: A Hands-On Guide (Practical Analytics), International Kindle paperwhite, 2016, 232 p.
12. Chatfield C., Time-Series Forecasting, Chapman and Hall/CRC, 2001, 280 p.
13. Bisgaard S., Kulahci M. Time Series Analysis and Forecasting by Example, Wiley, 2011, 400 p.
14. Harvey A., Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalman Filter, London School of Economics and Political Science, Cambridge University Press, 2014, 676 p.
15. Дьяконов, В. П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2011. – 800 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. *Strategiya razvitiya transportnogo mashinostroyeniya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda, utverzhennaya Rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 avgusta 2017 g. № 1756-r* (The strategy for the development of the transport engineering industry of the Russian Federation until 2030, approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated August 17, 2017 No. 1756-r). Available at: <http://static.government.ru/media/files/klxixLOfYHPRsEe6cD9NsI0KM32LMacz.pdf> 1200097621 (accessed 10 August 2021).
2. *Tsikl zhiznennyy zhelezodorozhnogo podvizhnogo sostava. Terminy i opredeleniya, GOST 31539-2012* (Live-cycle of railway rolling stock. Terms and definitions National Standard 31539-2012). Moscow, Standardinform, 2014, 14 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200097621> (accessed 10 August 2021).
3. Kozyrev V.A., Koval'skaya M. I., Lisenkov A.N., Palkin S.V. *Menedzhment na zhelezodorozhnom transporte* (Management on railway transport). Moscow: FSBEI «Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport», 2016, 675 p. Available at: <http://umczdt.ru/books/45/62152/> (accessed 10 August 2021).
4. Sokolov Yu. I. *Menedzhment kachestva na zhelezodorozhnom transporte* (Quality management in railway transport): Moscow: FSBEI «Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport», 2012, 196 p. Available at: <http://umczdt.ru/books/45/62139/> (accessed 10 August 2021).
5. 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 [Issledovanie mekhanicheskikh vozdeistvii na silovye shiny vypryamitel'noinvertornogo preobrazovatelya-4000-2M elektrovovozov 2 (3, 4)ES5K]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2021, no. 1 (69), pp. 170–177.

6. Davydov Yu. A., Plyaskin A. K., Mukhin O. O. Modernization of the latch of the VBO-25 vacuum circuit breaker for an electric locomotive of the 2,3,4ES5K series [Modernizatsiya zashchelki vakuumnogo vyklyuchatelya VBO-25 elektrovoza serii 2,3,4ES5K]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona – Transport of the Asia-Pacific region*, 2019, no. 3 (20), pp 6–9.
7. Sazhin Yu. V., Katyn' A. V., Saraykin Yu. V. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye* (Time series analysis and forecasting). Saransk: Mordovian University Publ., 2013, 192 p.
8. Khimmel'blau D. *Analiz protsessov staticheskimi metodami* (Analysis of processes by static methods). Moscow: Mir Publ., 1973, 957 p.
9. Pustyl'nik Ye. I. *Statisticheskiye metody analiza i obrabotki nablyudeniy* (Statistical methods of analysis and processing of observations). Moscow: Nauka Publ., 1968, 289 p.
10. Sarkisyan S. A., Kaspin V. I., Lisichkin V. A., Minayev E. S., Pasechkin G. S. *Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya resheniy* (Theory of forecasting and decision making). Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1997, 351 p.
11. Shmueli G., Kenneth C., Lichtendahl Jr. *Practical Time Series Forecasting with R: A Hands-On Guide (Practical Analytics)*, International Kindle paperwhite, 2016, 232 p.
12. Chatfield C. *Time-Series Forecasting*, Chapman and Hall/CRC, 2001, 280 p.
13. Bisgaard S., Kulahci M. *Time Series Analysis and Forecasting by Examl*, Wiley, 2011, 400 p.
14. Harvey A. *Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalman Filter*, London School of Economics and Political Science, Cambridge University Press, 2014, 676 p.
15. D'yakonov V. P. *Maple 10/11/12/13/14 v matematicheskikh raschetakh* (Maple 10/11/12/13/14 in mathematical calculations). Moscow: DMK Press Publ., 2011, 800 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Давыдов Юрий Анатольевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт железных дорог».

Тел.: +7 (4212) 407-356.

E-mail: puch@festu.khv.ru.

### Мухин Олег Олегович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Транспорт железных дорог».

Тел.: +7 914 405-30-94.

E-mail: muhino@mail.ru.

### Заболотный Владимир Владимирович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Транспорт железных дорог».

Тел.: +7 914 546-22-99.

E-mail: zabolotnyy\_vv@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Davydov Yuri Anatolyevich

Far Eastern State University of Railway Engineering (DVGUPS).

Serysheva, 47, Khabarovsk, 680021, Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor of the department "Railway Transport".

Phone.: +7 (4212) 407-356.

E-mail: puch@festu.khv.ru.

### Mukhin Oleg Olegovich

Far Eastern State University of Railway Engineering (DVGUPS).

Serysheva, 47, Khabarovsk, 680021, Russian Federation.

Postgraduate student of the department "Railway Transport".

Phone.: +7 914 405-30-94.

E-mail: muhino@mail.ru.

### Zabolotny Vladimir Vladimirovich

Far Eastern State University of Railway Engineering (DVGUPS).

Serysheva, 47, Khabarovsk, 680021, Russian Federation.

Postgraduate student of the department "Railway Transport".

Phone.: +7 914 546-22-99.

E-mail: zabolotnyy\_vv@mail.ru.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Давыдов, Ю. А. Оценка влияния системных неисправностей локомотивов на среднесуточный пробег / Ю. А. Давыдов, О. О. Мухин, В. В. Заболотный. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 31 – 41.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Davydov Yu. A., Mukhin O. O., Zabolotny V. V. Assessment of the influence of system failures of locomotives on average day run. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 3 (47), pp. 31 – 41 (In Russian).

УДК 656.2.08(045)

**В. А. Никонов<sup>1</sup>, В. С. Коссов<sup>1</sup>, Г. И. Петров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна, Российская Федерация;  
<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ (МИИТ)»), г. Москва, Российская Федерация

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ УСТРОЙСТВ КРЕПЛЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ

**Аннотация.** В статье описаны тенденции технического развития устройств крепления контейнеров, получивших название «фитинговый упор». Контейнеры постепенно завоевывали рынок перевозок США, Европы и стран Азии. И каждый вид транспорта: автомобильный, морской и железнодорожный – нуждался в устройствах крепления контейнеров, ведь ответственность за сохранность груза несут все участники перевозочного процесса. В период зарождения контейнерных перевозок важную роль сыграли коммерческие договоренности между операторами и транспортными компаниями, оказав влияние на унификацию габаритных размеров и масс контейнеров и перевозимых грузов, что явилось предпосылкой к созданию фитингов на контейнерах и, как следствие, фитинговых упоров для всех видов транспорта. Отечественная нормативная база также требовала актуализации, контроля большого количества производителей вагонов-платформ и учета сложных условий эксплуатации контейнеров на всей сети железных дорог. При стремительном развитии рынка контейнерных перевозок на протяженных маршрутах от Китая до Европы и переходе к технологии ускоренных контейнерных поездов постоянного формирования на базе скоростных вагонов-платформ возникает необходимость решения вопроса ветрозащиты порожних контейнеров и малонагруженных контейнеров с учетом скорости движения до 140 км/ч. Проведен анализ известных технических решений разных производителей по фиксации контейнеров на упорах особых форм и с дополнительной фиксацией через отверстие в упоре. Предложено оригинальное техническое решение фиксирующего устройства, выполненное на вагоне-платформе напротив каждого фитингового места установки контейнера. За счет поворота этого устройства от усилия человека можно зафиксировать каждый угол контейнера для предотвращения падения (сброса) порожних контейнеров с платформ при воздействии ветровых нагрузок, что отвечает требованиям безопасности, эксплуатации и надежности фиксации контейнера на вагоне-платформе.

**Ключевые слова:** фиксирующее устройство; фитинговый упор; скоростной вагон-платформа; ветровые нагрузки; порожний контейнер; ускоренный контейнерный поезд.

**Valery A. Nikonov<sup>1</sup>, Valery S. Kossov<sup>1</sup>, Gennady I. Petrov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>JSC “Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock” (JSC “VNIKTI”), Kolomna, the Russian Federation

<sup>2</sup>FSAEI of HE “Russian University of Transport” (MIIT), Moscow, the Russian Federation

## TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF CONTAINER FIXING DEVICES

**Abstract.** The article describes trends in the technical development of fixing devices for containers, called a "fitting retainer". Containers have gradually conquered the transportation market in the USA, Europe and Asia. And each means of transport: road, marine and railway one needed devices to fix containers, because all participants of the transportation process are responsible for the safety of goods. In the period of the appearance of container transportations, commercial agreements between operators and transport companies played an important role, influencing the unification of overall dimensions and weights of containers and transported goods, which was a prerequisite to create fittings for containers and, as a result, fitting retainers for all means of transport. The domestic regulatory framework also required updating, monitoring a large number of flat wagon manufacturers and taking into account severe operating conditions of containers

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

throughout the entire railway network. With the rapid development of the container transportation market on long routes from China to Europe and the transition to the technology of accelerated container train sets based on high-speed flat wagons, it becomes necessary to solve the issue of wind protection of empty containers and low loaded containers, taking into account the speed of up to 140 km/h. Well-known technical solutions from different manufacturers to fix containers in retainers of special shapes and with additional fixing through a retainer hole have been analyzed. An original technical solution of the fixing device is proposed, performed in the flat wagon opposite each fitting to install the container. By turning this device using man power, each corner of the container can be fixed to prevent empty containers from falling (tippling) from flat wagons when exposed to wind loads, which meets requirements of safety, operation and reliability of fixing the container in the flat wagon.

**Keywords:** fixing device; fitting retainer; high-speed flat wagon; wind loads; empty container; accelerated container train.

По данным ОАО «РЖД» перевозка универсальных контейнеров на сети железных дорог России согласно итогам января – сентября 2021 г. увеличилась на 13,2 % относительно аналогичного периода прошлого года до 4 млн 788,5 тыс. грузевых и порожних контейнеров ДФЭ (TEU). Во внутреннем сообщении отправлено 1 млн 813 тыс. ДФЭ (+6,2 %), в экспортном – 1 млн 175,1 тыс. ДФЭ (+8,9 %), в импортном – 1 млн 18,6 тыс. ДФЭ (+14,7 %), в транзитном – 781,8 тыс. ДФЭ (рост – в 1,4 раза) [1].

В связи с ежегодным наращиванием объема контейнерных перевозок особую актуальность приобретает безопасность транспортировки контейнеров в процессе осуществления железнодорожных перевозок. За последние десять лет на инфраструктуре ОАО «РЖД» были зафиксированы случаи падения (опрокидывания) порожних крупнотоннажных контейнеров с фитинговых платформ (рисунок 1) под действием порывов ветра.

Согласно распоряжению ОАО «РЖД» № 2115р от 19.10.2016 «Об утверждении Порядка организации безопасного пропуска грузовых поездов, в составе которых имеются порожние контейнеры, при прогнозировании опасного явления погоды по маршруту их следования» для обеспечения безопасности движения контейнерных поездов во время сильного ветра запрещена перевозка платформ с порожними контейнерами по ряду участков железнодорожной сети. Такое ограничение сдерживает контейнерный грузопоток в штатном режиме по различным направлениям [2].

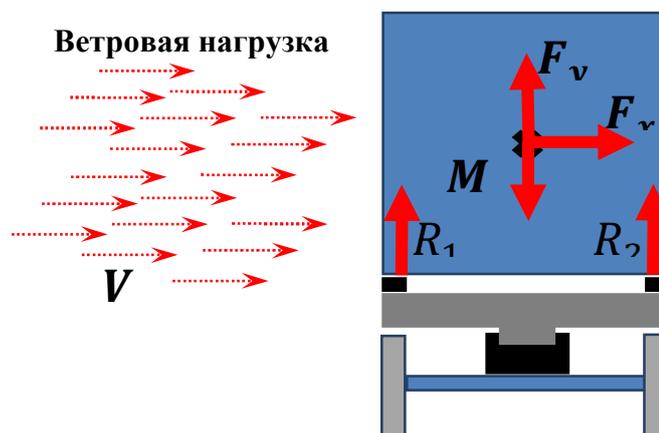


Рисунок 1 – Схема действия ветровой нагрузки, опрокидывающей контейнер

С 1956 г. для внедрения в США и далее по всему миру контейнерных перевозок использовались контейнеры различных размеров и систем крепления; так, только в США насчитывались десятки несовместимых вариантов. Постепенно в результате договоренностей между морскими транспортными компаниями, работающими в разных странах, и железными дорогами Европы и США ISO приняла четыре рекомендации, которые позволили унифицировать контейнеры по всему миру. В 1968 г. был введен в действие межгосударственный стандарт

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ISO 668–1968 «Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и номинальные характеристики», описывающий размеры контейнеров и требования к использованию в интермодальных перевозках различным транспортом [3].

В нашей стране фитинговый упор для установки контейнера впервые применен в конструкции вагона-платформы модели 13-470, изготавливаемого с 1976 по 1986 г. двумя заводами – ОАО «Днепровагонмаш» и ПО «Абаканвагонмаш».

В период с 1976 по 2007 г. при увеличении потребности в контейнерных перевозках железнодорожным транспортом увеличивалось количество разработчиков и производителей вагонов-платформ для перевозки контейнеров, при этом каждый производитель применял в платформах свою конструкцию фитингового упора. Таким образом, отсутствие общих требований по унификации конструкции привело к необходимости обеспечения наличия на ремонтных предприятиях запаса фитинговых упоров различных производителей платформ.

По данным эксплуатирующих организаций на сети железных дорог в период с 1964 по 2012 г. использовалось более 30 типов грузовых вагонов-платформ общей численностью более 45 тыс. единиц (таблица 1).

Таблица 1 – Номенклатура выпущенных вагонов-платформ с 1964 по 2012 г.

Год выпуска	Модели вагонов-платформ	Производители	Количество выпущенных платформ, ед.
1	2	3	4
1964	13-401М1	ОАО «Днепровагонмаш»	1222
1964		ПАО «Крюковский вагоностроительный завод»	
1976		ОАО «Стахановский вагоностроительный завод»	
1964	13-401-17	ОАО «Днепровагонмаш»	1193
1970	23-469-07		568
1976	13-470	ОАО «Днепровагонмаш»	5093
		ПО «Абаканвагонмаш»	
1986	13-9004, -01	ПО «Абаканвагонмаш»	11902
1993	13-9007		67
1993	13-935А	ОАО «Стахановский ВРЗ»	58
1993	13-4085	ОАО «Днепровагонмаш»	289
1997	13-297	ОАО «Алтайвагон»	50
1997	13-3103	ОАО «Брянский машиностроительный завод»	50
1998	13-4095	ОАО «Днепровагонмаш»	57
2002	13-2114К	ОАО «Алтайвагон»	279
2003	13-9015	ПО «Абаканвагонмаш»	5
2004	13-2116	ОАО «Алтайвагон»	160
2004	13-2116-01, -02, -03		36
2004	13-4094 -01	ОАО «Днепровагонмаш»	350
2005	13-7024	ПАО «Крюковский вагоностроительный завод»	1427
2006	13-1223	ОАО «Рузхиммаш»	653
2006	13-1796	ОАО «Мариупольский завод тяжелого машиностроения»	377
2006	13-4117	ОАО «Днепровагонмаш»	545
2006	13-9744-01	ОАО «Трансмаш»	5928
2006	23-469-07	АО «Завод металлоконструкций»	9889
2008	13-1281-01	ОАО «Рузхиммаш»	330
2008	13-9751-01	ОАО «Трансмаш»	2859
2009	13-1172	ТОО «Аралвагон»	8

1	2	3	4
2010	13-9781	ЗАО «Промтрактор-Вагон»	1038
2010	13-9852	АО «ЗИКСТО»	315
2011	13-1163-01	АО «Завод металлоконструкций»	289
2012	13-2114К	ОАО «Рославльский вагоноремонтный завод»	87

Существующие конструкции фитингового упора спроектированы в соответствии с требованиями «Норм расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм» [4], имеют унифицированную конструкцию и отвечают требованиям п. 9.3.4 ГОСТ Р ИСО 3874–2008, в котором сказано, что «...контейнеры должны опираться на железнодорожную платформу только всеми четырьмя нижними угловыми фитингами посредством универсальных конусов, препятствующих скольжению и опрокидыванию под действием продольных и поперечных сил, либо стопорами с поворотной головкой...» [5]. Наличие единых требований привело к улучшению ситуации в ремонте. Ниже приведена статистическая динамика текущих отцепочных ремонтов (ТОРов) грузовых платформ по причине неисправности фитинговых упоров (рисунок 2).

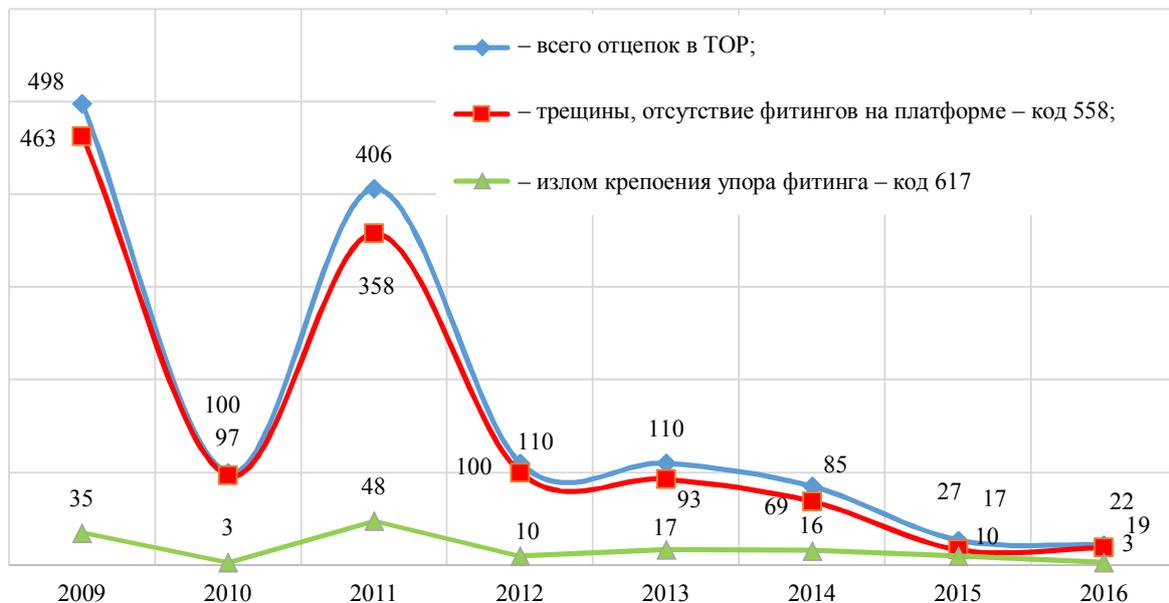


Рисунок 2 – Динамика ТОРов платформ по причине неисправности фитинговых упоров

В настоящее время в связи с возрастанием доли контейнеров увеличенных габаритов типоразмеров 1AAA (40 футов), 1EEE (45 футов) и контейнеров 53 фута на рынке интермодальных перевозок в развитии основных евроазиатских транзитных маршрутов «Восток – Запад» и «Север – Юг» обеспечение высокого уровня безопасности на железнодорожном транспорте стало одним из приоритетных направлений.

В действующем ГОСТ Р ИСО 3874–2008 [5] указано несколько способов крепления контейнеров при их перевозке, в частности автомобильным транспортом (рисунок 3). При этом для обеспечения безопасности перевозок контейнеры должны опираться на платформу только всеми четырьмя нижними угловыми фитингами или только опорными площадками в основании конструкции контейнера. Контейнеры должны быть прикреплены к платформе всеми четырьмя нижними угловыми фитингами посредством универсальных конусов, препятствующих

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

щих скольжению и опрокидыванию под действием продольных и поперечных сил, либо стопорами с поворотной головкой, либо другими средствами, соответствующими требованиям стандарта [3]. Примеры крепления, реализованные на транспорте, приведены на рисунке 3.

Указанные на рисунке 3 устройства содержат элементы, подходящие для транспортировки типовых контейнеров с размерами и весом по требованиям национальных нормативных стандартов [6, 7] автомобильного, морского и железнодорожного транспорта.

С 2016 г. получили развитие аналоги западных упоров, имеющих особую форму в средней части (рисунок 4), которая обеспечивает зацепление фитинга порожнего контейнера при поднимающей ветровой нагрузке за счет размещения одной пары упоров, ориентированных на одну сторону платформы, и второй пары упоров, ориентированных в противоположные стороны. Тем самым предполагается появление эффекта кососимметричного распираания фитингов относительно упоров. Такие устройства обязательно требовали запирания упора фитинга отдельным пальцем для исключения действия вертикальных сил.

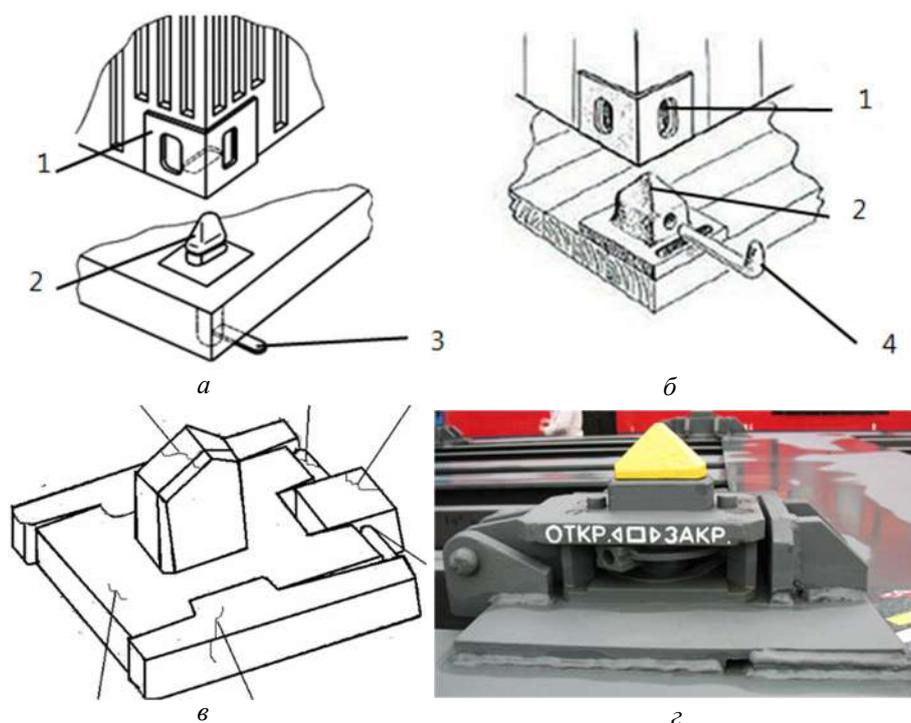


Рисунок 3 – Крепление контейнеров с применением упорных конусов: 1 – фитинг; 2 – конус; 3 – поворотный запор; 4 – закладной палец (штырь)

С учетом выявленных особенностей существующих технических решений крепления контейнера к разрабатываемым устройствам, обеспечивающим безопасность перевозок в контейнерных поездах постоянного формирования, необходимо предъявлять следующие основные требования:

- надежность крепления контейнера при воздействии продольных и поперечных сил;
- фиксация от опрокидывания в поперечной плоскости;
- отсутствие воздействия на крепление продольных нагрузок при соударениях вагонов с гружеными контейнерами;
- возможность визуального осмотра и контроля устройства фиксации контейнера и упоров фитингов без подъема контейнеров;
- пригодность к эксплуатации в условиях железнодорожных предприятий и специализированных контейнерных терминалов.

В связи с этим потребовалось разработать фиксирующее устройство по закреплению контейнеров на скоростном вагоне-платформе, предназначенном для перевозки контейнеров с эксплуатационной скоростью до 140 км/ч [8], позволяющее сочетать простоту фиксирующего устройства с его надежностью без доработки универсального фитингового узла контейнера.

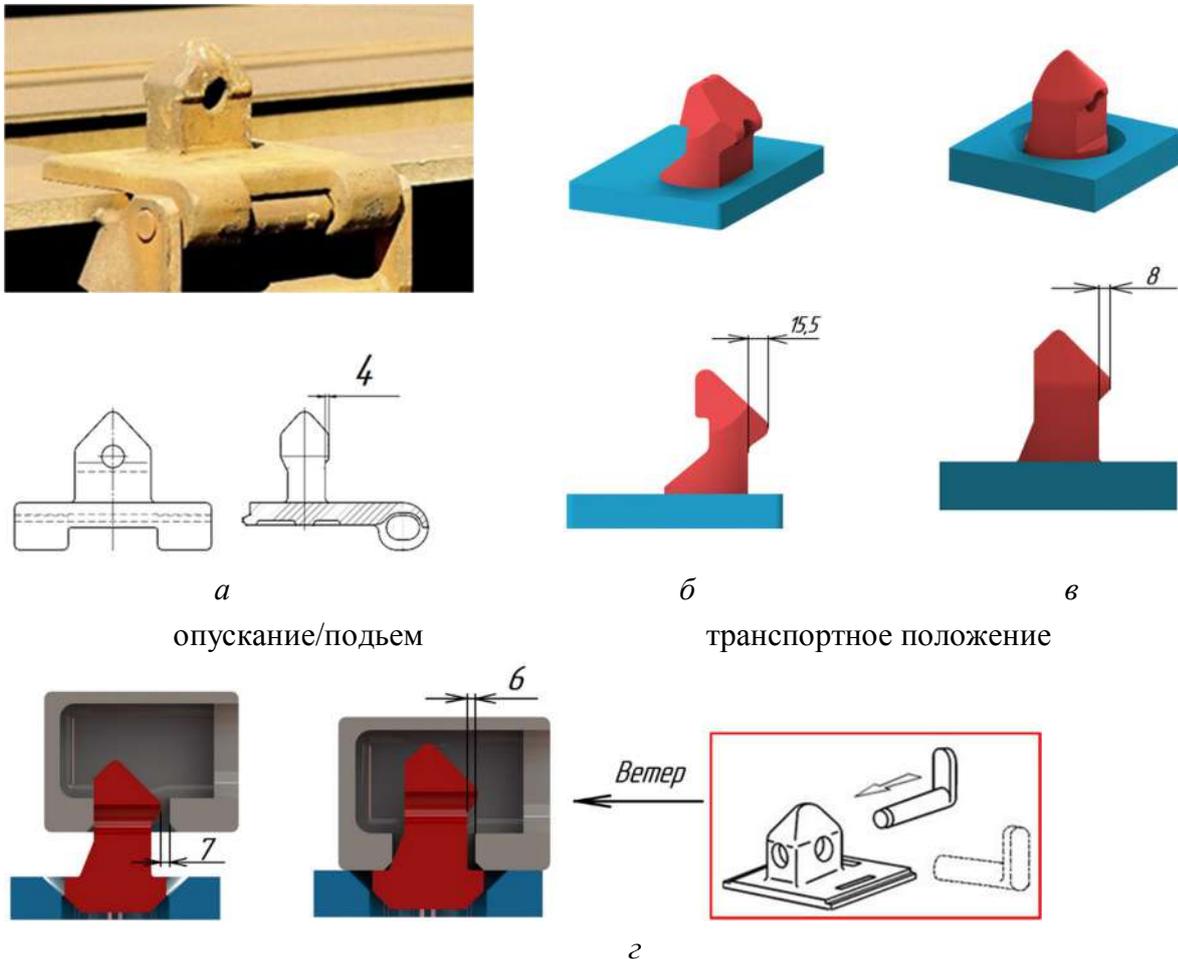


Рисунок 4 – Варианты фитинговых упоров с особой удерживающей средней частью:  
 а – АО «Татравогонка» (Словакия); б – ООО «СотекКомЦентр»; в – ООО «УК «РМ-Рэйл»;  
 г – установка контейнера на упор и фиксация стопорным пальцем

Специалистами АО «ВНИКТИ» была разработана конструкция фиксирующего устройства фитинга контейнера, проведены прочностные расчеты на основе моделирования динамических свойств платформы и на соответствие ветровому воздействию [9].

Конструкция устройства (фиксатора) представлена на рисунке 5. Фиксатор содержит стопор (короткий штырь) и более длинную ось, с двух сторон приваренные к рукоятке и образующие замкнутую конструкцию. В нерабочем положении рукоятка расположена горизонтально, причем стопор утоплен в отверстие, выполненном в боковой балке рамы.

Для приведения фиксатора в рабочее (вертикальное) положение необходимо, взявшись за рукоятку, вытянуть стопор из отверстия в балке рамы (движением на себя), сжимая пружину на оси внутри втулки, а затем повернуть вверх на  $90^\circ$  и отпустить. Под действием пружины стопор фиксатора входит в боковое отверстие на фитинге контейнера и занимает рабочее положение. Таким образом, при воздействии на контейнер опрокидывающих сил стопор через фитинг препятствует наклону и опрокидыванию контейнера.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Фиксирующее устройство (фиксатор) предназначено для ограничения вертикальных перемещений фитинга и предотвращения опрокидывания порожнего контейнера, установленного на скоростной железнодорожной платформе (рисунок 6).

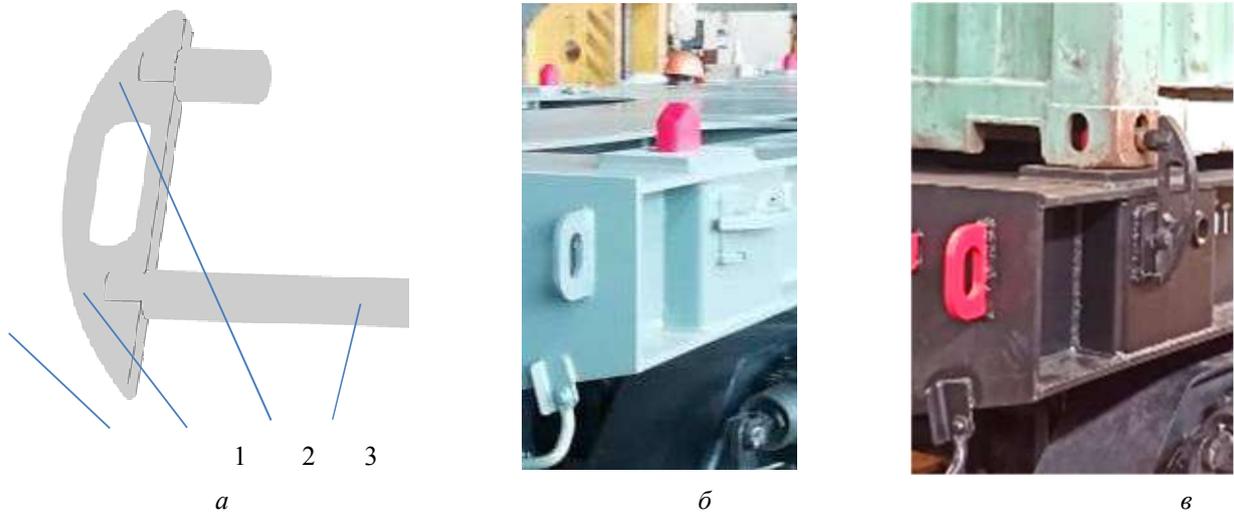


Рисунок 5 – Фиксирующее устройство на вагоне-платформе модели 13-6704:

- а) конструкция фиксатора (1 – рукоятка; 2 – поворотная ось; 3 – стопор фитинга; 4 – место упругого элемента); б) фиксатор в горизонтальном положении без контейнера;  
в) фиксатор в транспортном положении удерживает контейнер на платформе

Детали устройства выполнены из стали 09Г2С (с пределом текучести  $\sigma_T = 295$  МПа). Стопор и ось выполнены из прутка диаметром 50 и 40 мм соответственно, толщина ручки 25 мм, высота 350 мм.

Расчет на прочность фиксирующего устройства [10] проводился согласно Нормам для расчета... [4] при совместном действии нагрузок: веса порожнего контейнера, приходящегося на один упор; вертикальной добавки от действия центробежной силы порожнего контейнера; вертикальной добавки от действия продольной силы инерции порожнего контейнера при действии нормированного продольного ускорения; вертикальной добавки от действия боковой силы давления силы ветра из расчета давления ветра, равного 500 Па, на боковую поверхность контейнера. Величины нагрузок и расчетные формулы приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные нагрузки, действующие на фиксирующее устройство (фиксатор)

Расчетная нагрузка	Расчетная формула	Значение для упоров контейнера длиной	
		1AAA	1EEE
Вес порожнего контейнера, Н	$P_{\text{верт}}^{\text{порожн}} = \frac{M_i \cdot g}{n_y}$	8826	10 248
Вертикальная добавка от действия боковой силы давления ветра, Н	$P_{\text{верт}}^{\text{ветров}} = \frac{500 \cdot h_K \cdot L_{Ki}}{4} \cdot \frac{h_K}{b_K}$	5658	-6364
Вертикальная добавка от действия продольной силы инерции порожнего контейнера, Н	$P_{\text{верт}}^{\text{прод}} = M_i \cdot a_{III} \cdot \frac{h_K}{4 \cdot l_K}$	-3199	-3295
Суммарная вертикальная нагрузка, Н	$\Sigma$	-880	-397

Примечание.  $M_i$  – масса порожнего контейнера, кг;  $g$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $n_y$  – количество упоров под фитинги, ед.;  $h_K$  – высота контейнера, м;  $L_{Ki}$  – номинальная длина контейнера, м;  $b_K$  – расстояние между упорами под фитинги по ширине контейнера, м;  $a_{III}$  – нормированное ускорение при третьем расчетном режиме, м/с<sup>2</sup>;  $l_K$  – расстояние между упорами под фитинги по длине контейнера, м.

Распределение эквивалентных напряжений при нагружении фиксирующего устройства суммарной вертикальной нагрузкой 880 Н показано на рисунке 6.

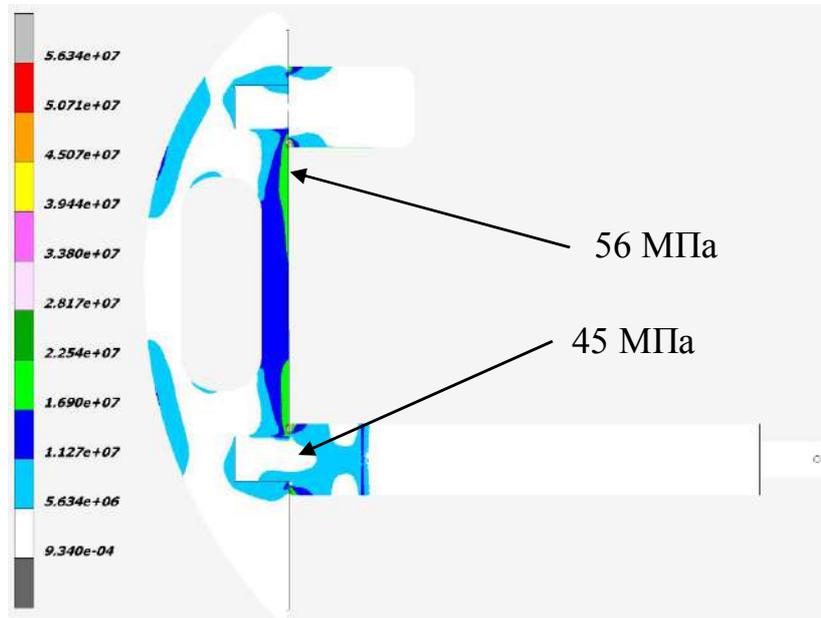


Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений при нагружении фиксирующего устройства

Как показали результаты расчета, максимальные напряжения в рукоятке фиксирующего устройства составили 56 и 45 МПа, что значительно ниже допускаемых значений 195 МПа. Следовательно, конструкция фиксирующего устройства выдержит нагрузки, которые появляются при возникновении сил опрокидывания порожних крупнотоннажных контейнеров типоразмеров 1ААА (40 футов) и 1ЕЕЕ (45 футов) при воздействии больших ветровых нагрузок на опасных участках эксплуатации.

На основании изложенного можно сделать следующее заключение.

Порожние контейнеры типоразмера 1ААА (40 футов) и 1ЕЕЕ (45 футов) имеют недостаточный запас устойчивости от опрокидывания в боковом направлении при действии ветровой нагрузки со скоростью более 30 м/с. Для обеспечения устойчивости порожних контейнеров необходимо ввести элементы крепления, не допускающие опрокидывания контейнера.

Согласно проекту ГОСТ Р «Вагоны-платформы четырех и шестиосные скоростные. Общие технические условия» при перевозке контейнеров в составе контейнерного поезда постоянного формирования со скоростями пакета пассажирского движения 90...140 км/ч рекомендуется применять разработанное крепление, обеспечивающее надежную фиксацию контейнера от опрокидывания при воздействии продольных и поперечных сил, т. е. не допускающую критического отрыва фитингов контейнера выше упора платформы, пригодное к эксплуатации в условиях контейнерных терминалов.

Преимущества предлагаемой конструкции фиксации, обеспечивающие безопасность перевозок, – прочность и надежность фиксации контейнера к раме, эффективность с точки зрения простоты и небольшой массы конструкции, возможности установления состояния устройства путем визуального осмотра на расстоянии (состояние «закрыто/открыто»), минимальных затрат времени и труда для установки и снятия креплений.

При испытании крепления контейнеров на устойчивость от опрокидывания рекомендуется использовать предложенную методику и результаты расчета аэродинамических нагрузок на контейнеры.

## Список литературы

1. Перевозки контейнеров по сети РЖД выросли на 13,2 % в январе – сентябре. – rzd.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: [company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=267196](https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=267196) (дата обращения: 20.10.2021).
2. Березин, А. А. Упор для инициативы. Стихия вынуждает пересмотреть конструкцию фитинговых платформ / А. А. Березин. – Текст : непосредственный // Гудок. – 2016. – № 203. – С. 4.
3. ISO 668–1968. Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и номинальные характеристики. – 5 с. – Текст : непосредственный.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с. – Текст : непосредственный.
5. ГОСТ Р ИСО 3874–2008. Контейнеры грузовые серии 1. Перегрузка и крепление. – Москва : Стандартиформ, 2008. – 62 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ Р 53350–2009 (ИСО 668:1995). Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса. – Москва : Стандартиформ, 2018. – 19 с. – Текст : непосредственный.
7. ГОСТ Р 51891–2008 (ИСО 1161:1984). Контейнеры грузовые серии 1. Фитинги. Технические условия. – Москва : Стандартиформ, 2009. – 31 с. – Текст : непосредственный.
8. Скоростной вагон-платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-6704: особенности конструкции и перспективы применения / В. С. Коссов, В. А. Никонов, А. М. Шевцов [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ИПЕМ. Техника железных дорог. – 2021. – № 3. – С. 30–34.
9. Патент № 2647358 Российская Федерация, С1 МПК В60Р 7/13(2006.01), В61D 3/20(2006.01), В61D 45/00(2006.01). Устройство для крепления контейнера к раме платформы : № 2016147943 : заявлено 07.12.2016 : опубликовано 15.03.2018 / Никонов В. А., Мещерин Ю. В., Михайлов Г. И., Михалин Н. В., Чепурнова О. В., Трепачева Т. В. ; заявитель АО «ВНИКТИ». – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.
10. 6704.14.10.000РР. Расчет на прочность фиксирующего устройства : № 15-34-21. – Коломна : АО «ВНИКТИ», 2021. – 12 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. *Perevozki konteynerov po seti RZHD vyrosli na 13.2 % v yanvare – sentyabre* [Container transportations in RZD network have grown up by 13.2% in January-September], Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=267196> (accessed 20 October 2021).
2. Berezin A. A. *Upor dlya initsiativy. Stikhiya vynuzhdayet peresmotret' konstruktsiyu fitingovykh platform* [Retainer for an initiative. Nature forces to reconsider the design of fitting flat wagons]. *Gudok – Beep*, 2016, no. 203, p. 4.
3. *ISO 668-1968. Konteynery gruzovyye serii 1. Klassifikatsiya, razmery i nominal'nyye kharakteristiki* [Series 1 freight containers – Classification, dimensions and ratings, ISO 668-1968]. 5 p.
4. *Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Standards to calculate and design wagons (unpowered) of railways of the Ministry of Railways of 1520 mm track gauge]. Moscow, GosNIIV – VNIIZhT, 1996, 319 p.
5. *GOST R ISO 3874-2008. Konteynery gruzovyye serii 1. Peregruzka i krepleniye* [Series 1 freight containers. Transshipment and fixing, state standard of Russia ISO 3874-2008]. Moscow, Standartinform, 2008, 62 p.
6. *GOST R 53350-2009 (ISO 668:1995). Konteynery gruzovyye serii 1. Klassifikatsiya, razmery i massa* [Series 1 freight containers. Classification, dimensions and weight, state standard of Russia 53350-2009 (ISO 668: 1995)]. Moscow, Standartinform, 2018, 19 p.

7. GOST R 51891-2008 (ISO 1161:1984). *Konteynery gruzovyye serii 1. Fitingi. Tekhnicheskiye usloviya* [Series 1 freight containers. Fittings. Technical conditions, GOST R 51891–2008 (ISO 1161:1984)]. Moscow, Standartinform, 2009, 31 p.

8. Kossov V. S., Nikonov V. A., Shevtsov A. M., Romanov S. A., Epshteyn K. K., Savchenkov V. V. *Skorostnoy vagon-platforma dlya perevozki krupnotonnazhnykh konteynerov modeli 13-6704: osobennosti konstruksii i perspektivy primeneniya* (A high-speed flat wagon to transport high-capacity containers of model 13-6704: design features and application prospects). *Vestnik IPEM. Tekhnika zheleznykh dorog – IPEM Bulletin. Railway engineering*, 2021, no. 3, pp. 30–34.

9. Nikonov V. A., Meshcherin Yu. V., Mikhaylov G. I., Mikhalin N. V., Chepurnova O. V., Trepacheva T. V. *Ustroystvo dlya krepneniya konteynera k rame platfomy* [A device to fix a container to the flat wagon frame]. *Patent RU 2647358*, 15.03.2018.

10. 6704.14.10.000PP. *Raschet na prochnost' fiksiruyushchego ustroystva* (Strength calculation of the fixing device), 6704.14.10.000PP), № 15-34-21. Kolomna, JSC “VNIKTI”, 2021, 12 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Никонов Валерий Алексеевич

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, 140402, Московская область, Российская Федерация.

Главный конструктор.

Тел.: 8(496)615-46-88, моб. 8(926)569-22-24.

E-mail: nikonov-vniki@yandex.ru

### Коссов Валерий Семенович

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, 140402, Московская область, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, генеральный директор.

Тел.: 8(496)618-82-39.

E-mail: info@vniki.com

### Петров Геннадий Иванович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ (МИИТ)»).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, ГСП-4, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вагонов и вагонного хозяйства.

Тел.: 8(495)684-21-83.

E-mail: petrovgi@gmail.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Никонов, В. А. Тенденции развития устройств крепления контейнеров / В. А. Никонов, В. С. Коссов, Г. И. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 41 – 50.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Nikonov Valery Alekseyevich

Joint Stock Company “Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock” (JSC “VNIKTI”).

Oktyabrskoy Revolyutsii st., 410, 140402, Moscow region, Kolomna, the Russian Federation.

Chief designer.

Tel.: 8(496)615-46-88, mob. 8(926)569-22-24.

E-mail: nikonov-vniki@yandex.ru

### Kossov Valery Semenovich

Joint Stock Company “Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock” (JSC “VNIKTI”).

Oktyabrskoy Revolyutsii st., 410, 140402, Moscow region, Kolomna, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, General Director.

Phone: 8(496)618-82-39.

E-mail: info@vniki.com

### Petrov Gennady Ivanovich

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Russian University of Transport” (MIIT).

Obraztsova st., 9, bld. 9, 127994, GSP-4, Moscow.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, Head of the Department of Wagons and Wagon Facilities.

Phone: 8(495)684-21-83.

E-mail: petrovgi@gmail.com

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nikonov V. A., Kossov V. S., Petrov G. I. Trends in the development of container fixing devices. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 3 (47), pp. 41 – 50 (In Russian).

**И. А. Меншиков, А. С. Космодамианский, С. И. Баташов**

Российская открытая академия транспорта (РОАТ) Российского университета транспорта, г. Москва,  
Российская Федерация

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТИПА 1ТВ2822 ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭС10 «ГРАНИТ» С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТОКА

**Аннотация.** Статья посвящена совершенствованию методики диагностирования технического состояния асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 грузового магистрального электровоза серии 2ЭС10 «Гранит». Для диагностирования межвитковой изоляции обмоток статора предложена структурная модель замкнутой асинхронной системы тягового электродвигателя типа 1ТВ2822. Представлены результаты моделирования работоспособного и аварийного режимов функционирования тягового электродвигателя. С помощью цифровой обработки осциллограмм тока обмотки статора получены логарифмические спектрограммы тока статора, графики псевдоспектра мощности логарифмического спектрального компонента тока статора как работоспособного, так и аварийного тягового асинхронного электродвигателя типа 1ТВ2822 с межвитковым замыканием в обмотке статора. На основании анализа графика псевдоспектра мощности, выполненного с помощью цифровой обработки осциллограммы кривой тока в пакете программы MATLAB, представлены логарифмические мощности спектра тока в обмотке статора, служащие для построения бортовой адаптивной системы диагностирования асинхронных тяговых электродвигателей типа 1ТВ2822 электровоза 2ЭС10 «Гранит».

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель, структурная модель, обмотка статора, логарифмический спектральный анализ, частотные характеристики.

**Igor A. Menshchikov, Andrey S. Kosmodamianskiy, Sergei. I. Batashov**

Russian Open Academy of Transport (ROAT) of Russian University of Transport, Moscow, the Russian Federation

## IMPROVEMENT OF DIAGNOSTICS OF ISOLATION OF STATOR WINDINGS OF ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC MOTOR TYPE 1TV2822 OF ELECTRIC LOCOMOTIVE 2ES10 «GRANIT» BY MEANS OF SPECTRAL ANALYSIS OF CURRENT

**Abstract.** The article is devoted to improving the methodology for diagnosing the technical condition of an asynchronous traction electric motor of type 1TV2822, a cargo mainline electric locomotive of the 2ES10 "Granit" series. To diagnose the inter-turn isolation of the stator windings, a structural model of a closed asynchronous traction motor system of type 1TV2822 is proposed. The results of modeling the operational mode and emergency mode of operation of a traction electric motor are presented, using digital processing of current waveforms in the stator winding, logarithmic spectrograms of the stator current are obtained, graphs of the pseudo spectrum of the power of the logarithmic spectral component of the stator current as operable, and an emergency traction asynchronous electric motor of type 1TV2822 with an inter-turn circuit in the stator winding. Based on the analysis of the power pseudo spectrum graph performed using digital processing of the current curve waveform in the MATLAB program package, the logarithmic powers of the current spectrum in the stator winding are presented, which serve to build an on-board adaptive system for diagnostics of asynchronous traction electric motors of the type 1TV2822 of the electric locomotive 2ES10 «Granite».

**Keywords:** traction electric motor, simulation model, stator winding, logarithmic spectral analysis, frequency characteristics.

В связи с повышением интенсивности движения на железнодорожном транспорте растут потребности в повышении надежности, безопасности и устойчивости функционирования электроподвижного состава. Наиболее перспективным направлением, призванным удовлетворить эти потребности, является разработка и внедрение на электрическом транспорте железных дорог адаптивных бортовых систем диагностирования технического состояния тяговых

электродвигателей (ТЭД). Основной проблемой в создании адаптивных бортовых систем диагностирования тяговых электродвигателей является сложность идентификации причинно-следственных связей развития дефектов. Степень влияния дефектов на работоспособность тяговых электродвигателей зависит от многих конструктивных, производственных и эксплуатационных факторов, а также от характеристик самого дефекта [1 – 4].

На электрическом транспорте железных дорог существуют несколько методов диагностирования технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей (АТЭД), однако каждый из них имеет свои недостатки. Наиболее оптимальным для условий создания бортовых систем диагностики АТЭД является метод измерения и анализа электрических параметров тяговых электродвигателей [1, 2, 8].

Математическая модель асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 электроваза серии 2ЭС10 «Гранит» в неподвижной системе координат представляет собой пространственные векторы, разложенные по действительной оси  $\alpha$  и мнимой оси  $\beta$  [9, 10]:

$$\bar{u}_s = u_{s\alpha} + ju_{s\beta}; \quad \bar{i}_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}; \quad \bar{\psi}_R = \psi_{R\alpha} + j\psi_{R\beta}. \quad (1)$$

Запишем эти значения в общее известное уравнение асинхронного тягового электродвигателя с короткозамкнутым ротором. В результате получим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{s\alpha} = ri_{s\alpha} + L'_S \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R p \omega_m \psi_{R\beta}; \\ u_{s\beta} = ri_{s\beta} + L'_S \frac{di_{s\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} + k_R p \omega_m \psi_{R\alpha}; \\ 0 = -k_R R_R i_{s\alpha} + \frac{1}{T_R} \psi_{R\alpha} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + p \omega_m \psi_{R\beta}; \\ 0 = -k_R R_R i_{s\beta} + \frac{1}{T_R} \psi_{R\beta} + \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} - p \omega_m \psi_{R\alpha}; \\ M = \frac{3}{2} p k_R (\psi_{R\alpha} i_{s\beta} - \psi_{R\beta} i_{s\alpha}); \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H. \end{array} \right. \quad (2)$$

Система уравнений асинхронного тягового электродвигателя с короткозамкнутым ротором 1ТВ2822 в операторной форме примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{s\alpha} = r(1 + T'_S S) i_{s\alpha} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R p \omega_m \psi_{R\beta}; \\ u_{s\beta} = r(1 + T'_S S) i_{s\beta} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} + k_R p \omega_m \psi_{R\alpha}; \\ 0 = -k_R R_R i_{s\alpha} + \frac{1}{T_R} (1 + T'_R S) \psi_{R\alpha} + p \omega_m \psi_{R\beta}; \\ 0 = -k_R R_R i_{s\beta} + \frac{1}{T_R} (1 + T'_R S) \psi_{R\beta} - p \omega_m \psi_{R\alpha}; \\ M = \frac{3}{2} p k_R (\psi_{R\alpha} i_{s\beta} - \psi_{R\beta} i_{s\alpha}); \\ JS \omega_m = M - M_H. \end{array} \right. \quad (3)$$

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

где  $r = (R_s + k_R^2 R_R)$  – приведенное значение активного сопротивления обмотки статора к активному сопротивлению ротора;  $L'_S = \left( L_S - \frac{L_m^2}{L_R} \right)$  – приведенное значение индуктивности обмотки статора к индуктивности обмотке ротора;  $k_R = \frac{L_m}{L_R}$  – коэффициент магнитных связей в обмотке ротора;  $T_R = \frac{L_R}{R_R}$  – постоянная времени обмотки ротора;  $u_{s\alpha}$  и  $u_{s\beta}$  (В) – напряжение питания обмотки статора по действительной оси  $\alpha$  и по мнимой оси  $\beta$ ;  $i_{s\alpha}$  и  $i_{s\beta}$  (А) – токи в обмотке статора по действительной оси  $\alpha$  и по мнимой оси  $\beta$ ;  $R_R$  (Ом) – активное сопротивление обмотки ротора;  $\Psi_{R\alpha}$  и  $\Psi_{R\beta}$  (Вб) – потокосцепление обмотки ротора по действительной оси  $\alpha$  и по мнимой оси  $\beta$ ;  $L'_S$  (Гн) – приведенная индуктивность обмотки статора;  $\omega_m$  (рад/с) – угловая частота вращения ротора;  $p$  – число пар полюсов тягового электродвигателя;  $M$  (Нм) – электромагнитный момент асинхронного тягового электродвигателя;  $M_H$  (Нм) – момент нагрузки на валу асинхронного тягового электродвигателя;  $J$  (кг) – момент инерции на валу асинхронного тягового электродвигателя;  $S$  – скольжение ротора асинхронного тягового электродвигателя;  $T'_S = \frac{L'_S}{r}$  (с) – приведенная постоянная времени обмотки статора.

На основании системы уравнений (3) математической модели асинхронного тягового электродвигателя предложена структурная модель асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 электровоза 2ЭС10 «Гранит» в программе MATLAB/Simulink [5 – 7, 9] (рисунок 1).

Исходными данными для разработки структурной модели асинхронного электродвигателя являлись паспортные данные тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 и значения рассчитанных коэффициентов математического моделирования в неподвижной системе координат в операторной форме [3, 5, 9, 10].

Для моделирования диагностического процесса асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 задавались параметры расчета в соответствии с таблицами 1 и 2.

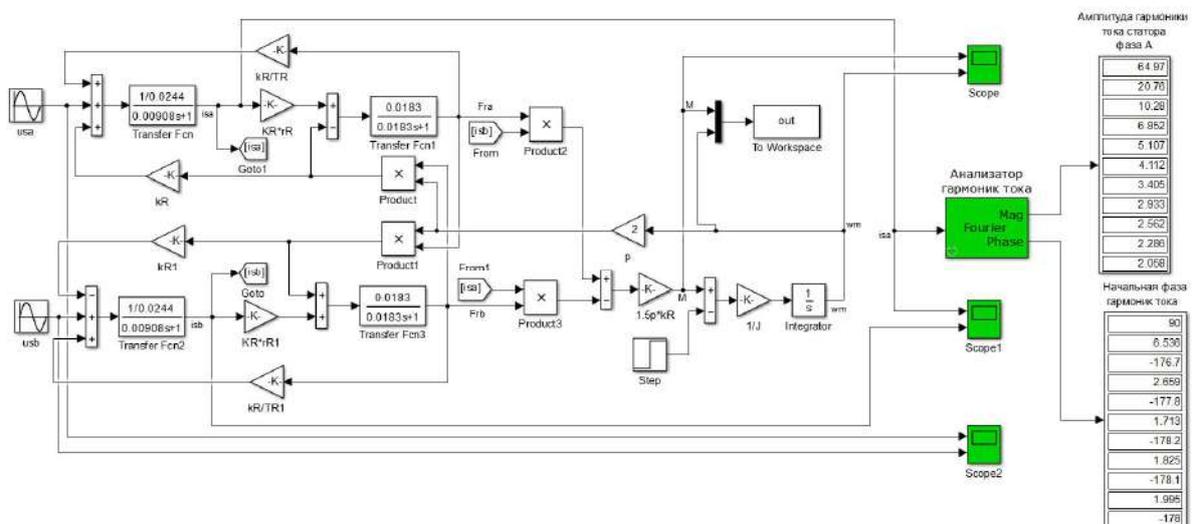


Рисунок 1 – Структурная модель работоспособного асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 электровоза 2ЭС10 «Гранит»

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для оперативного выявления межвиткового замыкания в обмотках статора тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 авторами предлагается использовать методику спектрального анализа тока, позволяющую из логарифмической спектрограммы тока вычислить значения мощности логарифмических спектральных компонентов тока в обмотках статора на различных частотных гармониках тока, разложенных в ряд Фурье и чувствительных к повреждению межвитковой изоляции, что увеличивает достоверность и селективность диагностирования опасных отказов.

Это обусловлено тем, что каждому виду повреждения соответствуют своя характерная гармоника частоты тока статора и логарифмическая мощность компонента тока.

В структурной модели асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 задавались следующие параметры в соответствии с паспортными данными на тяговый электродвигатель типа 1ТВ28222 электровоза 2ЭС10 «Гранит»: номинальная часовая мощность 1050 кВт; номинальное напряжение в цепи обмотки статора  $U_{ном} = 335$  В; сопротивление обмотки статора  $r_s = 0,01253$  Ом; индуктивность обмотки статора  $l_s = 0,000226$  Гн; сопротивление обмотки ротора  $r_r = 0,01231$  Ом; индуктивность обмотки ротора  $l_r = 0,000226$  Гн; индуктивность цепи намагничивания  $l_m = 0,0002225$  Гн; номинальный момент вращения  $M_n = 11,141$  кНм; номинальная частота вращения ротора  $n = 900$  об/мин; номинальная частота тока статора  $f_n = 9930$  Гц; КПД – 0,93[1].

Коэффициенты структурной модели тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 работоспособного тягового электродвигателя 1ТВ2822 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты структурной модели тягового электродвигателя типа 1ТВ2822

Коэффициент	$r$	$T'_s$	$T_R$	$k_R$	$L'_s$
Единица измерения	Ом	С	С	-	Гн
Значение коэффициента	0,0244	0,00908	0,0183	0,9845	0,0002197

Значения амплитуды гармоник тока обмотки статора и начальная фаза тока работоспособного тягового электродвигателя 1ТВ2822 представлены в таблице 2.

Так как осциллограмма кривой тока симметрична относительно оси абсцисс, то при разложении такой кривой в ряд Фурье будут отсутствовать постоянная составляющая и четные гармоники тока, т. е. они будут равны нулю, поэтому осциллограмма кривой тока в обмотке статора будет раскладываться только на нечетные гармоники ряда Фурье. Осциллограмма тока в обмотке статора работоспособного тягового электродвигателя 1ТВ2822 показана на рисунке 2.

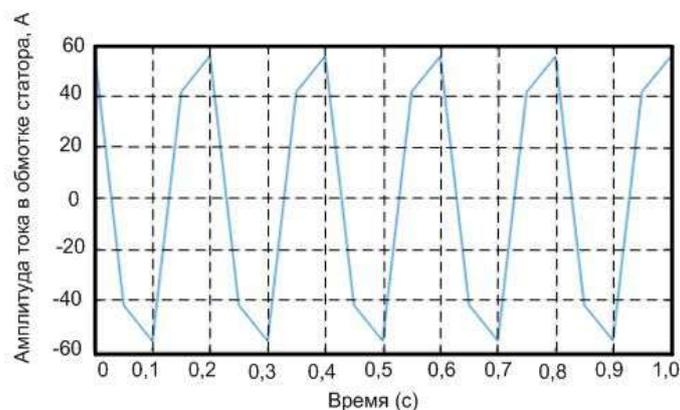


Рисунок 2 – Осциллограмма тока в обмотке статора работоспособного тягового электродвигателя 1ТВ2822

Изображение осциллограммы кривой тока статора работоспособного асинхронного тягового электродвигателя 1ТВ2822 (см. рисунок 2) можно записать рядом Фурье:

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$I(t) = 64,97 \sin(\omega t + \psi_1) + 20,76 \sin(3\omega t + \psi_3) + 10,28 \sin(5\omega t + \psi_5), \quad (4)$$

где  $\omega = 408,4$  рад/с – угловая частота тока якоря первой гармоники;  $3\omega = 1225,2$  рад/с – угловая частота тока якоря третьей гармоники;  $5\omega = 2042$  рад/с – угловая частота тока якоря пятой гармоники.

Для анализа осциллограммы тока в цепи обмотки статора работоспособного АТЭД используем логарифмическую спектрограмму тока в зависимости от времени (рисунок 3).

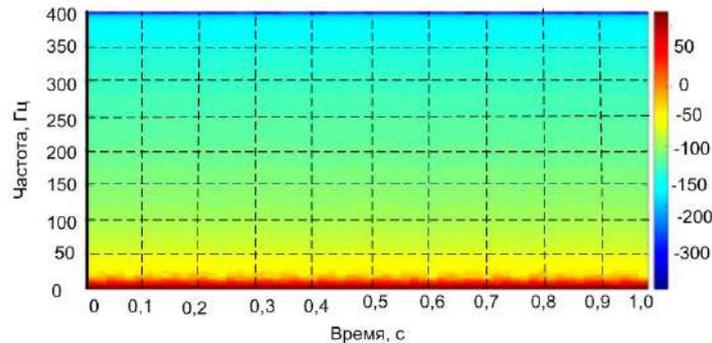


Рисунок 3 – Логарифмическая спектрограмма тока статора работоспособного тягового асинхронного электродвигателя типа 1ТВ2822

На рисунке 4 представлен график мощности логарифмического псевдоспектра тока статора работоспособного асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822.

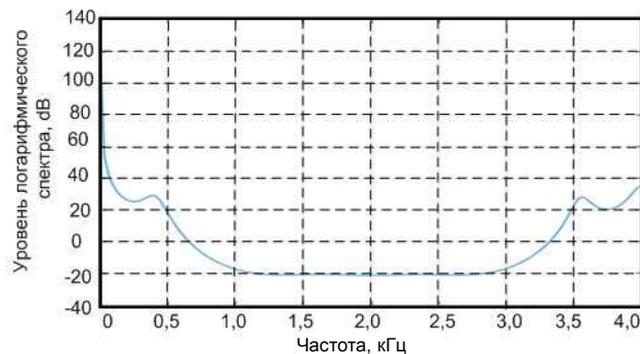


Рисунок 4 – График псевдоспектра мощности логарифмического спектрального компонента тока статора работоспособного асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822

На основе анализа логарифмической спектрограммы тока статора работоспособного тягового асинхронного электродвигателя типа 1ТВ2822 установлено, что логарифмическая спектрограмма тока имеет равномерную мощность по всей площади спектра. В логарифмическом псевдоспектре тока статора работоспособного асинхронного тягового электродвигателя можно выделить частотные составляющие, которые рассчитываются в пакете программы MATLAB (рmusic и rootmusic), их можно записать в виде комплексных векторов частот:

$$W(f) = \begin{bmatrix} 0,35 & 3,5 & 0 \\ 0,42 & 3,65 & 0 \\ 2,0 & 3,82 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

На основании расчета можно сделать вывод о том, что максимальный уровень логарифмического псевдоспектра тока статора 30 db соответствует частоте гармоники тока статора – 0,35 кГц, на частоте гармоники тока 0,42 кГц уровень логарифмического спектра соответствует 30db, на частоте гармоники тока 3,5 кГц уровень логарифмического спектра соот-

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ветствует 30db, на частоте гармоники тока 3,65 кГц уровень логарифмического спектра соответствует 30db, на частоте гармоники тока 3,82 кГц уровень логарифмического спектра соответствует 20 db.

Для исследования аварийного режима работы тягового асинхронного электродвигателя типа 1ТВ2822 с межвитковым замыканием обмотки статора в структурной модели задавались следующие параметры: номинальное линейное напряжение в цепи обмотки статора  $U_{ном} = 335$  В; для моделирования межвиткового замыкания в обмотках статора активное сопротивление уменьшалось до значения  $r_s = 0,00125$  Ом; индуктивность обмотки статора  $l_s = 0,000226$  Гн; сопротивление обмотки ротора  $r_r = 0,01231$  Ом; индуктивность обмотки ротора  $l_r = 0,000226$  Гн; номинальный момент вращения ротора  $M_n$  устанавливался в пределах 11,14 кНм; частота переменного тока  $f = 9930$  Гц (рисунок 5).

В таблице 2 представлены коэффициенты структурной модели аварийного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822.

Таблица 2 – Коэффициенты структурной модели аварийного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822

Коэффициент	$r$	$T_s$	$T_R$	$k_R$	$L_s$
Единицы измерения	Ом	С	С	–	Гн
Значение коэффициента	0,0236	0,0183	0,0183	0,995	0,0002197

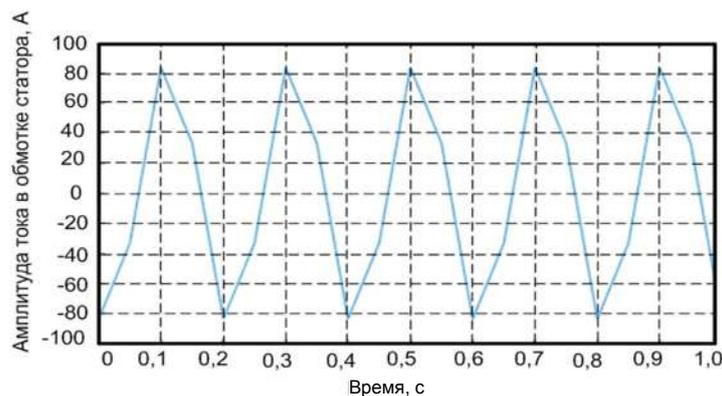


Рисунок 5 – Осциллограмма тока в обмотке статора аварийного тягового электродвигателя 1ТВ2822

Значения амплитуды гармоник тока обмотки статора и начальная фаза тока аварийного тягового электродвигателя 1ТВ2822 с межвитковым замыканием изоляции обмотки статора представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения амплитуды гармоник тока обмотки статора и начальная фаза тока аварийного режима функционирования тягового электродвигателя 1ТВ2822

Номер гармоники	1	3	5	7	9	11	13	15	17	9
Амплитуда тока, А	79,81	16,56	8,114	5,389	4,053	3,241	2,695	2,295	2,028	1,8
Начальная фаза тока, рад	-90	-7,57	176,4	-2,17	178,5	-0,88	179,9	0,04	-179,2	0,43

Изображение кривой осциллограммы тока статора аварийного асинхронного тягового электродвигателя 1ТВ2822 можно записать рядом Фурье:

$$I(t) = 79,81 \sin(\omega t + \psi_1) + 16,56 \sin(3\omega t + \psi_3) + 8,114 \sin(5\omega t + \psi_5), \quad (6)$$

где  $\omega = 408,4$  рад/с – угловая частота тока якоря первой гармоники;  $3\omega = 1225,2$  рад/с – угловая частота тока якоря третьей гармоники;  $5\omega = 2042$  рад/с – угловая частота тока якоря пятой

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

гармоники. Логарифмическая спектрограмма тока якоря аварийного тягового двигателя с повреждением межвитковой изоляции обмотки статора представлена на рисунке 6.

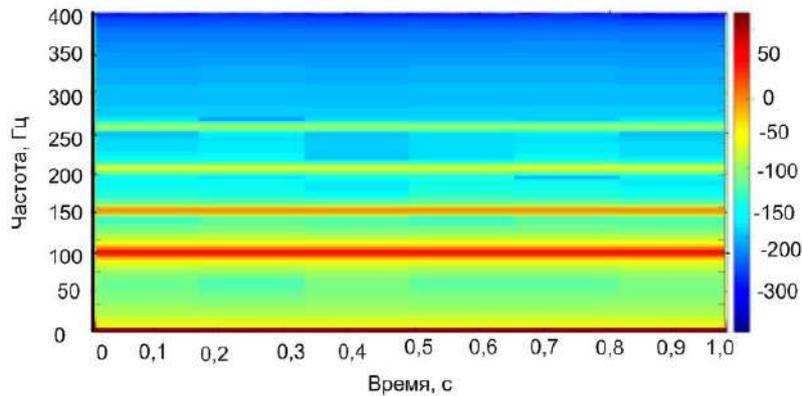


Рисунок 6 – Логарифмическая спектрограмма тока якоря аварийного асинхронного тягового двигателя

На рисунке 7 представлен график мощности логарифмического псевдоспектра тока статора аварийного асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822.

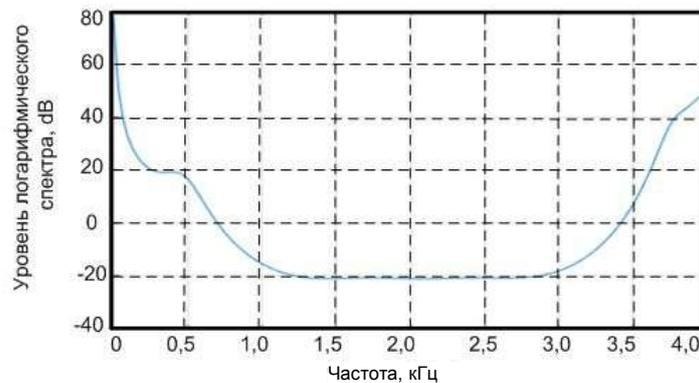


Рисунок 7 – График мощности логарифмического псевдоспектра тока статора аварийного асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822

Аварийный тяговый электродвигатель типа 1ТВ2822 с межвитковым замыканием в обмотке статора имеет колебания магнитного потока в воздушном зазоре и большой размах амплитуд мгновенных значений тока. На основе анализа логарифмической спектрограммы тока статора аварийного тягового асинхронного электродвигателя типа 1ТВ2822 установлено, что логарифмическая спектрограмма тока имеет неравномерную мощность по всей площади спектра.

В логарифмическом псевдоспектре тока статора аварийного асинхронного тягового электродвигателя можно выделить частотные составляющие, которые рассчитываются в пакете программы MATLAB (`pmusic` и `rootmusic`), их можно записать в виде комплексных векторов частот:

$$W(f) = \begin{vmatrix} 0,47 & 0,4 & 0 \\ 0,32 & 3,76 & 0 \\ 4,0 & 4,3 & 0 \end{vmatrix} \quad (7)$$

На основании расчета можно сделать вывод о том, что максимальный уровень логарифмического псевдоспектра тока статора 20 db соответствует частоте гармоники тока статора 0,32 кГц, на частоте гармоники тока статора 0,47 кГц уровень логарифмического спектра соответствует 20 db, на частоте гармоники тока 3,76 кГц уровень логарифмического спектра

соответствует 40 db, на частоте гармоники тока 4,3 кГц уровень логарифмического спектра соответствует 50 db.

В расчетах используются АТЭД типа 1ТВ2822 мощностью 1050 кВт с суммарной наработкой за 2020 г. более 27 000 ч исходя из одного работающего АТЭД на электровозе серии 2ЭС10 «Гранит».

Использование предлагаемой методики диагностирования межвитковой изоляции обмоток статора асинхронного тягового электродвигателя позволяет на ранних стадиях выявлять дефекты изоляции обмотки статора асинхронного тягового электродвигателя.

Преимуществами данной методики являются невысокая стоимость оборудования диагностирования асинхронного тягового электродвигателя в реальных условиях эксплуатации, возможность удаленного мониторинга состояния изоляции обмотки статора АСТД, отсутствие необходимости преждевременного вывода асинхронного тягового электродвигателя в ремонт [3 – 5, 9, 10].

Предложенная в статье методика диагностирования изоляции обмоток статора асинхронных тяговых электродвигателей электровозов позволяет анализировать и выявлять опасные отказы асинхронных тяговых электродвигателей при длительной эксплуатации.

Таким образом, реализация на практике методики анализа логарифмических спектральных составляющих тока статора асинхронного тягового электродвигателя позволяет сократить трудозатраты на поиск неисправностей АТЭД; выявить дефекты изоляции обмотки статора асинхронного тягового электродвигателя на начальных стадиях их развития; обеспечить эффективное планирование ремонтных работ по фактическому состоянию АТЭД; свести к минимуму возможности возникновения аварий.

### *Список литературы*

1. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 «Гранит» с асинхронными тяговыми электродвигателями : руководство по эксплуатации. – Екатеринбург : Конструкторско-исследовательский центр ОАО «СТМ», 2009. – 98 с. – Часть 1. – Текст : непосредственный.
2. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). – Москва : ОАО «РЖД», 2015. – 128 с. – Текст : непосредственный.
3. Хамидов, О. Р. Математическое моделирование асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов с короткозамкнутым ротором / О. Р. Хамидов. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2019. – № 1. – С. 41–47.
4. Космодамианский, А. С. Повышение надежности тяговых и вспомогательных электроприводов локомотивов / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, А. А. Пугачев, А. С. Самотканов. – Текст : непосредственный // Эксплуатационная надежность подвижного состава : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Омск : НИИТКД, 2013. – С. 105–111.
5. Менщиков, И. А. Кепстральный анализ диагностических параметров электромеханических систем электропоезда переменного тока серии ЭР9Т / И. А. Менщиков, С. И. Баташов. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта – 2018. – № 6. – С. 9–13.
6. Харламов, В. В. Применение нейронной сети для оценки технического состояния тяговых электродвигателей локомотивов в технологическом процессе ремонта / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. С. Огневский. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств : сборник трудов конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – С. 39–45.
7. Менщиков, И. А. Интеллектуальная бортовая система автоматизированного контроля и диагностирования силовых цепей электровоза переменного тока серии ЭП1 / И. А. Менщиков. – Текст : непосредственный // Современные проблемы железнодорожного

транспорта: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Москва : Российский университет транспорта, 2019. – С. 131–141.

8. Шантаренко, С. Г. Совершенствование технологической готовности технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шантаренко Сергей Георгиевич ; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2006. – 419 с. – Текст : непосредственный.

9. Хамидов, О. Р. Современные методы и средства диагностирования асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов : монография / О. Р. Хамидов. – Ташкент: Tafakkurqanoti, 2020. – 200 с – Текст : непосредственный.

10. Герман-Галкин, С. Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург : КоронаВек, 2011. – 368 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. *Electric freight locomotive DC 2ES10 with asynchronous traction motors. Operation Manual*, part 1. Design and Research Center of JSC «STM» 2009, 98 p.

2. *The strategy of scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Paper)*. Moscow: JSC Russian Railways Publ., 2015, 128 p.

3. Khamidov O. R. Mathematical modeling of asynchronous traction electric motors of locomotives with a short-circuited rotor [Matematicheskoe modelirovanie asinkhronnykh tiagovykh elektrodvigateli lokomotivov s korotkozamknutym rotorom]. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of the results of scientific research*, 2019, no. 1, pp. 41 – 47.

4. Kosmodamiansky A. S., Vorobyev V. I., Pugachev A. A., Samotkanov A. S. Improving the reliability of traction and auxiliary electric drives of locomotives [Povyshenie nadezhnosti tiagovykh i vspomogatel'nykh elektroprivodov lokomotivov]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' podvizhnogo sostava : materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (International scientific and practical conference "Operational reliability of rolling stock"). – Омск: НИТКД, 2013, vol. 1, pp. 105 – 111.

5. Menshchikov I. A. Kepstral analysis of diagnostic parameters of electromechanical systems of alternating current electric train seriER9T [Kepstral'nyi analiz diagnosticheskikh parametrov elektromekhanicheskikh sistem elektropoezda peremennogo toka serii ER9T]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2018, no. 6, pp. 9 – 13.

6. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Ognevsky A. S. The use of a neural network to assess the technical condition of traction electric motors of locomotives in the technological process of repair [Primenenie neironnoi seti dlia otsenki tekhnicheskogo sostoianiia tiagovykh elektrodvigateli lokomotivov v tekhnologicheskom protsesse remonta]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii mashinostroitel'nykh proizvodstv : sbornik trudov konferentsii* (Proceedings of the conference "Innovative projects and technologies of machine-building industries"). – Омск, 2015, vol. 1, pp. 39 – 45.

7. Menshchikov I. A. The onboard system of automated control and diagnostics of power circuits of an electric locomotive of the EP1 series is intelligent [Intellektual'naya bortovaya sistema avtomatizirovannogo kontrolya i diagnostirovaniia silovykh tsepei elektrovoza peremennogo toka serii EP1]. *Sovremennye problemy zheleznodorozhnogo transporta: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (Modern problems of railway transport: materials of International scientific). – Moscow, 2019, vol. 1, pp. 131 – 141.

8. Shantarenko S. G. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskoi gotovnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniia i remonta tiagovogo podvizhnogo sostava* (Improvement of technological readiness of technical maintenance and repair of traction rolling stock). Doctor's thesis, Омск, OSTU, 2006, 419 p.

9. Khamidov O. R. *Sovremennye metody i sredstva diagnostirovaniia asinkhronnykh tia-govykh elektrodvigateli lokomotivov* [Modern methods and means of diagnosing asynchronous traction electric motors of locomotives]. Tashkent, Tafakkurqanoti Publ., 2020, 200 p.

10. Herman-Galkin S. G. *Matlab&Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK* (Matlab& Simulink. Design of mechatronic systems). Saint Petersburg: Korona Vek Publ., 2011, 368 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Меншиков Игорь Александрович

Российская открытая академия транспорта (РОАТ) Российского университета транспорта.

Часовая ул., д. 22/2, стр. 1, г. Москва, 125315, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав», РОАТ.

Тел. +7(906)153-32-11.

E-mail: igormenshikov55@yandex.ru

### Космодамианский Андрей Сергеевич

Российская открытая академия транспорта (РОАТ) Российского университета транспорта.

Часовая ул., д. 22/2, стр. 1, г. Москва, 125315, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав», РОАТ.

Тел. +7(909)915-72-63.

E-mail: askosm@mail.ru

### Баташов Сергей Иванович

Российская открытая академия транспорта (РОАТ) Российского университета транспорта.

Часовая ул., д. 22/2, стр. 1, г. Москва, 125315, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав», РОАТ.

Тел. +7(905)572-13-79.

E-mail: s.batashov61@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Меншиков, И. А. Совершенствование диагностирования изоляции обмоток статора асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2822 электровоза 2ЭС10 «Гранит» с помощью спектрального анализа тока / И. А. Меншиков, А. С. Космодамианский, С. И. Баташов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 51 – 60.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Menshchikov Igor Aleksandrovich

Russian Open Academy of Transport (ROAT) of Russian University of Transport.

Chasovaya str., 22/2, p. 1, Moscow, 125315, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department "Traction rolling stock", ROAT.

Phone: +7(906)153-32-11.

E-mail: igormenshi-kov55@yandex.ru

### Kosmodamianskiy Andrey Sergeevich

Russian Open Academy of Transport (ROAT) of Russian University of Transport.

Chasovaya str., 22/2, p. 1, Moscow, 125315, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, Head of the department "Traction rolling stock", ROAT.

Phone: +7(909)915-72-63.

E-mail: askosm@mail.ru

### Batashov Sergey Ivanovich

Russian Open Academy of Transport (ROAT) of Russian University of Transport.

Chasovaya str., 22/2, p. 1, Moscow, 125315, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department "Traction rolling stock", ROAT.

Phone: +7(905)572-13-79.

E-mail: s.batashov61@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Menshchikov I. A., Kosmodamiansky A. S., Batashov S. I. Improvement of diagnostics of isolation of stator windings of asynchronous traction electric motor type 1ТВ2822 electric locomotive 2ЭС10 "Granite" using spectral analysis of current. Journal Of Transsib Railway Studies, 2021, no. 3 (47), pp. 51 – 60 (In Russian).

М. Ю. Хажеева, А. М. Худонов, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОКАЛОРИФЕРНОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Аннотация.** Тяговые электрические машины (ТЭМ) локомотивов, эксплуатируемые на Восточном полигоне обращения, имеют недостаточную надежность преимущественно по пробойу изоляции, являясь одной из важнейших проблем эксплуатации электроподвижного состава.

В данной статье рассмотрен метод сушки увлажненной изоляции передвижными и стационарными электрокалориферными установками, которые применяют в процессе ремонта ТЭД локомотивов и электропоездов. Проблема эксплуатации данных установок состоит в их низкой энергоэффективности. При постоянном энергоподводе нагревательные элементы и вентилятор электрокалорифера остаются включенными в течение всего процесса сушки изоляции, что приводит к значительным затратам электроэнергии, а фиксация проведения сушки производится путем ведения бумажного документооборота, записи в журнал технического состояния локомотива ТУ-152.

Для устранения данных недостатков авторами предлагается модернизация электрокалориферной установки путем внедрения в нее микропроцессорной системы автоматического регулирования процессом сушки с технологией облачного хранения данных. В статье представлена блок-схема предлагаемой автоматизированной системы, которая будет реализовывать предлагаемый в ФГБОУ ВО «ИрГУПС» трехцикловой амплитудно-широко-прерывный способ энергоподвода в процессе сушки увлажненной изоляции ТЭД.

В настоящее время технологии облачного хранения данных нашли свое применение в компаниях разного рода деятельности, оно активно совершенствуется в связи с постоянным увеличением объемов информации, которую нужно хранить или передавать, а кроме того, пользователь может иметь к ней доступ из любой точки мира. В последние годы в мире заметно возрос интерес к применению этой технологии на железнодорожном транспорте. В рамках модернизации установки появляется возможность дистанционного управления ее работой, а также хранения и обработки полученной информации по процессу сушки увлажненной изоляции.

**Ключевые слова:** Ресурсосберегающее управление, электрокалориферная установка, процесс сушки, качество ремонта, тяговые электродвигатели, облачное хранение данных.

Marina Yu. Khazheeva, Anatoly M. Khudonogov, Evgeniy Yu. Dulskiy, Pavel Yu. Ivanov

Irkutsk State Transport University (IrSTU), Irkutsk, the Russian Federation

## DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM OF RESOURCE-SAVING CONTROL OF AN ELECTRIC HEATING SYSTEM FOR DRYING INSULATION OF TRACTION ELECTRIC MACHINES

**Abstract.** Traction electric machines (TEM) of locomotives operating at the Eastern circulation range have insufficient reliability, mainly in terms of insulation breakdown, being one of the most important problems in the operation of electric rolling stock.

This article discusses the method of drying wetted insulation by mobile and stationary electric heaters, which are used in the process of repairing traction electric motors of locomotives and electric trains. The problem of operating these installations is their low energy efficiency. With a constant power supply, the heating elements and the fan of the electric heater remain on during the entire drying process of the insulation, which leads to significant energy consumption, and the drying process is recorded by conducting paper workflow, recording the technical condition of the TU-152 locomotive in the log.

To eliminate these shortcomings, the authors propose the modernization of the electric heating installation by introducing into it a microprocessor-based system for automatic regulation of the drying process with cloud storage technology. The article presents a block diagram of the proposed automated system, which will implement the three-cycle amplitude-latitude-discontinuous method of energy supply proposed at the FGBOU VO "IrGUPS" in the process of drying the wet insulation of the TED.

Currently, cloud storage technologies have found their application in companies of various kinds of activity, it is being actively improved due to the constant increase in the amount of information that needs to be stored or transferred, and in addition, the user can have access to it from anywhere in the world. In recent years, the world has noticeably

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

*increased interest in the application of this technology in railway transport. As part of the modernization of the installation, it becomes possible to remotely control its operation, as well as store and process the information received on the drying process of wetted insulation.*

**Keywords:** Resource-saving control, electric heating unit, drying process, repair quality, traction motors, cloud storage.

Проведенный анализ данных по надежности оборудования тягового подвижного состава, эксплуатируемого на Восточном полигоне обращения, за последние десять лет показал, что наиболее подвержены отказам тяговые электрические машины, в частности, тяговые электродвигатели (ТЭД). В связи с этим сотрудники ФГБОУ ВО «ИрГУПС» установили, что до 80 % ТЭД выходит из строя по причине пробоя изоляции в осенне-зимне-весенний период времени, т. е. в период времени, когда происходит интенсивное увлажнение изоляции обмоток ТЭД и снижение ее диэлектрической прочности [1 – 5].

С целью уменьшения негативного влияния переувлажнения на изоляцию ее подвергают сушке. В настоящее время для решения данных проблем предлагаются разнообразные способы, методы и средства сушки изоляции обмоток ТЭД. Широкое распространение получил конвективный метод сушки на основе использования передвижных и стационарных электрокалориферных установок, которые применяют в процессе ремонта ТЭД локомотивов и электропоездов [6, 7]. Примером тому являются автоматизированные электрокалориферные установки, которые предназначены для удаления влаги из изоляции путем сушки обмоток ТЭД в периоды высокой влажности при постановке локомотивов в отопливаемый цех. Выпускают данную установку такие компании, как «ИРТРАНС», «Инженерные решения», «Энавел», Омский завод транспортной электроники, опытно-механический завод Центра «Транспорт» и др. [8, 9].

В рамках научной работы предлагается модернизация электрокалориферных установок в части внедрения автоматизированной системы непрерывного мониторинга и дистанционного управления.

В настоящее время в распоряжении СЛД-Иркутское находится электрокалориферная установка, представленная на рисунке 1.

Электрокалориферная установка состоит из вентилятора с регулирующей заслонкой на входе воздуха, электрокалорифера, переходных патрубков (входного и выходного), рамы и пульта автоматического управления. Основные размеры и компоновка данной установки представлены на рисунке 2.

Система управления электрокалориферной установкой обеспечивает управление (запуск – остановку) вентилятором установки, автоматическое регулирование температуры воздуха на выходе из калорифера, блокировку включения калорифера по вентилятору, автоматическую световую и звуковую сигнализацию отклонения температуры от заданной предельной величины, автоматическую сигнализацию об окончании цикла сушки.

При постановке электровоза на ремонтное стойло к нему подкатывается электрокалориферная установка и подключается к источнику электропитания. Рукава установки с использованием технологических фланцев присоединяются к соответствующим ТЭД на место смотровых коллекторных лючков. После нажатия кнопки «Пуск» начинается процесс сушки. Установка работает в двух режимах: «Продувка с нагревом» и «Продувка без нагрева», о которых оповещают соответствующие им световые индикаторы. Переключение режимов сушки осуществляется автоматически. Процесс сушки начинается с включения вентилятора, который осуществляет продувку тягового электродвигателя в течение 15 – 20 мин. Затем автоматичес-



Рисунок 1 – Электрокалориферная установка для сушки изоляции ТЭД

ки включается питание калорифера, при этом температура подаваемого воздуха поднимается до 90 – 100 °С. Продувка горячим воздухом осуществляется в течение 1,5 ч ± 10 мин. Далее нагрев воздуха отключается и включается вновь автоматически через 20 – 30 мин. Для того чтобы остановить процесс сушки, необходимо нажать кнопку «Стоп» [10].

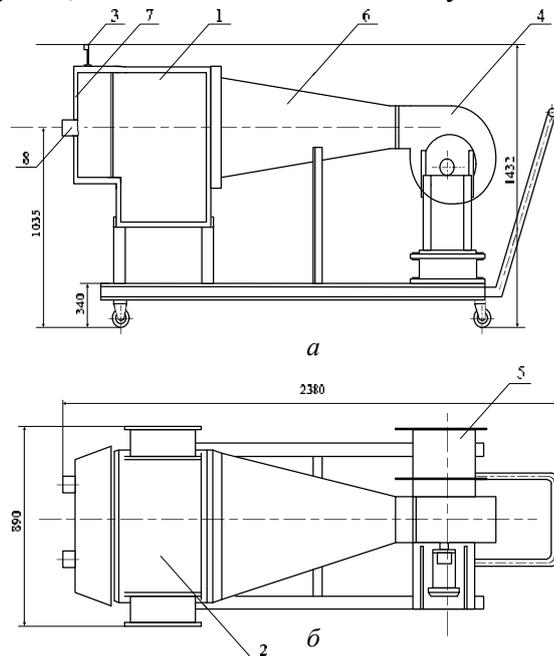


Рисунок 2 – Компонка и основные размеры электрокалориферной установки для сушки изоляции тяговых электрических машин электропоездов: 1 – корпус электрокалорифера; 2 – оболочка ТЭНов; 3 – два патрубка; 4 – вентилятор; 5 – обечайка с заслонкой; 6 – входной патрубок электрокалорифера; 7 – выходной патрубок; 8 – два переходника для подсоединения гибких рукавов

Фиксация проведения сушки производится путем ведения бумажного документооборота, записи в журнал технического состояния локомотива формы ТУ-152, который хранится постоянно. Принимающая локомотив бригада обязана ознакомиться с записями по журналу. Ответственность за достоверность записей, состояние журнала формы ТУ-152 возлагается на машинистов, машинистов-инструкторов, мастеров ПТОЛ в соответствии с их должностными обязанностями.

В рамках реализации программы «Цифровое депо» предлагается модернизация электрокалориферной установки путем внедрения в нее микропроцессорной системы автоматического регулирования процессом сушки с технологией облачного хранения данных. На рисунке 3 представлена блок-схема предлагаемой автоматизированной системы, которая будет реализовывать предлагаемый в ИрГУПСе трехцикловой амплитудно-широотно-прерывный способ энергоподвода в процессе сушки увлажненной изоляции ТЭД без выкатки колесной пары [11].

Предложенный трехцикловой амплитудно-широотно-прерывный способ сушки изоляции электрических машин и аппаратов локомотивов включает в себя принудительную продувку их воздушным потоком до нагрева и после нагрева, тепловой нагрев, контроль за рабочей температурой и состоянием изоляции [12 – 14].

Суть работы предлагаемой автоматизированной системы будет заключаться в реализации процесса сушки циклами с переменным энергоподводом, при этом управление будет осуществляться программируемым микроконтроллером, который в свою очередь будет питаться через блок питания от штатной шины (рисунок 3).

В первом цикле идет процесс удаления влаги из верхних слоев изоляции, во втором и третьем – из нижних слоев изоляции. В связи с этим повышается надежность изоляции.

Длительность циклов выбирается исходя из показаний датчиков влажности, в частности, изменения влажности изоляции (рисунок 4).

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Управление микроконтроллером будет осуществляться через блок управления, который питается от блока питания. Регулировка работы двигателя Д, вентилятора и ТЭНов будет осуществляться с помощью преобразователей Пр1 и Пр2 соответственно через блок управления. Также будет предусмотрена возможность ручного управления с помощью пульта управления.

Информация по процессу сушки будет поступать с микроконтроллера в блок памяти. Предлагаемая система будет построена на сетевом облачном программном обеспечении, позволяющем вести сбор и обработку данных в режиме реального времени с целью оперативного информирования по технологическому процессу. Передача данных в облачный центр происходит через блок передачи данных, который состоит из преобразователя, микроконтроллерного блока, GSM-модуля, LED-дисплея и выводов (рисунок 5).

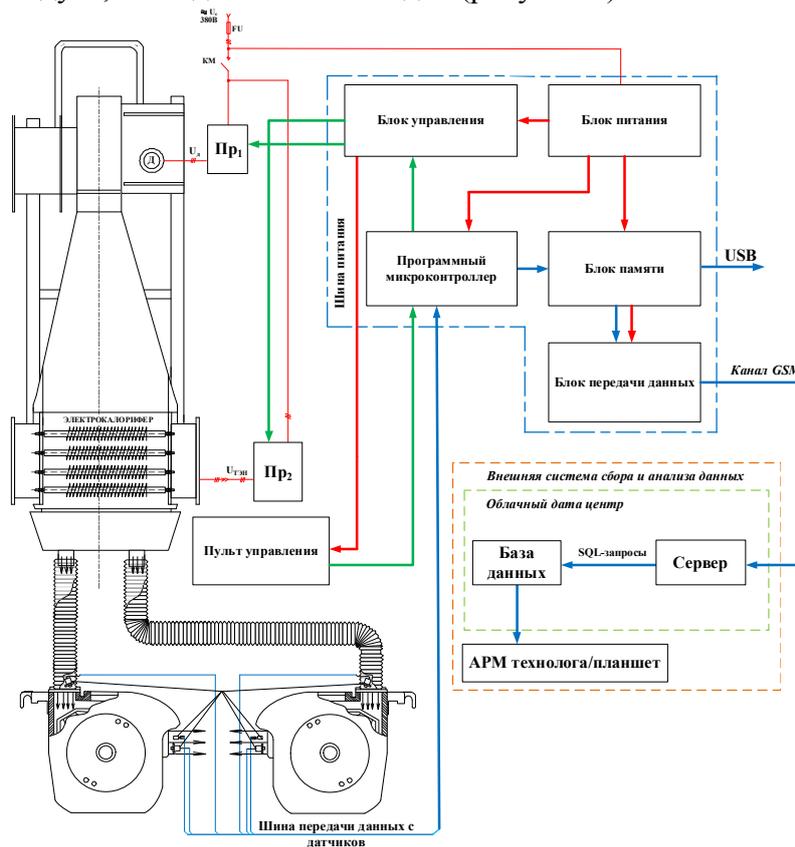


Рисунок 3 – Модернизированная функциональная схема автоматизированной системы непрерывного мониторинга и дистанционного управления в процессе сушки и технологии облачного хранения данных:  
Пр1 и Пр2 – преобразователи 1 и 2; Д – двигатель; КМ – магнитный пускатель

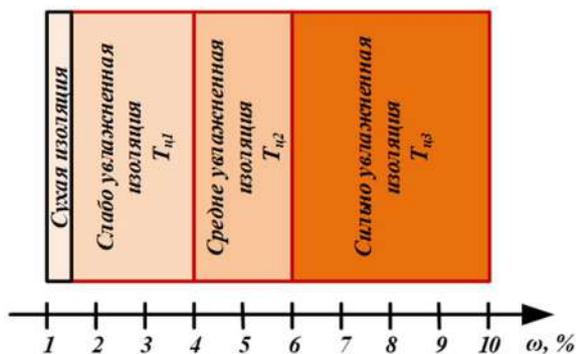


Рисунок 4 – Изменение влажности изоляции



Рисунок 5 – Блок электроники:  
1 – внешняя антенна GSM-модуля;  
2 – микровыключатель; 3 – LED-дисплей; 4 – выводы

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Передачу данных можно осуществлять следующим образом: микроконтроллер подключен к GSM-модулю и через GPRS, посредством передачи GET-запросов отправляет данные на сервер [15]. На сервере, написанном на PHP-языке программирования, данные через SQL-команды отправляются в базу данных для хранения. Взамен GSM можно использовать сеть Wi-Fi.

Полученную информацию из базы данных можно будет выгрузить в виде файла для обработки через специализированные программы автоматизированного рабочего места (АРМа) технолога, возможна также выгрузка в виде таблиц для обработки и анализа специалистами в офисных программах.

Управление работой установки можно осуществить через планшет оператора. Для планшета оператора был разработан и опробован пользовательский интерфейс, представленный на рисунке 6.

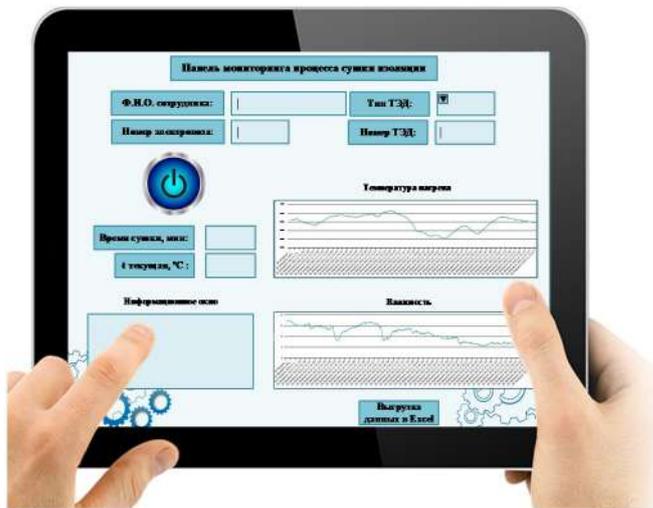


Рисунок 6 – Интерфейс системы сбора и обработки данных по сушке изоляции ТЭД

Информация, получаемая с облачного сервиса, выводится в виде графиков и мгновенных значений основных параметров сушки. Оператор перед запуском установки должен ввести такие данные, как ФИО работника, номер электровоза и номер ТЭД, выбрать его тип из выпадающего списка. Запуск установки осуществляется нажатием соответствующей кнопки, при повторном нажатии на которую работа установки ставится на паузу. Для экстренной остановки работы установки необходимо зажать кнопку в течение 5 с при звуковом

сопровождении. Остановка установки при завершении программы осуществляется автоматически. В пользовательском интерфейсе предусмотрено информационное окно, в котором выводится следующая информация: запуск, пауза, остановка процесса сушки, ошибки.

Таким образом, предлагаемый метод сушки увлажненной изоляции ТЭД подвижного состава в части внедрения автоматизированной системы непрерывного мониторинга и дистанционного управления позволит повысить производительность ремонта за счет сокращения времени на технологические операции и непрерывного беспроводного контроля, управления и оперативного информирования, снизить затраты электроэнергии на ремонт за счет осциллирующего энергоподвода, а также повысить надежность силового оборудования, а именно изоляционных конструкций, путем эффективного управления электрокалориферной установкой.

### Список литературы

1. Страшимин, Э. П. Увлажнение изоляции тяговых двигателей в зимних условиях / Э. П. Страшимин. – Свердловск : Уральский политехн. ин-т, 1958. – 37 с. – Текст : непосредственный.
2. Лыткина, Е. М. Методика оптимизации дискретных режимов сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей электровозов / Е. М. Лыткина. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 4. – С. 64–67.
3. Дульский, Е. Ю. Исследование эффективности конвективного и терморadiационного методов капсулирования изоляции обмоток при ремонте электрических машин тягового подвижного состава / Е. Ю. Дульский, Н. С. Доценко, Е. М. Лыткина. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 14–19.

4. Иванов, П. Ю. Состояние вопроса надежности и долговечности изоляции асинхронных вспомогательных машин / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. М. Худоногов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 2 (22). – С. 2–6.

5. Система мониторинга состояния изоляции / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 3. – С. 50–52.

6. Коноваленко, Д. В. Организация процесса сушки увлажненной изоляции обмоток электрических машин ЭПС в условиях их эксплуатации на ВСЖД / Д. В. Коноваленко, Е. М. Лыткина. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2011. – № 1. – С. 74–78.

7. Сидоров, В. В. Совершенствование управления системой вентиляции установок для сушки увлажненной изоляции крупных электрических машин / В. В. Сидоров. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 4 (28). – С. 230–235.

8. Коноваленко, Д. В. Рациональные режимы сушки увлажненной изоляции обмоток тяговых электрических машин : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коноваленко Даниил Викторович ; Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2007. – 193 с. – Текст : непосредственный.

9. Омский завод транспортной электроники : [www.zavod.su](http://www.zavod.su) : сайт. – Текст : электронный. – URL : // <http://www.zavod.su/main.php> (дата обращения: 29.10.2021).

10. Электрокалориферная установка для сушки изоляции тяговых двигателей: [www.zavod.su](http://www.zavod.su) : сайт. – Текст : электронный. – URL : // <http://omzct.ru/catalog/oborudovanie-dlya-remonta-lokomotivov/elektrokalorifernaya-ustanovka-dlya-sushki-izolyatsii-tyagovykh-dvigatelay> (дата обращения: 11.10.2021).

11. Эффективная система управления электрокалориферной установкой для сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей / Е. Ю. Дульский, А. И. Романовский, И. А. Ролле, Е. И. Макарова. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 4 (64). – С. 80–87.

12. Пат. № 2494517 РФ. Трехциклового амплитудно-широко-прерывный способ сушки изоляции электрических машин : № 2011150204/07 : заявлено 09.12.2011 : опубликовано 27.09.2013 / Сидоров В. В., Лыткина Е. М., Коноваленко Д. В., Худоногов А. М., Гарев Н. Н., Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю. – 6 с. – Текст : непосредственный.

13. Соболев, В. М. Режимы сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей / В. М. Соболев, В. М. Левитский. – Текст : непосредственный // Электрическая и тепловая тяга. – 1975. – № 1. – С. 23–24.

14. Коноваленко, Д. В. Применение композиционных материалов для проведения процесса сушки изоляции электродвигателей / Д. В. Коноваленко, А. В. Кочетков. – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2011. – № 8 (55). – С. 121–125.

15. Безопасный способ обмена и хранения данных с использованием облачных хранилищ : [moluch.ru](http://moluch.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL : // <https://moluch.ru/archive/117/32091> (дата обращения: 11.10.2021).

### References

1. Strashimin E. P. *Uvlazhnenie izolyatsii tyagovykh dvigatelej v zimnih usloviyah* (Moistening the insulation of traction motors in winter conditions). Sverdlovsk: Ural Polytechnic Institute Publ., 1958, 37 p.

2. Lytkina E. M. Technique of optimization of discrete modes of drying of humidified insulation of traction motors of electric locomotives [Metodika optimizacii diskretnyh rezhimov sushki uvlazhnennoj izolyacii tyagovyh dvigatelej elektrovozov ]. *Nauka i tekhnika transporta – Science and technology of transport*, 2010, no. 4, pp. 64 – 67.
3. Dul'skii E. Yu., Dotsenko N. S., Lytkina E. M. Research of efficiency of convective and thermoradiation methods capsulation of isolation of windings in the repair of electric cars traction rolling stock [Issledovanie effektivnosti konvektivnogo i termoradiatsionnogo metodov kapsulirovaniia izoliatsii obmotok pri remonte elektricheskikh mashin tiagovogo podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 1 (17), pp. 14 – 19.
4. Ivanov P. Yu., Dul'skii E. Yu., Khudonogov A. M. State of the issue of reliability and durability of insulation of asynchronous auxiliary machines [Sostoyanie voprosa nadezhnosti i dolgovечности izolyacii asinhronnyh vspomogatel'nyh mashin]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no 2 (22), pp. 2 – 6.
5. Dul'skii E. Yu., Ivanov P. Yu., Khamnaeva A.A., Divinets M.A., Korsun A.A. System for monitoring the state of insulation [Sistema monitoringa sostoyaniya izolyacii]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport*, 2021, no. 3. pp. 50 – 52.
6. Konovalenko D. V., Lytkina E. M. Organization of the drying process of the wetted insulation of the windings of electric machines ERS in the conditions of their operation at the ESP [Organizatsiya processa sushki uvlazhnennoj izolyacii obmotok elektricheskikh mashin EPS v usloviyah ih ekspluatatsii na VSZHD]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v HKHI veke – Scientific-technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century*, 2011, no. 1, pp.74 – 78.
7. Sidorov V. V. Improving the management of the ventilation system of installations for drying wetted insulation of large electrical machines [Sovershenstvovanie upravleniya sistemoy ventilyatsii ustanovok dlya sushki uvlazhnennoj izolyacii krupnyh elektricheskikh mashin]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2010, no. 4 (28), pp. 230 – 235.
8. Konovalenko D. V. *Ratsional'nye rezhimy sushki uvlazhnennoj izolyacii obmotok tyagovyh elektricheskikh mashin* (Rational modes of drying wet insulation of windings of traction electric machines: specialty). Doctor's thesis, Irkutsk, IrSTU, 2007, 193 p.
9. *Omskij zavod transportnoj elektroniki* (Omsk plant of transport electronics), Available at: <http://www.zavod.su/main.php> (accessed 29 October 2021).
10. *Elektrokalfornaya ustanovka dlya sushki izolyacii tyagovyh dvigatelej* (Electric heating unit for drying the insulation of traction motors). Available at: <http://omzct.ru/catalog/oborudovanie-dlya-remonta-lokomotivov/elektrokalfornaya-ustanovka-dlya-sushki-izolyatsii-tyagovykh-dvigatelej> (accessed: 10 November 2021).
11. Dul'skii E. Yu., Romanovsky A. I., Rollet I. A., Makarova E. I. An effective control system for an electric heating installation for drying humidified insulation of traction motors [Effektivnaya sistema upravleniya elektrokalfornoy ustanovkoj dlya sushki uvlazhnennoj izolyacii tyagovyh elektrodvigatelej]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2019, no. 4 (64), pp. 80 – 87.
12. Sidorov V. V., Lytkina E. M., Konovalenko D. V., Khudonogov A. M. , Garev N. N., Dul'skii E. Yu., Ivanov P. Yu. *Patent RU 2494517 C2*, 27.09.2013.
13. Sobolev V. M., Levitskij V. M. Modes of drying the wetted insulation of traction motors [Rezhimy sushki uvlazhnennoj izolyacii tyagovyh elektrodvigatelej]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga – Electric and diesel traction*, 1975, no. 1, pp. 23 – 24.
14. Konovalenko D. V., Kochetkov A. V. The use of composite materials for drying the insulation of electric motors [Primenenie kompozitsionnyh materialov dlya provedeniya processa sushki izolyacii elektrodvigatelej]. *Vestnik RGUPSa – Herald of Rostov State Transport University*, 2011, no. 8 (55), pp. 121 – 125.

15. *Bezopasnyj sposob obmena i hraneniya dannyh s ispol'zovaniem oblachnyh hranilishch* (A safe way to exchange and store data using cloud storage: moluch.ru: site). Available at: <https://moluch.ru/archive/117/32091> (accessed 15 November 2021).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Хажеева Марина Юрьевна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство».

Тел.: +7 (908) 645-79-15.

e-mail: m.khazheeva@mail.ru

### Худоногов Анатолий Михайлович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроподвижной состав».

Тел.: +7 (914) 881-46-75.

e-mail: a.hudonogov@yandex.ru

### Дульский Евгений Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство».

Тел.: +7 (983) 403-46-43.

e-mail: e.dulskiy@mail.ru

### Иванов Павел Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав».

Тел.: +7 (950) 065-21-77.

e-mail: p\_ivanov@ssdigit.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Разработка автоматизированной системы ресурсосберегающего управления электрокалориферной установкой для сушки изоляции тяговых электрических машин / М. Ю. Хажеева, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 61 – 68.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Khazheeva Marina Yurievna

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Wagons and wagon facilities».

Phone: +7 (908) 645-79-15.

e-mail: m.khazheeva@mail.ru

### Khudonogov Anatoly Mikhailovich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Electric Rolling Stock».

Phone: +7 (914) 881-46-75.

e-mail: a.hudonogov@yandex.ru

### Dulskiy Evgeniy Yurievich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Wagons and wagon facilities».

Phone: +7 (983) 403-46-43.

e-mail: e.dulskiy@mail.ru

### Ivanov Pavel Yurievich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Wagons and wagon facilities».

Phone: +7 (950) 065-21-77.

e-mail: p\_ivanov@ssdigit.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Khazheeva M. Yu., Khudonogov A. M., Dulskiy E. Yu., Ivanov P. Yu. Development of an automated system of resource-saving control of an electric heating system for drying insulation of traction electric machines. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 3 (47), pp. 61 – 68 (In Russian).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ПО ИНФОРМАЦИИ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА ТЕПЛОВЗОВ СЕРИИ 2ТЭ25КМ

**Аннотация.** Рассмотрена методика определения показателей долговечности колесных пар локомотивов на примере тепловозов серии 2ТЭ25КМ, эксплуатирующихся на Приволжской железной дороге. Для этого определен 90 %-ный ресурс колесных пар исследуемой серии локомотивов, произведено сравнение его с принятым нормативным показателем. Кроме того, выбран контролируемый параметр колесной пары, лимитирующий надежность данного узла. Для проведения исследования были использованы методы математической статистики и теории вероятностей, в частности, функция распределения Лапласа, критерий Стьюдента, а также результаты расчетов зависимостей среднего значения и среднеквадратического отклонения контролируемых параметров, начальные значения наработок и наработки, соответствующей вероятности отказа 0,5. В настоящем исследовании выполнена разработка математической модели оценки долговечности колесных пар с точки зрения теории надежности. Оценка показателей долговечности элементов колесной пары выполнена на основании полученного на ЭВМ и принятого согласно критерию Пирсона вида закона распределения случайной величины со своими параметрами. В проведенных расчетах был получен 90 %-ный ресурс колесной пары по двум контролируемым параметрам, который составил для толщины бандажа 476,6 тыс. км, а для толщины гребня – 282,6 тыс. км. Полученные результаты сопоставлены с величинами, принятыми в Технических условиях на данную серию локомотивов (800 тыс. км.), а также со статистическими данными по значениям контролируемых параметров, полученными при обработке и анализе – 240 тыс. км. Ввиду того, что в эксплуатации средний ресурс колесной пары определяется по большему числу контролируемых параметров с учетом внеплановых ремонтов, а в настоящем исследовании – только на основании толщин бандажа и гребня, то о полном соответствии расчетных и фактических данных говорить не представляется возможным. По результатам расчетов лимитирующим надежностью колесной пары является такой контролируемый параметр, как толщина гребня. Для более точной оценки показателей долговечности колесных пар следует учитывать и то, что на интенсивность изнашивания оборудования подвижного состава влияют конкретные условия эксплуатации, в связи с этим межремонтные пробеги должны быть скорректированы с учетом влияния внешних факторов при эксплуатации. Для полной оценки показателей долговечности колесных пар в дальнейшем необходимо учесть дополнительные факторы помимо тех, что влияют на параметрическое изменение случайных величин, а также тот факт, который учитывает мониторинг и анализ всех контролируемых параметров данного узла при эксплуатации локомотивов.

**Ключевые слова:** надежность, показатели долговечности, среднее значение, среднеквадратическое отклонение, контролируемый параметр, толщина бандажа, толщина гребня, локомотив, тепловоз серии 2ТЭ25КМ.

Denis M. Mayakov

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

## DETERMINATION OF DURABILITY INDICATORS OF WHEELSET ELEMENTS BASED ON INFORMATION ON THE DISTRIBUTION OF THE CONTROLLED PARAMETER OF DIESEL LOCOMOTIVES OF THE 2TE25KM SERIES

**Abstract.** The method of determining the durability indicators of wheel pairs of locomotives is considered on the example of diesel locomotives of the 2TE25KM series operated on the Volga railway. For this purpose, the 90% resource of the wheel pairs of the studied series of locomotives was determined, and it was compared with the accepted standard indicator. In addition, a controlled parameter of the wheelset is selected, limiting the reliability of this node. To conduct the study, methods of mathematical statistics and probability theory were used, in particular, the Laplace distribution function, the Student's criterion, as well as the results of calculations of the dependencies of the mean value and the standard deviation of the controlled parameters, the initial values of developments and operating time corresponding to the probability of failure 0.5. In this study, a mathematical model for assessing the durability of wheelsets from the point of view of reliability theory was developed. The evaluation of the durability indicators of the wheelset elements was carried out on the basis of the type of random variable distribution law with its parameters obtained on a computer and adopted according to the Pearson criterion. As a result of the calculations, 90% of the life of the wheelset was obtained according to two controlled parameters, which amounted to 476.6 thousand km for the thickness of the bandage, and 282.6 thousand km for the thickness of the ridge. The results obtained were compared with the values adopted in the

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

*Technical Specifications for this series of locomotives (800 thousand km). km), as well as with statistical data on the values of controlled parameters obtained during processing and analysis - 240 thousand km. Due to the fact that in operation the average life of the wheelset is determined by a larger number of controlled parameters, taking into account unscheduled repairs, and in this study - only on the basis of the thickness of the bandage and the ridge, it is not possible to talk about full compliance with the calculated and actual data. According to the results of calculations, the limiting reliability of the wheelset is such a controlled parameter as the thickness of the ridge. For a more accurate assessment of the durability of wheelsets, it should also be taken into account that the intensity of wear of rolling stock equipment is affected by specific operating conditions, in this regard, inter-repair runs should be adjusted taking into account the influence of external factors during operation. In order to fully assess the durability of wheelsets in the future, it is necessary to take into account additional factors, in addition to those that affect the parametric change of random variables, as well as the fact that takes into account the monitoring and analysis of all controlled parameters of this node during the operation of locomotives.*

**Keywords:** reliability, durability indicators, average value, standard deviation, controlled parameter, bandage thickness, ridge thickness, locomotive, diesel locomotive of the 2TE25KM series.

В настоящее время при оценке работы подвижного состава уделяется большое внимание поддержанию требуемых показателей надежности оборудования и локомотивов заданной серии в целом. Для обеспечения технико-экономических и тягово-энергетических показателей работы локомотивов в заданных условиях эксплуатации выполняют постоянный мониторинг технического состояния подвижного состава. Одним из лимитирующих надежность узлов являются колесные пары, состояние которых непосредственно влияет на безопасность движения поездов. Наблюдение за величинами контролируемых параметров колесных пар (толщина бандажа, толщина гребня, прокат и т. д.) выполняют при техническом обслуживании и ремонте в соответствии с принятыми межремонтными пробегами. Величины межремонтных пробегов установлены с учетом того, что контролируемые параметры изменяются параметрически, т. е. постепенно. Следует учитывать, однако, что случайные внешние факторы могут воздействовать на локомотив таким образом, что контролируемый параметр изменится внезапно на значительную величину, выйдя за допустимые значения. В этом случае потребуются проведение внепланового ремонта для восстановления необходимого контролируемого параметра. Применительно к колесным парам такое состояние может наступить из-за появления на поверхности катания колесной пары ползуна, выщербины, раковины, т. е. вследствие нарушений условий эксплуатации, производственного дефекта или других факторов. Поэтому в настоящее время актуальным вопросом как на производстве, так и в эксплуатации является определение показателей безотказности и долговечности колесных пар локомотивов.

На основании имеющейся информации о контролируемых параметрах колесной пары тепловозов серии 2ТЭ25КМ выполнено определение вида и параметров закона распределения случайной величины, по которым представляется возможным определить вероятность ее распределения, а также интенсивность износа бандажей колесных пар. При помощи ЭВМ был получен закон распределения толщины бандажа при фиксированной наработке с параметрами, представленный плотностью распределения. С использованием критерия Пирсона определена вероятность соответствия полученному закону распределения, согласно которому расхождение теоретического и статического распределений должно быть больше, чем фактически наблюдаемое [1, 11]. По результатам распределения величин толщины бандажа и гребня найдены зависимости среднего значения и среднеквадратического отклонения контролируемого параметра (для толщины бандажа –  $m_x(t) = -7 \cdot 10^{-5} \cdot t + 80,195$ ,  $\sigma_x(t) = 10^{-5} \cdot t + 0,572$ , для толщины гребня –  $m_x(t) = -10^{-5} \cdot t + 31,51$ ,  $\sigma_x(t) = 3 \cdot 10^{-6} \cdot t + 0,468$ ), а также зависимости вероятности безотказной работы  $P(t)$  и вероятности отказа  $Q(t)$  с увеличением наработки. В настоящей работе разработана математическая модель оценки долговечности колесных пар с точки зрения теории надежности, с использованием которой будут определены показатели долговечности колесных пар тепловозов на основании обработки результатов по замерам толщины бандажа и гребня. Будет найден также параметр, лимитирующий надежность колесных пар исследуемой серии локомотивов.

В данной статье для определения показателей долговечности колесных пар локомотивов были выбраны тепловозы серии 2ТЭ25КМ, эксплуатирующиеся на Приволжской железной дороге. В процессе эксплуатации локомотивов зафиксированы значения контролируемых параметров, которые, в свою очередь, являются основополагающими для дальнейшего расчета и анализа.

Для определения показателей долговечности колесных пар тепловозов серии 2ТЭ25КМ требуется выполнить расчет и построение функции плотности распределения толщины бандажа и гребня локомотивов  $f(x)$  с последующим определением 90 %-ного ресурса колесных пар по результатам значений контролируемых параметров.

Поскольку закон распределения толщины бандажа колесных пар тепловозов серии 2ТЭ25КМ при фиксированной наработке  $t$  является нормальным, то в настоящем расчете учитывается данный вид закона [11].

Толщина бандажа и гребня является уменьшающимся параметром, тогда вероятность отказа определяется соотношением [1]

$$Q(t) = F(t) = \int_{m_x(t) - 3\sigma_x(t)}^{X_{\text{доп}}} f(x) dx. \quad (1)$$

Функция плотности распределения толщины бандажа и гребня  $f(x)$  для нормального закона распределения случайной величины определяется [1] как

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_x(t)} \cdot e^{-\frac{(X_{\text{доп}} - m_x(t))^2}{2\sigma_x^2(t)}}. \quad (2)$$

Учитывая, что в данном расчете несколько значений случайной величины  $x_i$  при начальном значении наработки  $t_n$  и наработке, соответствующей вероятности отказа 0,5  $t_{0,5}$ ,

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_x(t)} \cdot e^{-\frac{(x_i - m_x(t))^2}{2\sigma_x^2(t)}}. \quad (3)$$

Начальные значения наработки  $t_n$  и наработки, соответствующей вероятности отказа 0,5,  $t_{0,5}$  рассчитываются по методике, изложенной в учебном пособии [2], причем величины при исследовании толщины бандажа и толщины гребня различны в соответствии с представленными ранее зависимостями среднего значения  $m_x$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma_x$  контролируемых параметров колесных пар.

Зависимости среднего значения  $m_x$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma_x$  толщины бандажа от наработки таковы:

$$m_x(t) = -7 \cdot 10^{-5} \cdot t + 80,195;$$

$$\sigma_x(t) = 10^{-5} \cdot t + 0,572.$$

Начальное значение наработки  $t_n = 384790$  км.

Наработка, равная вероятности отказа 0,5,  $t_{0,5} = 574213,3$  км.

Допустимое значение величины бандажа  $X_{\text{доп}} = 40$  мм.

Значения толщины бандажа при наработках:

при  $t = 384790$  км –

$$x = m_x(t) = 53,26 \text{ мм};$$

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$x = m_x(t) - \sigma_x(t) = 53,26 - 4,42 = 48,84 \text{ мм};$$

$$x = m_x(t) - 2 \cdot \sigma_x(t) = 53,26 - 2 \cdot 4,42 = 44,42 \text{ мм};$$

$$x = m_x(t) - 3 \cdot \sigma_x(t) = 53,26 - 3 \cdot 4,42 = 40 \text{ мм};$$

при  $t = 574214,3 \text{ км}$  –

$$x = m_x(t) = 40 \text{ мм};$$

$$x = m_x(t) - \sigma_x(t) = 40 - 6,314 = 33,686 \text{ мм};$$

$$x = m_x(t) - 2 \cdot \sigma_x(t) = 40 - 2 \cdot 6,314 = 27,372 \text{ мм};$$

$$x = m_x(t) - 3 \cdot \sigma_x(t) = 40 - 3 \cdot 6,314 = 21,058 \text{ мм}.$$

Полученные значения случайных величин  $x_i$ , а также рассчитанные значения функции плотности распределения толщины бандажа  $f_i(x)$  по формуле (3) для двух значений наработок сведем в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения функции плотности распределения толщины бандажа

Аргумент	$f(x)$			
	$x = m_x(t)$	$x = m_x(t) - \sigma_x(t)$	$x = m_x(t) - 2 \cdot \sigma_x(t)$	$x = m_x(t) - 3 \cdot \sigma_x(t)$
$t, \text{ км}$				
384790	0,090283364	0,054759629	0,012218525	0,001002958
574214,3	0,063198355	0,038331740	0,008552967	0,000702070

После расчетов и построений требуется определить 90 %-ный ресурс  $t_{\gamma=90\%}$ :

$$P(t_\gamma) = 0,9.$$

Поскольку  $P(t) + Q(t) = 1$ , то

$$F(t_\gamma) = 0,1.$$

По функции распределения Лапласа для  $F(t_\gamma) = 0,1$  определяется нормированное и центрированное значение  $z$  [1]:

$$z = -1,28.$$

Поскольку нормированное и центрированное значения определяются из соотношения [1]

$$z = \frac{X_{\text{доп}} - m_x(t)}{\sigma_x(t)}, \quad (4)$$

то, подставив числовые значения, можно определить  $t_{\gamma=90\%}$ :

$$-1,28 = \frac{40 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\gamma=90\%} - 80,195}{10^{-5} \cdot t_{\gamma=90\%} + 0,572};$$

$$t_{\gamma=90\%} = 476604 \text{ км}.$$

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

После определения  $t_{\gamma=90\%}$  выполняются построения функции плотности распределения  $f_x(t)$  толщины бандажа колесных пар локомотивов при значениях  $t_H$  и  $t_{0,5}$  (рисунок 1).

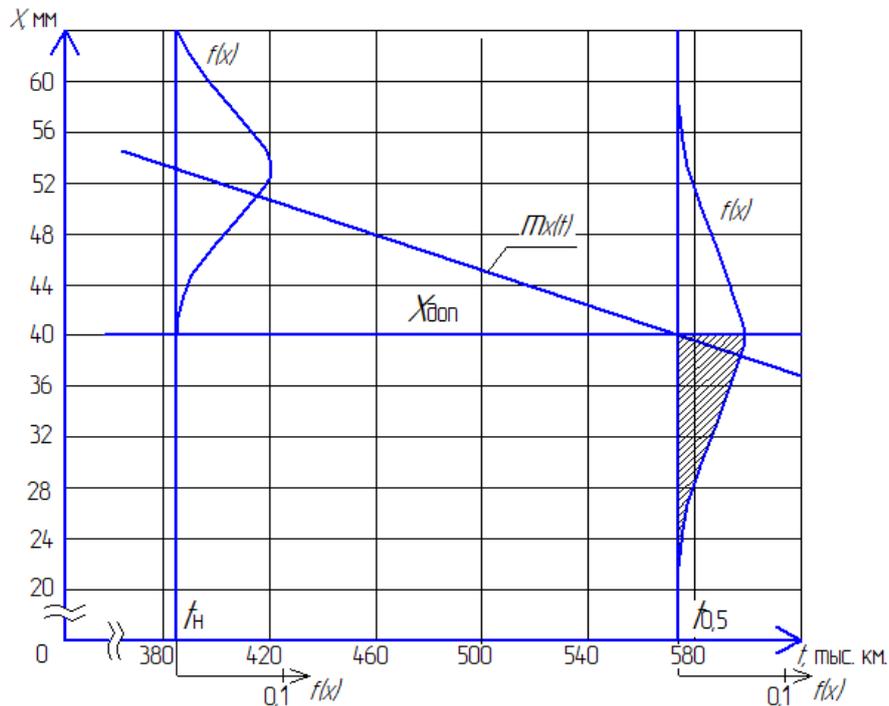


Рисунок 1 – Функция плотности распределения  $f_x(t)$  толщины бандажа

Зависимости среднего значения  $m_x$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma_x$  толщины гребня от наработки таковы:

$$m_x(t) = -10^{-5} \cdot t + 31,51;$$

$$\sigma_x(t) = 3 \cdot 10^{-6} \cdot t + 0,468.$$

Начальное значение наработки  $t_H = 163473,7$  км.

Наработка, равная вероятности отказа 0,5,  $t_{0,5} = 451000$  км.

Допустимое значение величины гребня  $X_{доп} = 27$  мм.

Значения толщины гребня при наработках:

при  $t = 163473,7$  км –

$$x = m_x(t) = 29,88 \text{ мм};$$

$$x = m_x(t) - \sigma_x(t) = 29,88 - 0,96 = 28,92 \text{ мм};$$

$$x = m_x(t) - 2 \cdot \sigma_x(t) = 29,88 - 2 \cdot 0,96 = 27,96 \text{ мм};$$

$$x = m_x(t) - 3 \cdot \sigma_x(t) = 29,88 - 3 \cdot 0,96 = 27 \text{ мм};$$

при  $t = 451000$  км –

$$x = m_x(t) = 27 \text{ мм};$$

$$x = m_x(t) - \sigma_x(t) = 27 - 1,82 = 25,18 \text{ мм};$$

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$x = m_x(t) - 2 \cdot \sigma_x(t) = 27 - 2 \cdot 1,82 = 23,36 \text{ мм};$$

$$x = m_x(t) - 3 \cdot \sigma_x(t) = 27 - 3 \cdot 1,82 = 21,54 \text{ мм}.$$

Полученные значения случайных величин  $x_i$ , а также рассчитанные значения функции плотности распределения толщины гребня  $f_i(x)$  по формуле (3) для двух значений наработок сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения функции плотности распределения толщины гребня

Аргумент	$f(x)$			
	$x = m_x(t)$	$x = m_x(t) - \sigma_x(t)$	$x = m_x(t) - 2 \cdot \sigma_x(t)$	$x = m_x(t) - 3 \cdot \sigma_x(t)$
163473,7	0,416355	0,252532	0,056348	0,004625
451000	0,219134	0,132912	0,029657	0,002434

Используя уравнение (4), аналогичным образом определяем 90 %-ный ресурс  $t_{\gamma=90\%}$ :

$$-1,28 = \frac{27 + 10^{-5} \cdot t_{\gamma=90\%} - 31,51}{3 \cdot 10^{-6} \cdot t_{\gamma=90\%} + 0,468};$$

$$t_{\gamma=90\%} = 282583,8 \text{ км}.$$

После определения  $t_{\gamma=90\%}$  выполняются построения функции плотности распределения  $f_x(t)$  толщины гребня колесных пар локомотивов при значениях  $t_H$  и  $t_{0,5}$  (рисунок 2).

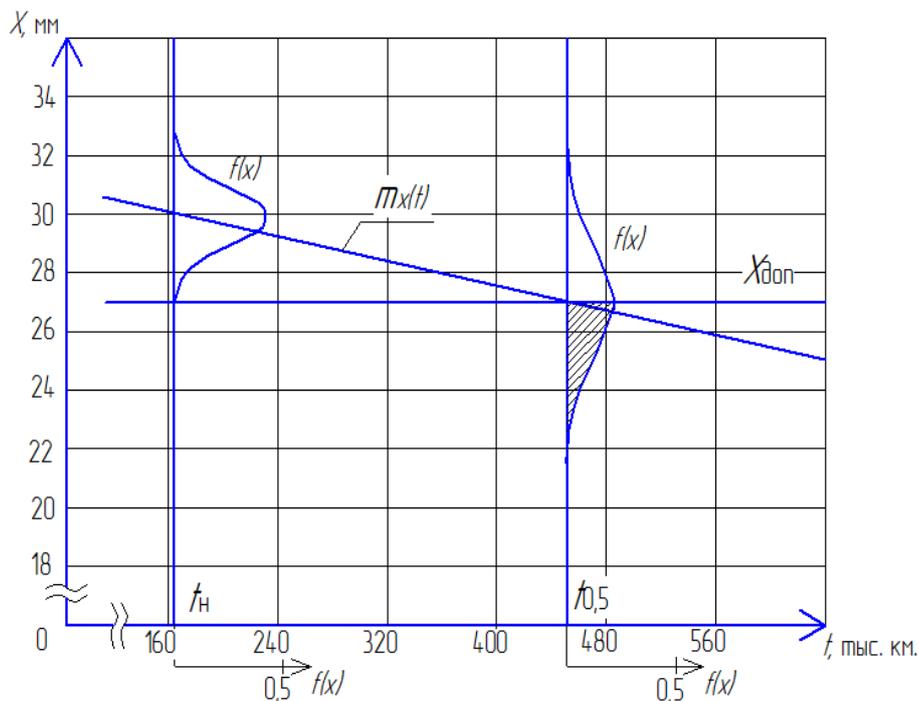


Рисунок 2 – Функция плотности распределения  $f_x(t)$  толщины гребня

Для определения показателей долговечности по результатам распределений контролируемых параметров колесных пар тепловозов серии 2ТЭ25КМ, эксплуатирующихся на Приволжской железной дороге, были использованы данные по замерам параметров колесных пар при проведении технического обслуживания и ремонта в соответствии с принятыми межремонтными пробегами, на основании которых определен вид и параметры закона распределения случайных величин. Полученные зависимости позволяют определить вероятность распределения случайной величины и интенсивность износа бандажей колесных пар. По результатам систематизации и обработки данных по замерам параметров колесных пар найдены зависимости среднего значения  $m_x$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma_x$  толщины бандажа и гребня, начальные значения наработок  $t_n$  и наработок  $t_{0,5}$ , соответствующих вероятности отказа 0,5.

Исходные параметры дали возможность при помощи ЭВМ определить закон распределения случайной величины и вероятность соответствия полученному закону согласно критерию Пирсона. Разработана математическая модель оценки долговечности колесных пар с точки зрения теории надежности, на основании которой определены значения толщины бандажа и гребня, а также функция плотности распределения при фиксированных наработках с учетом того, что случайная величина изменяется по нормальному закону распределения.

На основе допустимых значений контролируемых параметров определен 90 %-ный ресурс колесных пар для двух контролируемых параметров, который составил для толщины бандажа 476,6 тыс. км, для толщины гребня – 282,6 тыс. км. По результатам обработки и анализа статистических данных по замерам контролируемых параметров колесных пар тепловозов выбранной серии выявлено, что массовая обточка поверхности катания начинается в среднем при наработке узла 240 тыс. км. Помимо этого выявлены случаи, связанные с заменой колесных пар, а также с частым нахождением локомотивов на внеплановом ремонте (ТО-4).

В соответствии с Техническими условиями на эксплуатируемую серию локомотивов, ресурс колесной пары должен составлять 800 тыс. км, а согласно расчетным и эксплуатационным данным – гораздо меньше. Поэтому можно утверждать, что направление исследования является актуальным и весьма применимым при эксплуатации подвижного состава. Однако ввиду того, что в эксплуатации средний ресурс колесной пары определяется по большему числу контролируемых параметров с учетом внеплановых ремонтов, а в настоящем исследовании – только на основании толщин бандажа и гребня, то о полном соответствии расчетных и фактических данных говорить не представляется возможным.

На основании сказанного выше можно сделать вывод о том, что в настоящих расчетах лимитирующим надежностью является такой параметр, как толщина гребня. Полученные значения ресурса колесных пар позволяют сделать выводы о том, что на интенсивность изнашивания оборудования подвижного состава влияют конкретные условия эксплуатации, соответственно межремонтные пробеги локомотивов должны быть скорректированы с учетом имеющихся факторов. Следует учитывать также, что в работе не были учтены внезапные отказы, которые также влияют на ресурс колесных пар. Поэтому для полной оценки показателей долговечности колесных пар необходимо учитывать и дополнительные факторы (в том числе и число контролируемых параметров) помимо тех, что влияют на параметрическое изменение случайных величин.

### *Список литературы*

1. Воробьев, А. А. Надежность подвижного состава : учебник / А. А. Воробьев, В. А. Четвергов, С. В. Шевцов [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2017. – 301 с. – Текст : непосредственный.
2. Воробьев, А. А. Расчет показателей надежности тягового подвижного состава. Часть 2. Расчет показателей надежности сложных систем : учебное пособие / А. А. Воробьев,

А. В. Горский, А. В. Скребков, Д. М. Маяков. – Москва : Российский университет транспорта, 2020. – 88 с. – Текст : непосредственный.

3. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 23 с. – Текст : непосредственный.

4. Лакин, И. К. Применение статистических методов при диагностировании тепловозов / И. К. Лакин, А. А. Аболмасов, В. А. Мельников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 1 (21). – С. 20–29.

5. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ : Руководство по эксплуатации / В. Ю. Гусев [и др.]. – Брянск : ЗАО «УК БМЗ», 2015. – Ч. 1 – 4. – 542 с. – Текст : непосредственный.

6. Гапанович, В. А. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В. А. Гапанович, В. И. Киселев, И. К. Лакин. – Москва : Ирис-групп, 2012. – 576 с. – Текст : непосредственный.

7. Воробьев, А. А. Оценка ресурса оборудования ТПС / А. А. Воробьев, А. В. Скребков. – Текст : непосредственный // Мир Транспорта. – 2012. – № 5. – С. 38–42.

8. Кольцов, Ю. А. Оценка эксплуатационных показателей безотказности оборудования электровозов / Ю. А. Кольцов, А. В. Скребков // Известия Транссиба. – 2018. – № 2 (34). – С. 29–35. – Текст : непосредственный.

9. Воробьев, А. А. Анализ износа бандажей колесных пар электровозов 2ЭС10 / А. А. Воробьев, Р. С. Сметанин. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (46). – С. 13–17.

10. Воробьев, А. А. Методика анализа надежности оборудования электровозов 2ЭС10 / А. А. Воробьев, Р. С. Сметанин. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (49). – С. 28–39.

11. Маяков, Д. М. Определение вида и параметров закона распределения толщины бандажа колесных пар тепловозов серии 2ТЭ25КМ при фиксированной наработке / Д. М. Маяков. – Текст : непосредственный // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации : материалы международной научно-практической конференции. – Москва : Институт развития образования и консалтинга, 2021. – С. 109–113.

### References

1. Vorobyov A. A., Chetvergov V. A., Shevtsov S. V. *Nadeznost' podvizhnogo sostava* (Reliability of rolling stock). Moscow: Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2017, 301 p.

2. Vorobyov A. A., Gorskiy A. V., Skrebkov A. V., Mayakov D. M. *Raschet pokazatelei nadezhnosti tyagovogo podvizhnogo sostava. Chast' 2. Raschet pokazatelei nadezhnosti slozhnykh sistem* (Calculation of reliability indicators of traction rolling stock. Part 2. Calculation of reliability indicators of complex systems). Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2020, 88 p.

3. *Nadyozhnost' v tekhnike (SSNT). Terminy i opredeleniya, GOST 27.002-2015* (Reliability in technology (SSNT). Terms and definitions, National Standard 27.002-2015). Moscow, Standardinform, 2017, 2016, 23 p.

4. Lakin I. K., Abolmasov A. A., Mel'nikov V. A. Application of statistical methods through DPU diagnostics [Primenenie statisticheskikh metodov pri diagnostirovani teplovozov]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 20 – 29.

5. Gusev V. Yu. and others. *Magistral'nii gruzovoi dvukhseksionnii teplovoz 2TE25KM: Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Mainline cargo two-section diesel locomotive 2TE25KM: Operation manual]. Bryansk: Bryansk : CJSC BMZ Management Company, 2015, 542 p.

6. Gapanovich V. A., Kiselev V. I., Lakin I. K. *Ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava* (Operation and maintenance of rolling stock). Moscow: Iris-grupp Publ., 2012, 576 p.

7. Vorobyov A. A., Skrebkov A. V. Assessment of life capacity of equipment of traction rolling stock [Otsenka resursa oborudovaniya TPS]. *Mir Transporta – World of transport and transportation*, 2012, no. 5, pp. 38 – 42.

8. Kol'tsov Yu. A., Skrebkov A. V. Assessment of observed reliability measures of locomotive equipments [Otsenka ekspluatatsionnykh pokazatelei bezotkaznosti oborudovaniya elektrovozov]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 2 (34), pp. 29 – 35.

9. Vorobyov A. A., Smetanin R. S. Analysis of 2ES10 electric locomotive wheelset binding bands wear [Analiz iznosa bandazhei kolesnykh par elektrovozov 2ES10]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya – Scientific journal «Herald of the Ural State University of Railway Transport»*, 2020, no. 2 (46), pp. 13 – 17.

10. Vorobyov A. A., Smetanin R. S. Methodology for analyzing reliability of the equipment of electric locomotives 2ES10 [Metodika analiza nadezhnosti oborudovaniya elektrovozov 2ES10]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya – Scientific journal «Herald of the Ural State University of Railway Transport»*, 2021, no. 1 (49), pp. 28 – 39.

11. Mayakov D. M. Determination of the type and parameters of the law of distribution of the thickness of the bandage of wheel pairs of diesel locomotives of the 2TE25KM series at a fixed operating time [Opredelenie vida i parametrov zakona raspredeleniya tolshchiny bandazha kolesnykh par teplovozov serii 2TE25KM pri fiksirovannoi narabotke]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epokhu tsifrovizatsii : materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Modern trends in the development of science and the world community in the era of digitalization: materials of the International Scientific and Practical Conference). – Moscow, 2021, pp. 109 – 113.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Маяков Денис Михайлович**

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (985) 910-72-97.

E-mail: majakovdenis@yandex.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Mayakov Denis Mikhailovich**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9 b9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Electric trains and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (985) 910-72-97.

E-mail: majakovdenis@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Маяков, Д. М. Определение показателей долговечности элементов колесной пары по информации о распределении контролируемого параметра тепловозов серии 2ТЭ25КМ / Д. М. Маяков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 69 – 77.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mayakov D. M. Determination of durability indicators of wheelset elements based on information on the distribution of the controlled parameter of diesel locomotives of the 2TE25KM series. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 3 (47), pp. 69 – 77 (In Russian).

Д. В. Муравьев, О. П. Супчинский

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ И РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ ВКЛАДЫШЕЙ МОТОРНО-ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

**Аннотация.** Статья посвящена разработке методики контроля соосности и радиального биения внутренних цилиндрических посадочных поверхностей вкладышей моторно-осевых подшипников локомотивов. Перечислены основные причины изнашивания рабочих поверхностей подшипников и последствия влияния зазоров в сопряжениях подшипников скольжения и осей колесных пар на повышение интенсивности изнашивания деталей и ухудшение динамических характеристик ходовой части локомотива. В работе приведена принципиальная схема базирования и контроля отклонений от соосности и радиального биения внутренних цилиндрических поверхностей подшипников, описаны конструкция и принцип действия специального контрольного приспособления для измерения указанных отклонений. Цель работы заключается в обосновании целесообразности контроля отклонений от формы и расположения поверхностей при ремонте моторно-осевых подшипников. В статье описывается последовательность этапов измерения соосности и радиального биения подшипников и интерпретация результатов измерений. Рассмотрены особенности конструкции контрольного приспособления, перечислены преимущества его использования по сравнению с существующими аналогами приспособлений, применяемых для контроля соосности отверстий корпусных деталей, расположенных на одной оси. При этом установлено, что контроль соосности и радиального биения необходимо проводить для того, чтобы оценить возможную степень перекоса остова тягового электродвигателя и оси колесной пары локомотива после ремонта. Таким образом, полученные выводы подтверждают необходимость ужесточения контроля качества восстановления моторно-осевых подшипников локомотивов за счет внедрения в производственный процесс операций контроля соосности и радиального биения моторно-осевых горловин и вкладышей моторно-осевых подшипников, изготовленных из свинцовых бронз, оловянных или свинцово-оловянных баббитов.

**Ключевые слова:** подшипник, форма, расположение, отклонение, износ, дефект, контроль, локомотив, ресурс, измерение, соосность.

Dmitry V. Muraviev, Oleg P. Supchinsky

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## TECHNIQUE FOR MONITORING THE ALIGNMENT AND RADIAL BEATING INSERTS OF MOTOR-AXLE BEARINGS OF TRACTION ELECTRIC MOTORS OF LOCOMOTIVES

**Abstract.** The article is devoted to the development of a methodology for monitoring the alignment and radial runout of the inner cylindrical seating surfaces of locomotive motor-axle bearings. The main reasons for the wear of the working surfaces of the bearings and the consequences of the influence of the clearances in the interfaces of the plain bearings and the axles of the wheelsets on the increase in the intensity of wear of the parts and the deterioration of the dynamic characteristics of the running gear of the locomotive are listed. The paper presents a basic diagram of the basing and control of deviations from alignment and radial runout of the inner cylindrical surfaces of bearings, describes the design and principle of operation of a special control device for measuring these deviations. The purpose of the work is to substantiate the feasibility of monitoring deviations from the shape and location of surfaces during the repair of motor-axle bearings. The paper describes the sequence of steps for measuring the alignment and radial runout of bearings and the interpretation of the measurement results. The features of the design of the control device are considered, the advantages of its use are listed in comparison with the existing analogues of the devices used to control the alignment of the holes of the body parts located on the same axis. At the same time, it was found that the control of alignment and radial runout must be carried out in order to assess the possible degree of misalignment of the traction motor frame and the axle of the wheelset of the locomotive after repair. Thus, the conclusions obtained confirm the need to tighten quality control of the restoration of locomotive motor-axle bearings by introducing into the production process the operations to control the alignment and radial runout of motor-axle necks and motor-axle bearing liners made of lead bronze, tin or lead-tin babbitts.

**Keywords:** bearing, shape, location, deviation, wear, defect, control, locomotive, resource, measurement, alignment.

Большинство локомотивов, курсирующих по сети железных дорог России и стран СНГ, оснащены тяговым приводом 1-го класса. Его конструктивные особенности заключаются в том, что половина веса тягового электродвигателя подрессорена и передается на шкворневую балку рамы тележки, а вторая половина веса – через моторно-осевой подшипник (МОП) скольжения на ось колесной пары. Возникающая при этом связь двигателя с колесной парой позволяет технически просто с помощью МОПа обеспечить параллельность вала якоря электродвигателя и оси колесной пары и постоянство расстояний между ними. Это дает возможность применить простейшую тяговую передачу, состоящую из шестерни и зубчатого колеса, жестко посаженных на вал якоря электродвигателя и ось колесной пары [1]. Однако для данной конструктивной схемы характерны значительные разрушающие нагрузки, действующие на тяговый электродвигатель.

Моторно-осевые подшипники состоят из вкладышей и букс с постоянным уровнем смазки, контролируемым по указателю. Каждый вкладыш моторно-осевых подшипников состоит из двух половин, в одной из которых, обращенной к буксе, выполнено окно для подачи смазки. Вкладыши имеют бурты, фиксирующие их положение в осевом направлении. От проворачивания вкладыши предохраняют шпонками. Внутренняя поверхность вкладышей заливается баббитом Б16 или Б83 и растачивается по диаметру [2]. После растачивания вкладыши подгоняют по шейкам оси колесной пары. Строение подшипника обуславливает его преимущества и, соответственно, его недостатки. Так, из-за высокой скорости износа вкладышей (обычно это происходит из-за недостаточного количества смазки) подшипник весьма недолговечен. Также причиной его быстрого износа может стать тепловая энергия, если она выводится из зоны трения недостаточно эффективно, что, к сожалению, происходит достаточно часто. С увеличением частоты вращения вследствие действия гидродинамического эффекта несущая способность сначала повышается, однако в дальнейшем тепловые процессы при высоких скоростях приводят к уменьшению вязкости смазочного материала и потере несущей способности подшипников скольжения.

Кроме того, нарушение технологии ремонта вкладышей МОПов, выраженное в разнице диаметров моторно-осевых горловин (МОГ) левого и правого МОПов, расположенных на одной оси колесной пары, или несоблюдение требований по допустимым значениям диаметров посадочных поверхностей МОПов после растачивания может приводить к перекосу букс МОПов относительно колесной пары, непараллельности оси вала якоря и оси колесной пары и, соответственно, к неравномерному и интенсивному изнашиванию не только вкладышей МОПов, но и других узлов и деталей колесно-моторного блока (КМБ) локомотива.

Таким образом, решающее влияние на скорость изнашивания подшипника скольжения в эксплуатации оказывают следующие факторы: величина динамических нагрузок (контактного давления) как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости, механические и эксплуатационные свойства материала деталей, физико-химические свойства смазочного материала, методы смазывания, а также обеспечение точности и жесткости корпуса, оптимального зазора и самоустановки подшипника, соосности осей колесной пары и вкладышей подшипника, соосности левой и правой пары вкладышей МОПов [3].

В свою очередь, зазор в МОПе оказывает влияние на изменение расположения и площади пятна контакта в зубчатом зацеплении при передаче крутящего момента. Площадь пятна контакта уменьшается и происходит его смещение к вершине зуба ведущей шестерни, в результате чего повышается удельное давление в пятне контакта, что ведет к увеличению динамических нагрузок и интенсивности изнашивания стенок зубьев ведущей шестерни и зубчатого колеса тягового редуктора и сколам зубьев. Кроме того, наличие радиальных зазоров в МОПах и несоосности левого и правого МОПов является причиной перекоса оси.

Наиболее интенсивное изнашивание подшипников скольжения протекает в период приработки, пуска, остановки и реверса ТЭД.

Анализ производственных данных показал, что при восстановлении МОПов локомотивов в условиях депо в результате растачивания моторно-осевых горловин или вкладышей МОПов

в сборе за два установка на изношенном оборудовании возникают отклонения в диаметрах и положении осей горловин МОПов одной колесной пары, что приводит [4, 5]

к перекосу оси колесной пары относительно остова ТЭД при разных радиальных зазорах в левом и правом МОПах;

перекосу оси колесной пары относительно остова ТЭД при несоосности левого и правого МОПов.

Распространение практики применения расточных станков для одновременной независимой обработки моторно-осевых горловин и вкладышей левого и правого МОПов за один установ не исключает возможности возникновения указанных дефектов.

Подводя итоги проведенной оценки, необходимо отметить, что при выполнении выходного контроля после восстановления МОГ и вкладышей МОПов и их установки в буксы следует помимо контроля диаметров посадочных поверхностей МОПов и радиальных зазоров выполнять контроль соосности и радиального биения. Данные контрольные операции позволят определить отклонения контролируемых параметров от допустимых значений и оценить вероятность перекоса оси колесной пары локомотива относительно остова ТЭД.

С этой целью было спроектировано специальное контрольное приспособление и разработана методика измерения отклонений от соосности и радиального биения посадочных поверхностей моторно-осевых горловин и вкладышей МОПов локомотива.

Каждое измерение несоосности направлено на получение оценки наибольшего расстояния между осью рассматриваемой поверхности вращения и базой. При этом в качестве базы может выступать либо ось некоторой отдельной базовой поверхности, либо общая ось двух или нескольких поверхностей [6]. В соответствии с этим и методики выполнения измерений в этой области подразделяются на две группы:

1) методики выполнения измерений отклонений от соосности элементов деталей относительно оси базовой поверхности;

2) методики выполнения измерений отклонений от соосности элементов деталей относительно общей оси двух или нескольких поверхностей.

Основу реализации этих методик составляют экспериментальное воспроизведение осей наружных и внутренних номинально цилиндрических поверхностей деталей, общих осей двух или нескольких поверхностей и адекватное моделирование соответствующих расстояний между осями или их отклонений.

Пример реализации подобных методик измерения соосности отверстий моторно-осевых горловин или вкладышей левого и правого МОПов ТЭД локомотива представлен на рисунке 1.

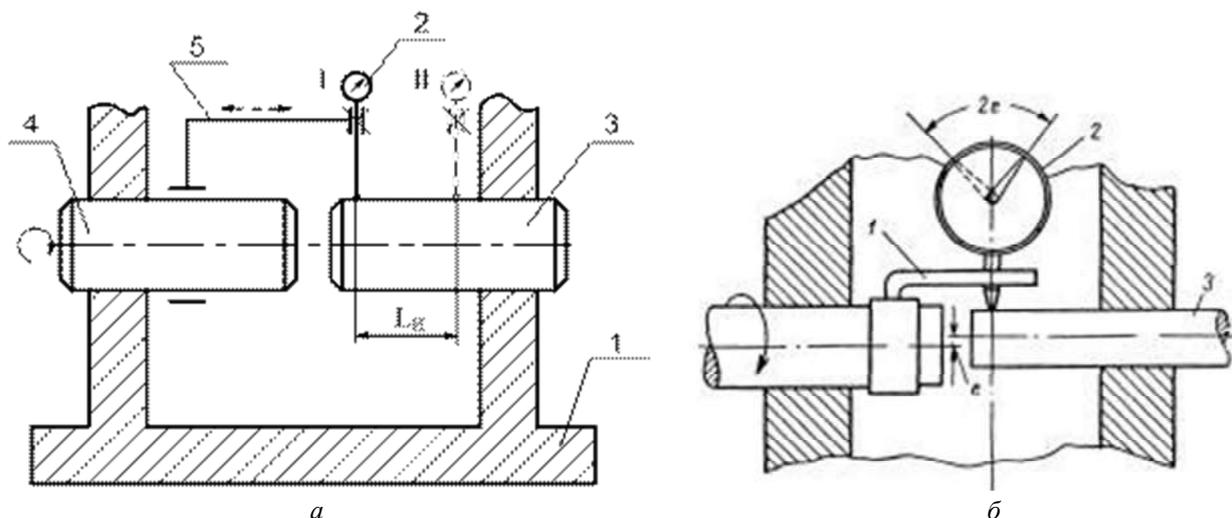


Рисунок 1 – Схема измерения отклонения от соосности внутренних номинально цилиндрических поверхностей:  
а – схема контроля соосности: 1 – контролируемая деталь; 2 – измерительная головка (индикатор); 3, 4 – контрольные цилиндрические оправки; 5 – установочное приспособление; б – снятие показаний индикатора:

1 – штатив; 2 – индикатор часового типа; 3 – оправка цилиндрическая

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В контролируемые отверстия детали плотно «от руки» вставляются контрольные цилиндрические оправки. На одной из них закрепляется установочное приспособление вместе с измерительной головкой с возможностью вращения относительно оси этой оправки.

Вращая установочное приспособление вместе с измерительной головкой вокруг оси контрольной оправки в положениях I и II, фиксируют максимальную алгебраическую разность показаний измерительной головки в каждом из них (рисунок 1, а).

За результат измерения отклонения от соосности рассматриваемых поверхностей в радиусном выражении принимается половина наибольшего из полученных значений разности показаний (рисунок 1, б). Точность проверки изложенным методом находится в пределах 0,04 мм, если контрольные валики плотно входят в базовые отверстия детали [7].

Сложность применения такой схемы контроля соосности отверстий МОГ заключается в том, что потребуется применение громоздких цилиндрических оправок, а также в сложности обеспечения требуемого зазора между контролируемыми поверхностями и оправками.

В первую очередь перед проектированием приспособления была разработана схема контроля соосности и радиального биения отверстий МОПов (рисунок 2), которая позволила составить схему базирования средства измерения (СИ), положение его контрольных элементов относительно поверхностей детали и степени свободы детали и СИ [8 – 11].

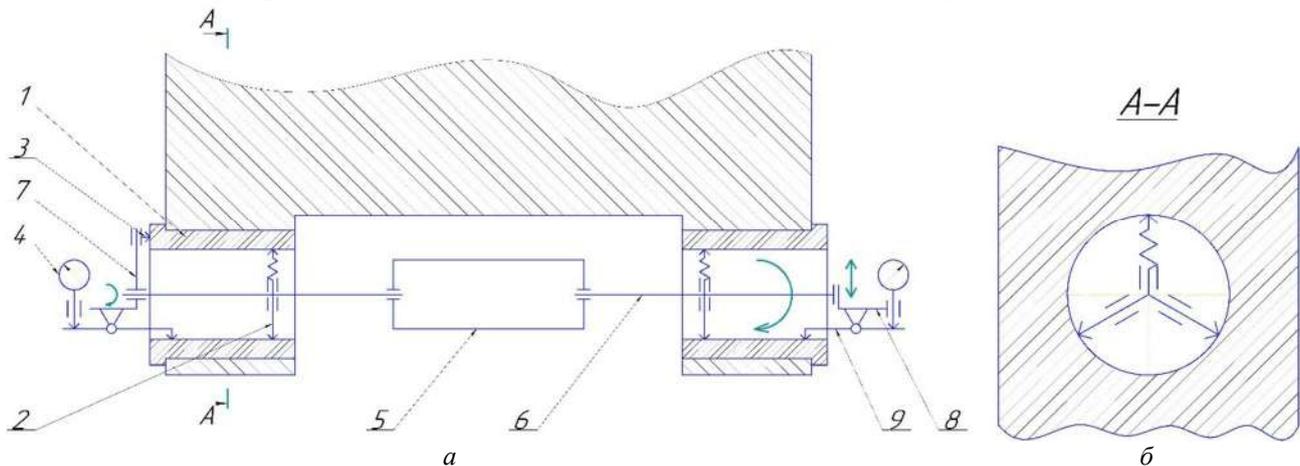


Рисунок 2 – Схема контроля соосности и радиального биения отверстий левого и правого МОПов: 1 – вкладыш МОПа; 2 – жесткий упор базировочного мостика; 3 – упор при контроле радиального биения; 4 – измерительная головка с индикатором часового типа; 5 – осевой упор; 6 – штанга балансировочная; 7 – стойка измерительной головки для контроля радиального биения; 8 – стойка измерительной головки для контроля соосности отверстий; 9 – измерительная пятка

Принцип работы приспособления при контроле отклонения от соосности двух посадочных отверстий моторно-осевых горловин МОПов относительно их общей оси заключается в том, что в отверстия контролируемых вкладышей 1 корпуса МОПа вставляют две балансировочные штанги 6, зафиксированные вдоль оси упором 5 и способные вращаться вокруг него независимо друг от друга. Оси вращения двух измерительных головок 4 (измерительных пятки) лежат в общей плоскости двух жестких упоров 2 базировочных мостиков и отстоят от этих упоров на расстоянии, равном половине длины отверстия. Отклонения от соосности посадочных поверхностей МОГ измеряют путем снятия показаний измерительных головок 4 при вращении в проверяемых отверстиях на  $360^\circ$  через угловой интервал, равный  $60^\circ$ . При этом за результат несоосности двух отверстий в радиальном направлении будет приниматься половина наибольшего отклонения стрелки индикатора за один полный оборот балансировочной штанги. Подвижная в радиальном направлении стойка 8, на которой закреплена правая измерительная головка 4, позволяет производить контроль различных по диаметру отверстий, а также повысить чувствительность измерительной пятки 9, регулируя положение стойки 8 в радиальном направлении.

Кроме того, разработанное контрольное приспособление позволяет измерять радиальные биения посадочных отверстий МОГ и вкладышей МОПов. Данные измерения проводятся при помощи левой измерительной головки 4, которая установлена на стойке 7, способной свободно вращаться относительно левой балансировочной штанги 6 и имеющей на конце упор 3 для контроля радиального биения контролируемой поверхности. Поворот левой измерительной головки 4 на полный оборот вокруг балансировочной штанги 6 позволит по максимальным отклонениям стрелки индикатора определить максимальные значения радиального биения посадочной поверхности МОГ или вкладышей МОПов.

Базирование установочных элементов приспособления относительно базовых поверхностей детали осуществляется с целью придания деталям и измерительным головкам приспособления правильного положения в соответствии с разработанной схемой измерения.

Исходя из разработанной схемы контроля соосности и радиального биения посадочных отверстий моторно-осевых горловин МОПов схема базирования контрольного приспособления приведена на рисунке 3.

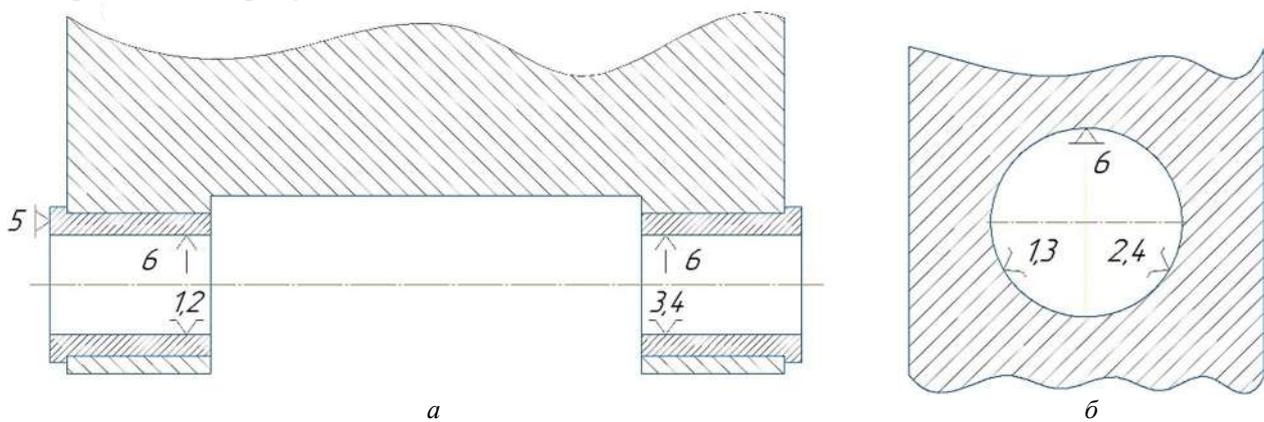


Рисунок 3 – Схема базирования контрольного приспособления относительно контролируемых отверстий моторно-осевых горловин МОПов

В соответствии с разработанной схемой базирование приспособления осуществляется по двойной направляющей базе, в качестве которой используются посадочные поверхности МОПов, реализующие четыре опорные точки – по две на каждый МОП, т. е. точки 1 и 2 на левом МОПе и точки 3 и 4 на правом МОПе. В этом случае приспособление лишается четырех степеней свободы при размещении в буксах МОПа: перемещений вдоль и вращений вокруг осей  $x$  и  $z$ . Опорная база, роль которой играет торцевая поверхность бурта вкладыша МОПа, включает в себя одну опорную точку 5 и лишает приспособление одной степени свободы – перемещения вдоль оси  $y$ .

Таким образом, остается только одна степень свободы – вращение вокруг оси  $y$ , которая необходима непосредственно для осуществления процесса измерения отклонений от соосности и радиального биения при поворотах измерительных головок с индикаторами вокруг осей балансировочных штанг.

Кроме того, трехточечная конструкция жестких упоров базирующих мостиков помимо двух опорных точек 1-2 и 3-4 левого и правого МОПов включает в себя регулируемую подпружиненную опору 6, которая не влияет на процесс базирования, но позволяет вводить приспособление в отверстия моторно-осевых горловин МОПов, в том числе с разными диаметрами левого и правого МОПов, и поддерживать надежный контакт основных опорных элементов с цилиндрическими стенками отверстий.

Приспособление для контроля соосности посадочных поверхностей моторно-осевых горловин моторно-осевых подшипников тяговых электродвигателей локомотивов спроектировано полностью в соответствии с разработанной схемой контроля и предназначено для определения несоосности внутренних цилиндрических поверхностей левого и правого МОПов

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

относительно друг друга, а также для определения радиального биения посадочной поверхности каждого подшипника в отдельности.

Итак, конструкция приспособления для контроля соосности и радиального биения моторно-осевых горловин и вкладышей МОПов представлена на рисунке 4.

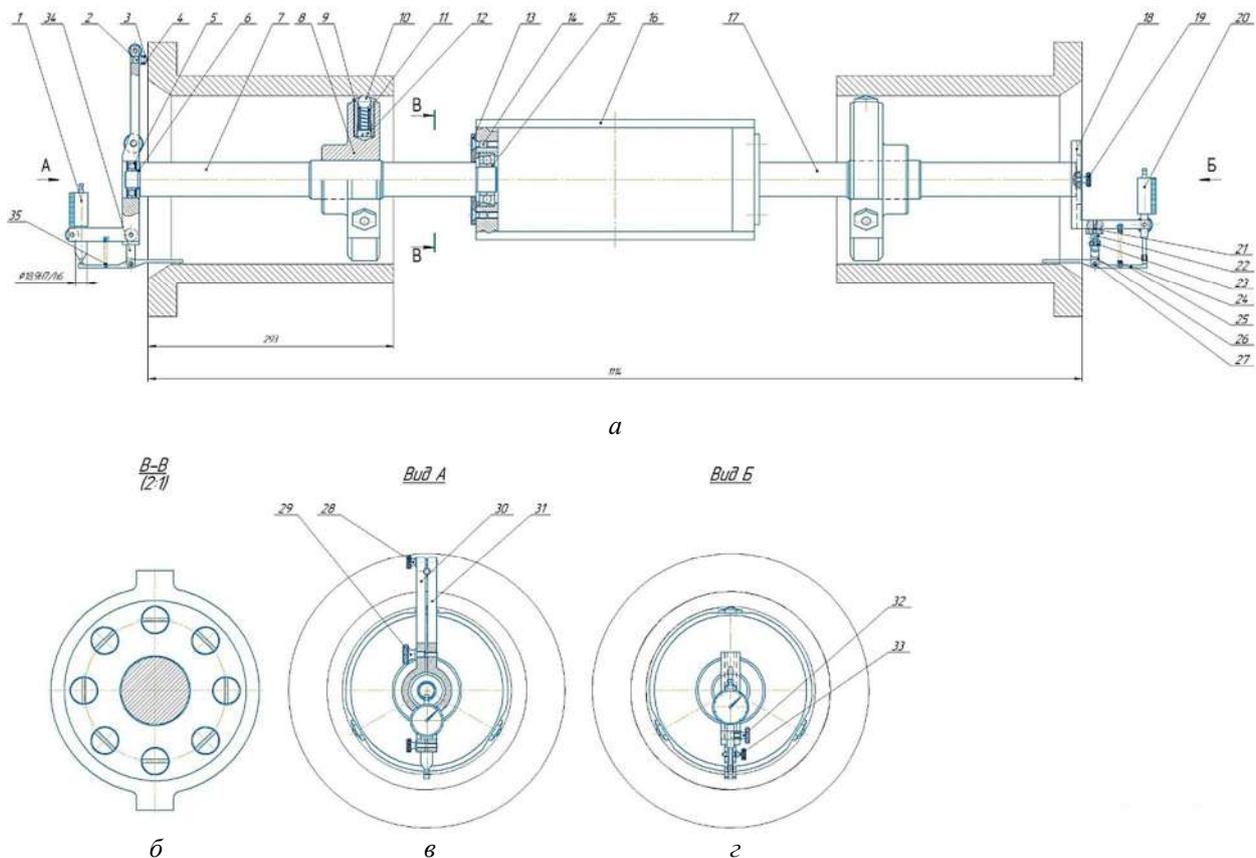


Рисунок 4 – Приспособление для контроля соосности и радиального биения МОПов

В корпус 16, который является связующим элементом между левым и правым контролируемыми моторно-осевыми подшипниками, вставляются валы 7 и 17 с предварительно напрессованными на шейках подшипниками 15 и установленными крышками 13, после чего крышки фиксируются винтами 14, прижимая тем самым подшипники к основанию корпуса и регулируя их осевое перемещение. Кроме того, предварительно на валы 7 и 17 напрессовываются опоры приспособления в виде ступиц 8 и опорных элементов, состоящих из двух шариков 10 на жесткой опоре и одного шарика 10, поджимаемого к внутренней поверхности МОПа пружиной 11, зафиксированной в резьбовой втулке 9 заглушкой 12.

Далее производится монтаж измерительных головок на концы валов 7 и 17. Слева устанавливается сборная измерительная головка, предназначенная для измерения радиального биения внутренней цилиндрической посадочной поверхности МОПа. Она состоит из двух трубок – 30 и 31, которые при монтаже устанавливаются на подшипник 5, предварительно напрессованный на шейку вала и отделяемый от ступени вала 7 разделительным кольцом 6. Трубки 30 и 31, установленные по наружному кольцу подшипника 5, стягиваются фиксаторами 28 и 29. Это позволяет стянутым трубкам свободно вращаться относительно неподвижного вала 7. При сборке трубок в вертикально расположенное отверстие, образуемое ими, устанавливается индикатор 1 часового типа ИРБ 0...0,8 мм ГОСТ 5584–75, а в горизонтально расположенное отверстие – палец 2, на котором при помощи колпачка 3 фиксируется опорный шарик 4. Шарик 4 обеспечивает точку контакта всего приспособления с торцевой поверхностью вкладышей МОПов и предотвращает осевое смещение элементов приспособления (см. рисунок 4).

С целью регистрации контролируемых параметров измерительным стержнем индикатора 1 при его наружном расположении на струбцинах 30 и 31 при помощи вилки 34 и оси 27 устанавливается измерительный мостик 24, на который с одной стороны опирается измерительный стержень индикатора, а с другой стороны мостик контактирует с контролируемой поверхностью вкладышей МОПов. Посередине между вилкой 34 и измерительным стержнем индикатора 1 устанавливается стягивающая пружина 35, обеспечивающая постоянный контакт измерительного мостика 24 с поверхностью вкладышей МОПов. Таким образом, при полном повороте измерительной головки вокруг оси вала 7 обеспечивается надежный контакт шарика 4 с торцом и измерительного мостика 24 с поверхностью вкладышей МОПов. Максимальное отклонение стрелки индикатора за один полный оборот измерительной головки покажет радиальное биение посадочной поверхности вкладышей.

Справа устанавливается измерительная головка, предназначенная для измерения отклонений от соосности внутренних цилиндрических посадочных поверхностей левого и правого МОПов. Она состоит из уголка 18, который соединяется с концом вала 17 посредством подвижного соединения типа «ласточкин хвост», а также установленном на уголке индикаторе 20 часового типа ИЧ 50-0,01 ГОСТ 577–68, затянутом при помощи фиксатора 32. Подвижный уголок 18 может перемещаться в радиальном направлении относительно вала 17, а фиксируется неподвижно фиксатором 19, что дает возможность настраивать приспособление на контроль МОПов, имеющих различные диаметры контролируемых посадочных поверхностей. Измерительный мостик 24 играет такую же роль, как и тот, что располагается слева, а возвратная пружина 25 позволяет контролировать постоянство нажима контактного наконечника мостика на контролируемую поверхность. Вилка 22, закрепленная на уголке винтами 21, имеет сквозные пазы овальной формы, в которых перемещается в вертикальном направлении серьга 26, фиксируемая в выбранном положении при помощи прижимной планки 23 и фиксатора 33, что позволяет повысить чувствительность измерения отклонений от соосности.

Измерение отклонений от соосности выполняется при полном обороте вала 17 с закрепленным уголком 18 и индикатором 20 вокруг оси неподвижного в момент измерения вала 7. Максимальная величина отклонений стрелки индикатора за один полный оборот, деленная пополам, покажет величину отклонения от соосности, приходящуюся на радиус контролируемой поверхности.

Допустимое отклонение от соосности вкладышей левого и правого МОПов было рассчитано в результате решения обратной задачи размерного анализа при построении измерительной размерной цепи для контроля несоосности МОПов ТЭД. Поскольку при любом измерении замыкающим звеном является измеренный размер или контролируемый параметр, в качестве замыкающего звена была определена величина контролируемого отклонения от соосности [12]. Далее, начиная от базовой оси 0-0 МОП и образующей  $0'-0'$  внутренней цилиндрической поверхности вкладыша МОПов, ограничивающих замыкающее звено  $A$  в точках 1-2, откладываются составляющие звенья размерной цепи  $A_1$  и  $A_2$ , непосредственно участвующие в решении поставленной задачи и представленные на рисунке 5.

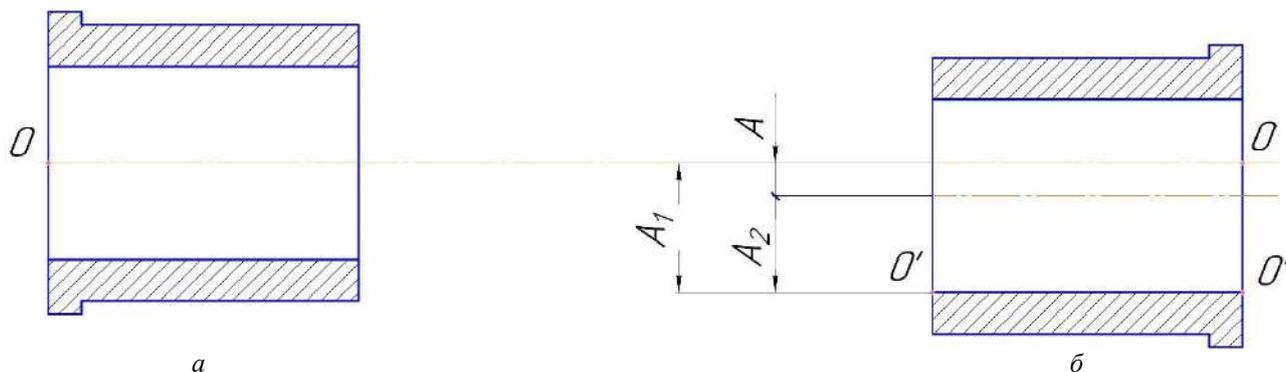


Рисунок 5 – Схема размерной цепи при определении величины несоосности МОПов

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На схеме (см. рисунок 5) показаны звенья рассматриваемой размерной цепи:  $A$  – замыкающее звено, т. е. контролируемый параметр (величина отклонения от соосности);  $A_1$  и  $A_2$  – составляющие звенья размерной цепи, из которых  $A_1$  является увеличивающим, а  $A_2$  – уменьшающим звеном.

Таким образом, порядок расчета рассматриваемой измерительной размерной цепи при решении обратной задачи заключается в следующем [7, 12].

1. Рассчитывается номинальный размер замыкающего звена:

$$A = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} A_i, \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, \dots, m$  – порядковый номер звена размерной цепи;

$\xi_{A_i}$  — передаточное отношение  $i$ -го звена размерной цепи;

$A_i$  – номинальный размер  $i$ -го составляющего звена размерной цепи.

Для линейных цепей с параллельными звеньями передаточные отношения таковы:

$\xi = 1$  – для увеличивающих составляющих звеньев;

$\xi = -1$  – для уменьшающих составляющих звеньев.

Номинальные размеры составляющих звеньев  $A_1$  и  $A_2$  одинаковы и при отсутствии отклонения от соосности равны половине диаметра внутренней посадочной поверхности вкладыша МОПа ТЭД модели ЭД118А и ЭД118Б тепловоза ТЭМ18ДМ, равного  $215,5^{+0,3}$  мм.

В результате номинальный размер замыкающего звена  $A$  при наилучших условиях обеспечения точности при изготовлении или ремонте

$$A = A_1 - A_2 = 107,75 - 107,75 = 0 \text{ мм.}$$

2. Рассчитывается координата середины поля допуска замыкающего звена:

$$\Delta_{0_A} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0_i}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{0_i}$  – координата середины поля допуска  $i$ -го звена размерной цепи,

$$\Delta_{0_i} = \frac{\Delta_{B_i} + \Delta_{H_i}}{2}, \quad (3)$$

где  $\Delta_{B_i}$  и  $\Delta_{H_i}$  – верхнее и нижнее отклонения  $i$ -го звена размерной цепи (для рассматриваемого размера  $A_1 = A_2 = 107,75^{+0,15}$  мм,  $\Delta_{B_i} = 0,15$  мм,  $\Delta_{H_i} = 0$  мм).

$$\Delta_{0_1} = \Delta_{0_2} = \frac{0,15 + 0}{2} = 0,075 \text{ мм.}$$

Тогда координата середины поля допуска замыкающего звена

$$\Delta_{0_A} = 1 \cdot 0,075 + (-1) \cdot 0,075 = 0 \text{ мм.}$$

Это означает, что допуск отклонения от соосности должен быть симметричным относительно номинального размера замыкающего звена  $A$ .

3. Рассчитывается величина поля допуска замыкающего звена: при расчете по способу максимума-минимума

$$T_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| T_i. \quad (4)$$

Тогда величина поля допуска замыкающего звена

$$T_{\Delta_1} = |1| \cdot 0,3 + |-1| \cdot 0,3 = 0,6 \text{ мм},$$

где  $T_i$  – допуск номинального размера  $i$ -го звена размерной цепи.

Способ расчета на максимум-минимум – способ расчета, учитывающий только предельные отклонения звеньев размерной цепи и самые неблагоприятные их сочетания; при расчете по вероятностному способу

$$T_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 T_i^2}, \quad (5)$$

где  $t_{\Delta}$  – коэффициент риска, характеризующий вероятность выхода отклонений замыкающего звена за пределы допуска, выбирается из таблиц значений функции Лапласа  $\Phi(t)$  в зависимости от принятого процента риска  $P$  (при риске  $P = 5\%$  коэффициент риска составляет 2);

$\lambda_i^2 = \frac{1}{9}$  – коэффициент для нормального закона распределения отклонений.

Тогда величина поля допуска замыкающего звена

$$T_{\Delta_2} = 2 \cdot \sqrt{(1^2 \cdot \frac{1}{9} \cdot 0,3^2) + ((-1)^2 \cdot \frac{1}{9} \cdot 0,3^2)} = 0,283 \text{ мм}.$$

Вероятностный способ расчета – способ расчета, учитывающий рассеяние размеров и вероятность различных сочетаний отклонений составляющих звеньев размерной цепи.

4. Рассчитываются предельные отклонения поля допуска замыкающего звена по следующим формулам:

$$\begin{cases} \Delta_{\text{в}\Delta} = \Delta_{0\Delta} + \frac{T_{\Delta}}{2}; \\ \Delta_{\text{н}\Delta} = \Delta_{0\Delta} - \frac{T_{\Delta}}{2}. \end{cases} \quad (6)$$

Тогда величина предельных отклонений поля допуска замыкающего звена при расчете по способу максимума-минимума составит:

$$\Delta_{\text{в}\Delta} = 0 + \frac{0,6}{2} = 0,3 \text{ мм}, \quad \Delta_{\text{н}\Delta} = 0 - \frac{0,6}{2} = -0,3 \text{ мм}.$$

Величина предельных отклонений поля допуска замыкающего звена при расчете по вероятностному способу составит:

$$\Delta_{\text{в}\Delta} = 0 + \frac{0,283}{2} = 0,1415 \approx 0,14 \text{ мм}; \quad \Delta_{\text{н}\Delta} = 0 - \frac{0,283}{2} = -0,1415 \approx -0,14 \text{ мм}.$$

Таким образом, при расчете по способу максимума-минимума предельная величина отклонений от соосности в радиальном направлении по обе стороны от оси симметрии вкладышей МОПов составит 0,3 мм, а при расчете по вероятностному способу – 0,14 мм.

Обосновав и подытожив результаты проведенных исследований, можно сделать выводы.

1) Установлено, что несоосность и радиальное биение вкладышей моторно-осевых подшипников ТЭД локомотива и наличие радиальных зазоров в сопряжениях поверхностей подшипников и осей ведет к нарушению работы деталей зубчатого редуктора, способствует неравномерному износу и повышению интенсивности изнашивания в узлах трения.

2) Разработана методика, позволяющая за один установ в соответствии с разработанной схемой базирования и контроля выполнить измерение радиального биения и несоосности как моторно-осевых горловин, так и рабочих поверхностей вкладышей моторно-осевых подшипников, изготовленных из бронзы или из латуни с баббитовым слоем.

3) Спроектировано контрольное приспособление, предназначенное для измерения несоосности и радиального биения вкладышей МОПов в условиях производстве при ремонте.

4) Методами размерного анализа рассчитана допустимая величина отклонения положения осей левого и правого вкладышей МОПов, равная 0,14 мм и определенная с учетом величины допуска на диаметр  $215,5^{+0,3}$  мм внутренней посадочной поверхности МОПов для электродвигателя ЭД118А тепловоза ТЭМ18ДМ.

### Список литературы

1. Зобов, Г. М. Преимущества внедрения моторно-осевых подшипников качения / Г. М. Зобов. – Текст : непосредственный // Техника железных дорог. – 2014. – № 1 (25). – С. 37–46.

2. Мальцева, Е. А. Восстановление моторно-осевого подшипника локомотива в СЛД Северобайкальск / Е. А. Мальцева, А. В. Карпов. – Текст : непосредственный, электронный // Молодой ученый. – 2018. – № 10 (196). – С. 34–37. – URL: <https://moluch.ru/archive/196/48712/> (дата обращения: 30.11.2021).

3. Долгова, А. В. К вопросу о совершенствовании технологии ремонта тяговых электродвигателей локомотивов / А. В. Долгова, П. К. Шкодун. – Текст : непосредственный, электронный // Молодой ученый. – 2010. – № 1-2. – Т. 1. – С. 51–54. – URL <https://moluch.ru/archive/13/1064/> (дата обращения: 30.11.2021).

4. Анализ качества изделия транспортного машиностроения : учебное пособие / И. А. Иванов, С. В. Урушев, Д. П. Кононов [и др.]. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения императора Александра I, 2018. – 74 с. – Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/138100> (дата обращения: 30.11.2021).

5. Технические измерения: учебное пособие / А. Ф. Богданов, А. А. Воробьев, И. А. Иванов, В. Г. Кондратенко. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения императора Александра I, 2017. – 145 с. – Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/101579> (дата обращения: 30.11.2021).

6. ГОСТ 28187–89. Основные нормы взаимозаменяемости. Отклонения формы и расположения поверхностей. Общие требования к методам измерений. – Москва : Издательство стандартов, 1989. – 19 с. – Текст : непосредственный.

7. ГОСТ Р 8.563–2009. Государственная система измерений (ГСИ). Методики (методы) измерений. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 15 с. – Текст : непосредственный.

8. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник / под ред. И. А. Иванова, С. В. Урушева. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 356 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/113911> (дата обращения: 30.11.2021).

9. Обработка результатов многократных измерений : методические указания / составители Т. А. Белишкина, А. Г. Вяткин. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения императора Александра I, 2017. – 23 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/111767> (дата обращения: 30.11.2021).

10. Перемитина, Т. О. Метрология, стандартизация и сертификация : учебное пособие / Т. О. Перемитина. – Томск : Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 150 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/110248> (дата обращения: 30.11.2021).

11. Литвинова, Ю. А. Общая теория измерений: учебное пособие / Ю. А. Литвинова, Ю. И. Макаров, Э. Ю. Чистяков. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения императора Александра I, 2017. – 49 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/93806> (дата обращения: 30.11.2021).

12. РД 50-635-87. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых размерных цепей : методические указания. – Москва : Издательство стандартов, 1987. – 44 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. Zobov G. M. Advantages of the introduction of motor-axial rolling bearings [Preimushchestva vnedreniia motorno-osevykh podshipnikov kacheniiia]. *Tekhnika zheleznykh dorog – Railway equipment*, 2014, no. 1 (25), pp. 37 – 46.

2. Mal'tseva E. A., Karpov A. V. Restoration of the engine-axial bearing of the locomotive in the Severobaikalsk SLD [Vosstanovlenie motorno-osevogo podshipnika lokomotiva v SLD Severobaikal'sk]. *Molodoi uchenyi – Young scientist*, 2018, no. 10 (196), pp. 34 – 37, available at: <https://moluch.ru/archive/196/48712/> (accessed 30 November 2021).

3. Dolgova A. V., Shkodun P. K. On the issue of improving the technology of repair of traction electric motors of locomotives [K voprosu o sovershenstvovanii tekhnologii remonta tiagovykh elektrodvigatelei lokomotivov]. *Molodoi uchenyi – Young scientist*, 2010, no. 1-2, vol. 1, pp. 51 – 54, available at: <https://moluch.ru/archive/13/1064/> (accessed 30 November 2021).

4. Ivanov I. A., Urushev S. V., Kononov D. P. [and others]. *Analiz kachestva izdeliia transportnogo mashinostroeniia : uchebnoe posobie* (Analysis of the quality of a transport engineering product : a textbook). Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 2018, 74 p.

5. Bogdanov A. F., Vorob'ev A. A., Ivanov I. A., Kondratenko V. G. *Tekhnicheskie izmereniia: uchebnoe posobie* (Technical measurements: tutorial). Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 2017, 145 p., available at: <https://e.lanbook.com/book/101579> (accessed 30 November 2021).

6. *Osnovnye normy vzaimozameniaemosti. Otkloneniia formy i raspolozheniia poverkhnosti. Obshchie trebovaniia k metodam izmerenii, GOST 28187–89* (Basic rules of interchangeability. Deviations in the shape and location of surfaces. General requirements for measurement methods, GOST 28187-89). Moscow, Publishing House of Standards, 1989, 19 p.

7. *Gosudarstvennaia sistema izmerenii (GSI). Metodiki (metody) izmerenii, GOST R 8.563–2009* (State Measurement System (GSI). Measurement techniques (methods), National Standart 8.563-2009). Moscow, Standartinform, 2019, 15 p.

8. Ivanova I. A., Urushev S. V. ed. *Metrologiia, standartizatsiia i sertifikatsiia: uchebnik* (Metrology, standardization and certification: textbook). Saint Petersburg: Lan' Publ., 2019, 356 p., available at: <https://e.lanbook.com/book/113911> (accessed 30 November 2021).

9. Belishkina T. A., Viatkin A. G. ed. *Obrabotka rezul'tatov mnogokratnykh izmerenii : metodicheskie ukazaniia* (Processing of the results of multiple measurements : guidelines). Saint Petersburg: Lan' Publ., 2017, 23 p., available at: <https://e.lanbook.com/book/111767> (accessed 30 November 2021).

10. Peremitina T. O. *Metrologiia, standartizatsiia i sertifikatsiia : uchebnoe posobie* (Metrology, standardization and certification : textbook). Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2016, 150 p., available at: <https://e.lanbook.com/book/110248> (accessed 30 November 2021).

11. Litvinova Iu. A., Makarov Iu. I., Chistiakov E. Iu. *Obshchaia teoriia izmerenii: uchebnoe posobie* (General measurement theory: a textbook). Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 2017, 49 p., available at: <https://e.lanbook.com/book/93806> (accessed 30 November 2021).

12. *RD 50-635-87. Tsepi razmernye. Osnovnye poniatiiia. Metody rascheta lineinykh i uglovykh razmernykh tsepei : metodicheskie ukazaniia* (RD 50-635-87. The chains are dimensional. Basic concepts. Methods for calculating linear and angular dimensional circuits : guidelines). Moscow, Publishing House of Standards, 1987, 44 p.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Муравьев Дмитрий Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mdvomsk@yandex.ru

### Супчинский Олег Павлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: sunchinyan@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Муравьев, Д. В. Методика контроля соосности и радиального биения вкладышей моторно-осевых подшипников тяговых электродвигателей локомотивов / Д. В. Муравьев, О. П. Супчинский. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47) – С. 78 – 89.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Muraviev Dmitry Valerievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technologies of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mdvomsk@yandex.ru

### Supchinsky Oleg Pavlovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technologies of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: sunchinyan@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Muraviev D. V., Supchinsky O. P. Technique for monitoring the alignment and radial beating inserts of motor-axle bearings of traction electric motors of locomotives. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 3 (47), pp. 78 – 89.

УДК 625.032.37

## А. В. Обрывалин, М. И. Бисерикан, И. И. Галиев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСА ПРИ ЕГО КРАТКОВРЕМЕННОМ ДВИЖЕНИИ ПО РЕЛЬСУ ЮЗОМ

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос образования на поверхности катания вагонных колес при их движении по рельсу юзом дефектов термомеханического происхождения (ползунов), так как такого рода дефекты в большей степени влияют на безопасность движения. Кроме того, такие дефекты на поверхности катания колеса трудно устранимы в ремонтном производстве. Известно, что ползун образуется при заклинивании колеса и его поступательном движении (скольжении) по рельсу, так называемом юзе. В результате этого в области контакта колеса и рельса наблюдается интенсивное изнашивание материала колеса как более мягкого элемента, при этом образуется площадка износа (ползун). Ползун оценивается таким параметром, как его глубина относительно поверхности катания колеса. Приведен алгоритм расчета глубины ползуна при условии кратковременного движения колеса по рельсу юзом. Определены исходные данные и выполнен расчет с построением графиков, отражающих зависимость глубины ползуны от скорости движения подвижного состава и нагрузки на ось колесной пары при кратковременном юзе. Описана методика расчета максимальных температур в паре трения скольжения «колесо – рельс». Рассчитаны значения максимальных температур в пятне контакта при движении колеса по рельсу юзом. По результатам расчетов построены графики изменения максимальных температур на поверхности катания колеса в области трения о рельс при различных условиях эксплуатации. Дана оценка возможности косвенного определения глубины упрочненного слоя металла в области ползуна в зависимости от его размеров, измеренных при поступлении колесной пары в ремонт.

**Ключевые слова:** вагонное колесо, рельс, движение юзом, трение, износ, ползун, максимальная температура.

Aleksey V. Obryvalin, Mikhail I. Biserikan, Ikham I. Galiev

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## DETERMINATION OF THE MAXIMUM TEMPERATURE ON THE ROLLING SURFACE OF THE WHEEL WITH ITS SHORT-TERM MOVEMENT ON THE RAIL SWITCH

**Abstract.** The article deals with the issue of the formation of defects of thermomechanical origin (sliders) on the rolling surface of wagon wheels during their skidding along the rail, since such defects affect traffic safety to a greater extent. In addition, such defects on the tread surface of the wheel are difficult to eliminate in the repair industry. It is known that the slider is formed when the wheel is jammed and its translational movement (sliding) along the rail, the so-called skid. As a result, in the area of contact between the wheel and the rail, intensive wear of the wheel material is observed, as a softer element, and a wear area (slider) is formed. The slider is evaluated by such a parameter as the depth relative to the wheel tread. An algorithm for calculating the depth of the slider is given under the condition of a short-term movement of the wheel along the rail skidding. The initial data were determined and a calculation was made with the construction of graphs that reflect the dependence of the slider depth on the speed of the rolling stock and the load on the axle of the wheelset during short-term skidding. A technique for calculating the maximum temperatures in a pair of sliding friction "wheel-rail" is described. The values of the maximum temperatures in the contact patch are calculated when the wheel moves along the rail skidding. Based on the results of the calculations, graphs of changes in the maximum temperatures on the wheel tread surface in the area of friction on the rail under various operating conditions were plotted. An assessment is made of the possibility of indirect determination of the depth of the hardened metal layer in the area of the slider, depending on its dimensions, measured when the wheelset was received for repair.

**Keywords:** wagon wheel, rail, skidding, friction, wear, slider, maximum temperature.

В эксплуатации колесные пары подвергаются различного рода повреждениям, которые можно разделить на две группы: не устранимые (браковочные) и устранимые в ремонтном производстве. В свою очередь устранимые дефекты делятся на износы (равномерный и неравномерный прокат профиля катания колеса, вертикальный подрез гребня, тонкий гребень и т. п.) и повреждения (ползуны, выщербины, навары и т. п.) [1, 2].

В данной работе внимание будет уделено такому дефекту, как ползун. Известно, что ползун – это локальная изношенная площадка на поверхности катания колеса, которая образуется из-за его заклинивания и движения по рельсу юзом. Эксплуатация колесных пар с ползунами сопровождается ударными нагрузками о головку рельса, что приводит к повешенному их износу, а также возникает вероятность развития трещин и полного разрушения конструкций. В ремонтном производстве наличие ползуна на колесе значительно усложняет процесс механической обработки его профиля катания, так как металл в области ползуна упрочнен [2 – 4]. В связи с этим возникает интерес к процессу изнашивания металла колеса при его скольжении по рельсу, а именно интенсивности износа при различных условиях эксплуатации и температуре в пятне контакта, которая оказывает влияние на структуру металла, а соответственно и механические свойства.

Ползун количественно оценивается глубиной, которая определяется разностью измерений износа в двух местах – ползуне и рядом с ним. Выполним расчет глубины ползуна по формуле [6]

$$h = \frac{k_{\text{и}} \cdot L \cdot N}{S_{\text{к}} \cdot \rho}, \quad (1)$$

где  $h$  – глубина ползуна, м;

$k_{\text{и}}$  – коэффициент износа ( $k_{\text{и}} = 1,9 \cdot 10^{-6}$  г/Н · м) [9];

$L$  – путь скольжения, м;

$N$  – нагрузка на колесо, Н;

$S_{\text{к}}$  – площадь контакта колеса с рельсом, м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность стали ( $\rho = 7,86 \cdot 10^6$  г/м<sup>3</sup>).

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Решая выражение (1) численным методом, определим изменение глубины ползуна на колесе при его движении по рельсу юзом в интервале 10 с. Алгоритм выполнения расчета сводится к тому, что от 0 до 1 с скольжения колеса по рельсу начальная площадь контакта рассчитывается по известным формулам [11] и подставляется в выражение (1), что позволяет определить глубину образовавшейся площадки износа за это время. Далее с применением САПР «КОМПАС» путем 3D-моделирования определяется площадь той самой образовавшейся площадки износа, которая подставляется в расчеты при определении очередной глубины ползуна от 1 до 2 с, и таким образом выполняется расчет до 10-й с.

Расчеты выполнялись для следующих условий:

- 1) скорость движения поезда постоянна и составляет 5 км/ч, нагрузка на ось колесной пары 20 тс;
- 2) скорость движения поезда постоянна и составляет 40 км/ч, нагрузка на ось колесной пары 20 тс.

По результатам расчетов построены графики, отражающие интенсивность изнашивания металла колеса при его движении юзом по рельсу (рисунок 1).

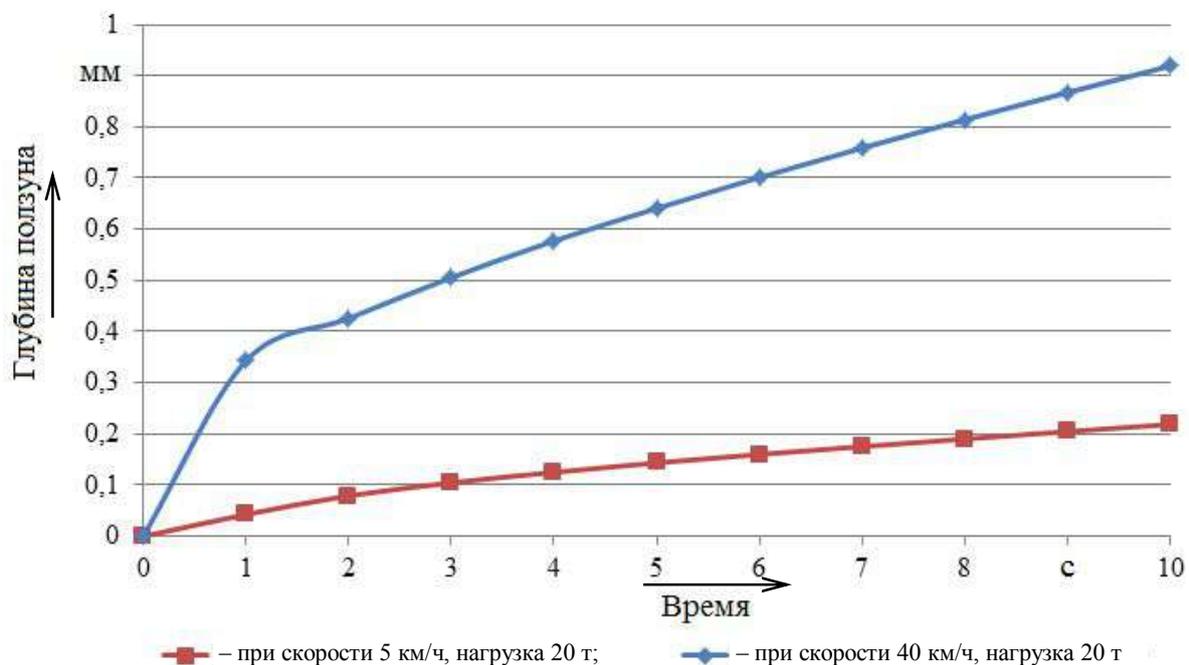


Рисунок 1 – Результаты расчета глубины ползуна

Из приведенных графиков видно, что скорость скольжения колеса по рельсу и нагрузка на ось играют существенную роль в процессе образования дефекта. Так, при движении поезда со скоростью 5 км/ч и кратковременном юзе в течение 10 с формируется ползун глубиной 0,2 мм, а при той же нагрузке и скорости 40 км/ч ползун уже достигает глубины более 0,9 мм, т. е. величины, близкой к браковочной.

Рассмотрим варианты образования дефекта в условиях равнозамедленного и равноускоренного движения поезда с равным по времени ускорением  $a = 0,2 \text{ м/с}^2$ . Результаты расчета представлены на графиках рисунка 2, из которых видно, что за 10 с движения колеса по рельсу юзом формируется ползун глубиной более 0,7 мм.

Образование ползуна сопровождается не только изнашиванием металла, но и интенсивным его разогревом. Далее определим для указанных выше условий максимальную температуру в пятне контакта пары трения «колесо – рельс».

Максимальная температура в зоне трения колеса грузового вагона с рельсом определяется по выражению [8, 10]

$$\theta_{\max} = \theta_V + \theta_{\text{пов}} + \theta_{\text{всп}}, \quad (2)$$

где  $\theta_{\max}$  – суммарная температура в контакте, °С;

$\theta_V$  – объемная температура, °С;

$\theta_{\text{пов}}$  – поверхностная температура, °С;

$\theta_{\text{всп}}$  – температура вспышки, °С;

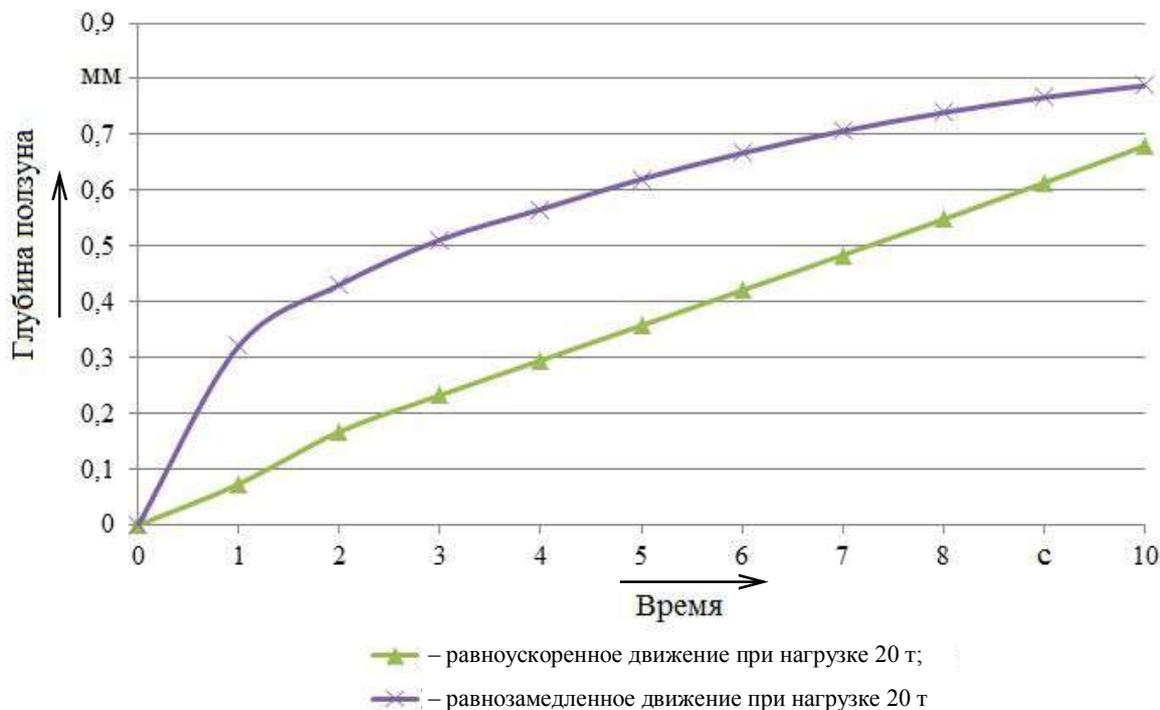


Рисунок 2 – Результаты расчета глубины ползуна при равноускоренном и равнозамедленном движении грузового поезда

Объемная температура рассчитывается по формуле [10]

$$\theta_V = \frac{(1 - \alpha_t) \cdot W_t}{S_k \cdot \rho \cdot c \cdot b \cdot t_t}, \quad (3)$$

где  $\alpha_t$  – коэффициент распределения тепловых потоков между элементами пары трения;

$W_t$  – полная работа трения за время движения колеса юзом, Дж;

$S_k$  – номинальная площадь контакта, м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность материала ( $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>);

$c$  – удельная теплоемкость ( $c = 503$  Дж/(кг · град));

$b$  – толщина рассматриваемого элемента пары трения, м;

$t_t$  – время трения, с.

Полная работа сил трения за время движения колеса юзом рассчитывается по формуле

$$W_t = f \cdot N \cdot L, \quad (4)$$

где  $f$  – коэффициент трения ( $f = 0,24$ );

$N$  – нагрузка на колесо, Н;

$L$  – путь скольжения, м.

Коэффициент распределения тепловых потоков рассчитывается по формуле [10]

$$(1 - \alpha_r) = \frac{1}{1 + \frac{b_2 c_2}{b_1 c_1} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}}, \quad (5)$$

где  $a_1, a_2$  – коэффициенты температуропроводности колеса и рельса (так как физические свойства колеса и рельса приблизительно равны, то  $a_1 \approx a_2 = 17,65 \cdot 10^{-6}$  град  $\cdot$  м<sup>2</sup>/с);

$b_1$  – размер пары трения в направлении теплового потока (высота рельса 0,18 м);

$b_2$  – диаметр колеса (0,95 м);

$c_1, c_2$  – удельная теплоемкость колеса и рельса.

Поверхностная температура определяется так [10]:

$$\theta_{\text{пов}} = \frac{(1 - \alpha_r) \cdot W_T \cdot b_3}{\lambda \cdot t_T \cdot S_K} \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot \tau_N + \frac{1}{3} \cdot \tau_W \right), \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности ( $\lambda = 57,7$  Вт/(м  $\cdot$  град));

$S_K$  – номинальная площадь контакта, м<sup>2</sup>;

$\tau_N, \tau_W$  – безразмерные параметры работы и мощности трения:

$$\tau_N = \frac{(0,5\tau)^2}{3}; \quad (7)$$

$$\tau_W = (0,5\tau)^3, \quad (8)$$

$\tau$  – безразмерный коэффициент времени трения скольжения:

$$\tau = \frac{t}{t_T}, \quad (9)$$

$t$  – время трения, с;

$b_3$  – эффективная толщина материала, участвующего в теплопоглощении, которую можно вычислить так:

$$b_3 = 1,73 \sqrt{a \cdot t_T}. \quad (10)$$

Температура вспышки определяется по формуле [10]

$$\theta_{\text{всп}} = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{W_T \cdot \tau_N \cdot b_3 \cdot \sqrt{a}}{S_K \cdot t_T \cdot (4 \cdot \lambda \cdot \sqrt{a} + \lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot b_3 \cdot V_{\text{ск}}})}, \quad (11)$$

где  $V_{\text{ск}}$  – скорость скольжения, м/с.

По результатам расчетов построены графики изменения максимальных температур в пятне контакта пары трения «колесо – рельс» (рисунки 3 и 4).

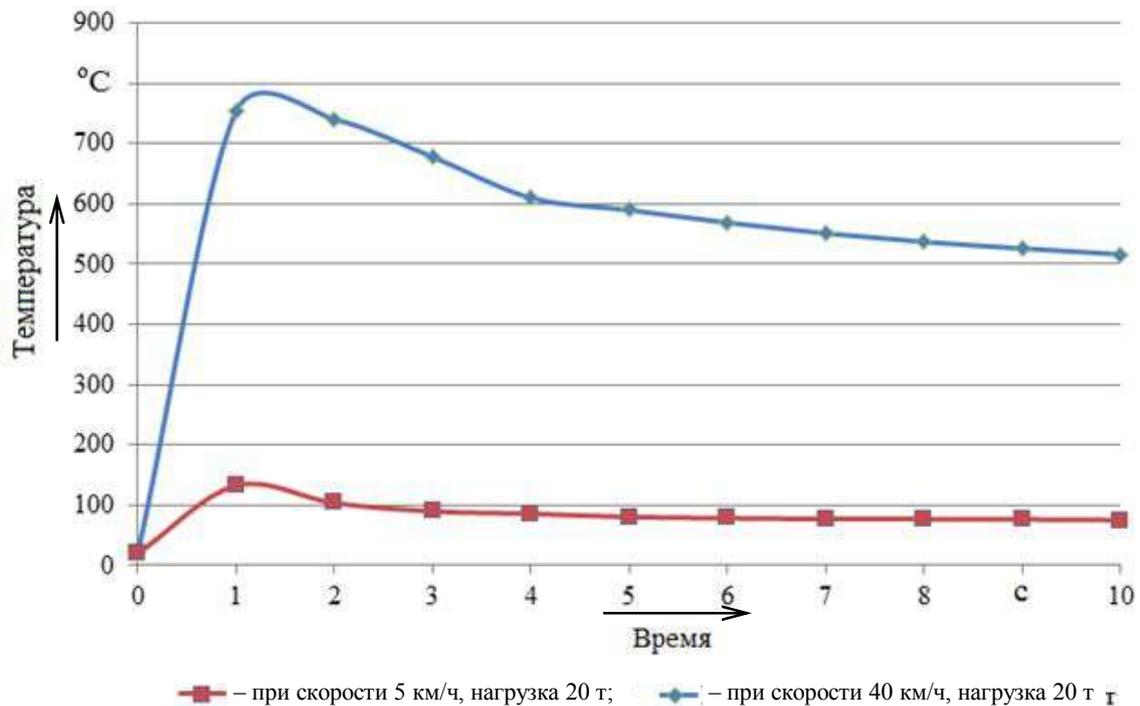


Рисунок 3 – Результаты расчета температур при скольжении колеса по рельсу юзом с различной скоростью при нагрузке на ось 20 т

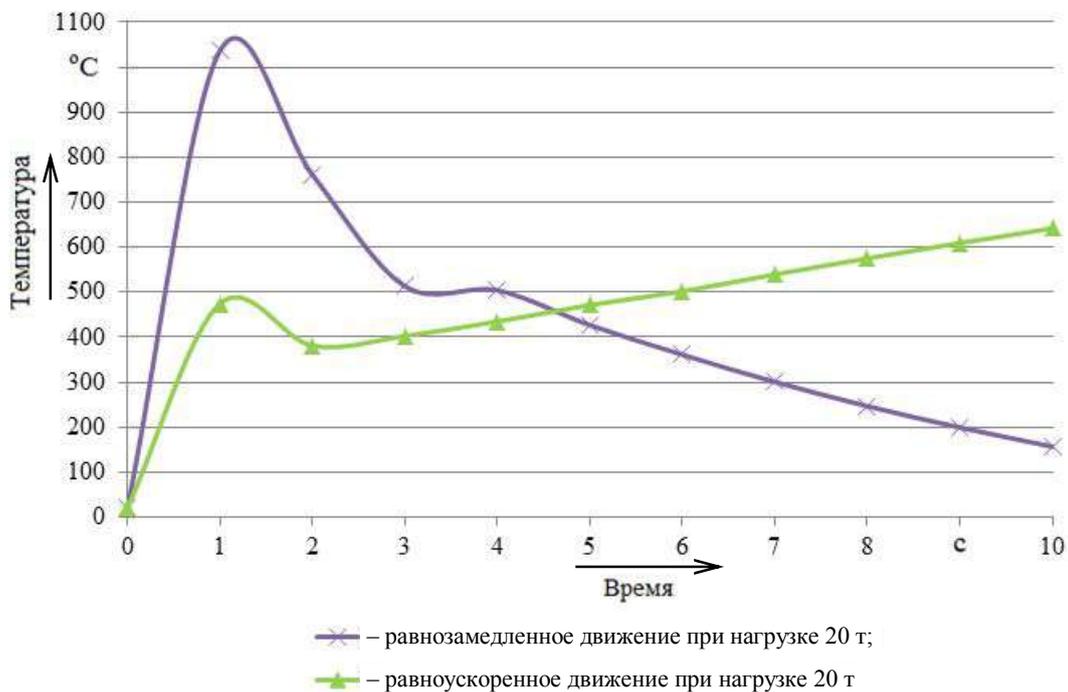


Рисунок 4 – Результаты расчета температур при равноускоренном и равнозамедленном движении грузового поезда

Во всех случаях в начальный момент трения наблюдается резкий рост температуры, связанный с интенсивным износом металла, а соответственно и тепловыделением. При скорости движения поезда 5 км/ч и нагрузке на ось колесной пары 20 тс температура не превышает 150 °С на поверхности трения, при скорости 40 км/ч в первую секунду наблюдается резкий рост температуры до 790 °С, а далее до десятой секунды происходит плавное снижение температуры до 500 °С. Если заклинивание колесной пары произошло при торможении поезда,

двигающегося со скоростью 40 км/ч, наблюдается также в первые секунды резкий скачок температуры 980 °С. При равноускоренном движении, когда колесная пара находится в заклиненном состоянии, наблюдается также резкое увеличение температуры до 490 °С, затем наблюдается некоторое снижение ее за счет теплоотдачи, со второй секунды она начинает расти и к 10-й секунде становится более 600 °С.

Исходя из полученных данных следует, что если движение колеса по рельсу юзом происходит при скорости более 40 км/ч максимальные температуры в пятне контакта пары трения «колесо – рельс» достигают значений выше 727 °С, т. е. выше критических, при которых в материале начинают происходить структурные изменения. Ввиду того, что при выходе из юза будет происходить интенсивный теплоотвод в металл колеса и окружающую среду в тех слоях, где были структурные превращения, образуется закалочная структура (упрочненный слой материала). При меньшей скорости движения температура достигает при кратковременном юзе значений от 150 до 600 °С. В этом случае не возникает структурных изменений в металле, но данная температура является температурой отпуска и высока вероятность того, что произойдет снижение твердости металла в области площадки износа.

Полученные результаты показывают, что даже при кратковременном юзе формируется ползун, размеры которого близки к браковочным размерам. При кратковременном юзе температура в паре трения «колесо – рельс» достигает значений более 727 °С, т. е. температуры при которой начинают происходить структурные изменения в металле. Кроме этого, из расчетов видно, что если подклинивание колеса произошло в период торможения поезда до полной его остановки, то сформируется ползун размером 0,7 – 0,9 мм. Статистические данные ремонтных предприятий говорят о том, что более 70 % колесных пар, поступающих в ремонт с ползунами, имеют их размеры, а именно глубину от 1,5 до 2,5 мм. В связи с этим можно высказать предположение, что ползуны в основном образуются в случае, когда состав начинает свое движение, а тормозные колодки не отжались от колеса. Если заклинивание произошло в период остановки поезда (без применения экстренного торможения), ползуны будут иметь размеры от 0,7 до 1,2 мм. Известно также, что ползуны образуются при сортировке вагонов на немеханизированных горках с применением технологий регулирования скорости движения тормозными башмаками. Из полученных результатов следует, что в этом случае на поверхности катания колеса образуется ползун глубиной не более 1 мм, но при его образовании в паре трения «колесо – рельс» температура достигает значений 980 °С, затем происходит резкое охлаждение, что приводит к образованию закалочных структур. Особенно к этому склонны колесные пары с колесами, изготовленными из стали марки «Т» по ГОСТ 10791–2011, которая отличается высоким содержанием углерода и марганца. При дальнейшей эксплуатации таких колес упрочненный участок выкрашивается и образуется выщербина, которая постепенно увеличивается в своих размерах до момента ее обнаружения на пункте технического обслуживания составов грузовых поездов.

Дальнейшие исследования в этой области нацелены на решение следующих задач: разработки математической модели для определения величины упрочненного слоя металла колеса в области ползуна с целью оптимизации режимов резания для механической обработки; разработка новой легированной колесной стали со свойствами, обеспечивающими стойкость металла не только к износам, но и образованию закалочных структур.

### *Список литературы*

1. Обрывалин, А. В. Восстановление профиля катания вагонных колес повышенной твердости с эксплуатационными дефектами термомеханического происхождения / А. В. Обрывалин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2012. – № 4 (12). – С. 30–35.

2. Обрывалин, А. В. Разработка мероприятий по повышению качества ремонта вагонных колес / А. В. Обрывалин. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии

машиностроительных производств : материалы всероссийской научно-технической конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 116–121.

3. Бисерикан, М. И. Совершенствование технологии обточки колес подвижного состава с усталостными дефектами / М. И. Бисерикан, Ю. А. Иванова, В. В. Иванов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2012. – № 2 (110). – С. 120–124.

4. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар / В. С. Кушнер, А. А. Крутько [и др.]. – Омск : Омский гос. техн. ун-т, 2015. – 224 с. – Текст : непосредственный

5. Евсеев, Д. Д. Прогнозирование дефектов поверхности катания колесных пар для восстановительных работ / Д. Д. Евсеев, А. С. Тарапанов. – Текст : непосредственный // Наука и технологии. – 2005. – № 10. – С. 25–27.

6. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – Москва : Машиностроение, 1968. – 480 с. – Текст : непосредственный.

7. Воробьев, А. А. Моделирование процесса обработки колесных пар повышенной твердости / А. А. Воробьев, П. М. Терехов. – Текст : непосредственный. // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2010. – № 12. – С. 19–26.

8. Основы трибологии : учебник / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше [и др.]. – Москва : Машиностроение, 2001. – 664 с. – Текст : непосредственный.

9. Саидова, А. В. Уточнение некоторых параметров модели изнашивания колес грузового вагона / А. В. Саидова, А. М. Орлова. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 1 (34). – С. 147–151.

10. Озябкин, А. Л. Динамический мониторинг триботермодинамики фрикционных мобильных систем / А. Л. Озябкин. – Текст : непосредственный // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11. – № 5 (56). – С. 644–654.

11. Ткаченко, В. П. Кинематическое сопротивление движению рельсовых экипажей / В. П. Ткаченко. – Луганск : Восточно-украинский государственный университет, 1996. – 200 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. Obryvalin A. V. Restoring the rolling profile of wagon wheels of increased hardness with operational defects of thermomechanical origin [Vosstanovleniye profilya kataniya vagonnykh koles povyshennoy tverdosti s ekspluatatsionnymi defektami termomekhanicheskogo proiskhozhdeniya]. *Izvestia Transsib – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 4 (12), pp. 30 – 35.

2. Obryvalin A. V. Development of measures to improve the quality of repair of wagon wheels [Razrabotka meropriyatiy po povysheniyu kachestva remonta vagonnykh koles]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii mashinostroitel'nykh proizvodstv : materialy vse-rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (Innovative projects and technologies of machine-building production: Materials of the second all-Russian scientific and technical conference). – Омск: OmGUPS, 2017. – P. 116 – 121.

3. Biserikan M. I., Ivanova Yu. A., Ivanov V. V. Improvement of technology for turning wheels of rolling stock with fatigue defects [Sovershenstvovaniye tekhnologii obtochki kolesnogo sostava s ustalostnymi defektami]. *Omskiy Nauchnyy Vestnik – The Journal Omsk Scientific Bulletin*, 2012, no. 2 (110), pp. 120 – 124.

4. Kushner V. S., Krutko A. A., Vorobiev A. A., Gubenko S. I., Ivanov I. A., Kerentsev D. E. *Vliyaniye struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivaniye i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par* [Influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on wear and modes of restoration of the profile of wheel pairs]. Омск: Publishing house of OmSTU, 2015, 224 p.

5. Evseev D. D., Tarapanov A. S. Forecasting of defects in the rolling surface of wheel pairs for restoration work [Prognozirovaniye defektov poverkhnosti kataniya kolesnykh par dlya vosstanovitel'nykh rabot]. *Nauka i tekhnologii – Science and technology*, 2005, no. 10, pp. 25 – 27.

6. Kragelsky I. V. *Treniye i iznos* (Friction and wear). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968, 480 p.

7. Vorobiev A. A., Terekhov P. M. Simulation of the processing of wheelsets of increased hardness [Modelirovaniye protsessa obrabotki kolesnykh par povyshennoy tverdosti]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii – New materials and technologies in mechanical engineering*, 2010, no. 12, pp. 19 – 26.

8. Chichinadze A. V., Brown E. D., Boucher N. A. and others. *Osnovy tribologii: uchebnik* (Fundamentals of tribology: textbook). Moscow: Mashinostroenie Publ., 2001, 664 p.

9. Saidova A. V., Orlova A. M. Specification of some parameters of the wear model for the wheels of a freight car [Utochnenie nekotorykh parametrov modeli iznashivaniya koles gruzovogo vagona]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – News Petersburg State University of Railway Transport*, 2013, no. 1 (34), pp. 147 – 151.

10. Ozyabkin A. L. Dynamic monitoring of tribothermodynamics of frictional mobile systems [Dinamicheskij monitoring tribotermodinamiki frikcionnykh mobil'nykh sistem]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Don State Technical University*, 2011, vol. 11, no. 5 (56), pp. 644 – 654.

11. Tkachenko V. P. *Kinematicheskoe soprotivlenie dvizheniyu rel'sovyh ekipazhej* (Kinematic resistance to the movement of rail vehicles). Lugansk: East Ukrainian State University Publ., 1996. 200 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Обрывалин Алексей Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: obryvalin\_av@mail.ru

### Бисерикан Михаил Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: radenxg@mail.ru

### Галиев Ильхам Исламович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, президент ОмГУПС, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика».

Тел.: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Обрывалин, А. В. Определение максимальной температуры на поверхности катания колеса при его кратковременном движении по рельсу юзом / А. В. Обрывалин, М. И. Бисерикан, И. И. Галиев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 89 – 97.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Obryvalin Aleksey Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: obryvalin\_av@mail.ru

### Biserikan Mikhail Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: radenxg@mail.ru

### Galiev Ilham Islamovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor Of Sciences in Engineering, Professor, president of OSTU, professor of the department «Theoretical and applied mechanics », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Obryvalin A. V., Biserikan M. I., Galiev I. I. Determination of the maximum temperature on the rolling surface of the wheel with its short-term movement on the rail switch. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 3 (47), pp. 89 – 97 (In Russian).

**Ш. С. Файзибаев, Э. С. Набиев, И. Ю. Соболева**

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

## **МНОГОСЛОЙНАЯ НАПЛАВКА ОБОДА КОЛЕСА ГРУЗОВОГО ВАГОНА**

**Аннотация.** Для кардинального решения вопроса продления срока службы колесных пар грузовых вагонов, предлагается наплавлять не только годные к эксплуатации колеса, но и колеса, подлежащие к распрессовке по недопустимой толщине обода. Показано, что при многослойной наплавке усложняется возможность получения высокого качества металла, а нагрев тонкого обода может оказать неблагоприятное влияние на расстояние между внутренними поверхностями колес.

Цель работы – оптимизировать технологические параметры режима многоэлектродной наплавки, определить величину коробления диска колеса и изучить качество наплавленного металла при эксплуатационных испытаниях колесных пар.

На оптимальных параметрах многоэлектродного процесса, выполнены опытные наплавки и предложена методика измерения величины коробления колеса в условиях многослойной наплавки. Представлены результаты исследований по влиянию многоэлектродного процесса наплавки на структуру металла и коробление колеса. Показано, что при оптимальном режиме наплавки создаются благоприятные условия для получения в околошовной зоне мелкозернистых структур.

Проведены ходовые испытания колесных пар грузовых вагонов для выявления эффективности и надежности метода автоматической многоэлектродной наплавки обода колеса. Задачей испытаний являлась сравнительная оценка сопротивляемости исследуемых колес дефектам и износу. Реализация поставленной задачи предусматривала получение для исследуемых колесных пар данных по количеству случаев выхода из эксплуатации колес по причине недостаточного качества металла наплавки.

Установлено, что коробление колеса не вызывает опасений, угрожающих безопасности движения, а металл наплавки имеет необходимую стойкость к растрескиванию под действием эксплуатационных нагрузок.

**Ключевые слова:** колесо грузового вагона, многослойная наплавка, многоэлектродная наплавка, микроструктура, коробление колеса.

**Sherzod S. Faizibaev, Elman S. Nabiev, Irina Yu. Soboleva**

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

## **MULTILAYER SURFACING OF A FREIGHT CAR WHEEL RIM**

**Abstract.** For a radical solution of the issue of extending the service life of wheelsets of the freight cars, it is proposed to weld not only serviceable wheels, but also wheels to be pressed against an unacceptable rim thickness. It is shown that in multilayer surfacing, the possibility of obtaining high quality metal becomes more difficult, and heating of a thin rim can have an adverse effect on the gap between the inner surfaces of the wheels.

The purpose of the work is to optimize the technological parameters of the multi-electrode surfacing mode, determine the amount of warpage of the wheel disk and study the quality of the deposited metal during operational tests of wheel sets.

Experimental surfacing was carried out on the optimal parameters of the multi-electrode process, and a method for measuring the value of wheel warping in conditions of multilayer surfacing was proposed. The results of studies on the influence of the multi-electrode surfacing process on the metal structure and wheel warping are presented. It is shown that under the optimal surfacing mode, favorable conditions are created for obtaining fine-grained structures in the near-seamed zone.

Field tests of the freight cars wheel sets were carried out to determine the efficiency and reliability of the method of automatic multi-electrode surfacing of the wheel rim. The task of the tests was a comparative assessment of the resistance of the wheels under study to defects and wear. The implementation of the task involved obtaining data for the wheel sets being researched on the number of cases of wheel failure due to the insufficient quality of the welded surfacing metal.

It was found that wheel warping does not cause any dangers that threaten traffic safety, and the weld metal has the necessary resistance to cracking under the action of operational loads.

**Keywords:** freight car wheel, multilayer surfacing, multi-electrode surfacing, microstructure, wheel warping

На вагоноремонтных предприятиях железнодорожного транспорта актуальной задачей является разработка технологии, которая позволяла бы не только повысить срок службы действующих колесных пар, но и вернуть в эксплуатацию колеса, отправленные в металлолом из-за тонкого обода. Решение данной задачи требует восстановления обода до ремонтных размеров нанесением на его поверхность металла толщиной до 10 мм, которое можно получить многослойной наплавкой. В настоящее время существуют различные технологические решения по восстановлению изношенных цельнокатаных колес методом дуговой наплавки под слоем флюса [1 – 5].

Однако известно [6], что при многослойной наплавке прерывистость между первым и последующими проходами способствует появлению в структуре металла шва слоистой неоднородности. Это связано с тем, что околошовная зона размещается не только в основном металле, но и в металле шва. И как указывается в работе [6], строение околошовной зоны в металле шва значительно отличается от строения на основном металле.

В то же время при продолжительном нагреве тонкого обода следует ожидать увеличения величины деформации колеса с каждым наплавляемым слоем. Исследования, выполненные во ВНИИЖТе, показали, что после двухэлектродной наплавки на поверхность обода металла толщиной 10 мм наблюдается изменение расстояния между внутренними гранями колес [7]. После многоэлектродной наплавки обода двумя слоями на режимах, представленных в работе [8], расхожимость колеса составила + 6,4 мм.

Настоящая работа посвящена изучению особенностей структурообразования и определению величины коробления колеса в условиях многоэлектродной трехслойной наплавки поверхности катания и гребня для разработки научно обоснованной технологии восстановления обода толщиной до 25 мм. При этом считали, что большая тепловая мощность многоэлектродного процесса и рассеянное тепловложение в основной металл колеса окажут благоприятное влияние на условия протекания термомодеформационного цикла, от которого зависит структурообразование в околошовной зоне (ОШЗ).

В работе использованы стандартные методики измерения твердости методом Бринелля и проведения металлографических исследований с применением металлографического микроскопа Nikon Eclipse LV 100D.

Исследования по выбору оптимального режима наплавки, по очередности и последовательности наложения валиков на поверхность обода колеса были проведены на лабораторной многоэлектродной установке.

Величину коробления колеса во время наплавки каждого слоя фиксировали с помощью двухканального потенциометрического датчика угловых перемещений.

Опытные наплавки вели электродной проволокой марки Св-10НМА диаметром 3 мм под слоем флюса марки АН-348А без предварительной механической обработки и предварительного подогрева колеса. Наилучшие результаты по устойчивости процесса наплавки и формированию валиков были получены при следующих режимах и последовательности (рисунок 1): первый валик (1) шириной 55 мм наносится на изношенную поверхность катания со стороны гребня колеса пятью электродными проволоками, расположенными фронтом при силе тока 1000 А и напряжении 30 В в горизонтальном положении колесной пары; второй валик (2) шириной 40 мм кладется со стороны фаски колеса с минимальным перекрытием 5 мм с первым четырьмя электродными проволоками на токе 800 А и напряжении 30 В; затем колесная пара устанавливается под углом 60 ° и наплавляется рабочая поверхность (3) гребня тремя электродными проволоками, расположенными под углом 45 ° относительно направления наплавки при силе тока 600 А и напряжении 32 В; последний валик (4) наносится на вершину гребня одной электродной проволокой в горизонтальном положении колесной пары при силе тока 300 А и напряжении 28 В.

Для определения величины коробления наплавляемого колеса использовали сварную ферму, которая являлась жестким основанием для размещения двухканального потенциометрического датчика угловых перемещений МУ-616 (ДУПа). Ферму вместе с ДУПом устанавливали между плоскостью вращения колеса и плоскостью планшайбы наплавочной установки, на которую крепилось колесо. Угловое перемещение оси ДУПа, на которой жестко был закреплен щуп, имеющий непрерывный механический контакт с задней поверхностью колеса, регистрировали оптическим осциллографом К10-51 на фотобумагу чувствительностью 600 ед. (рисунок 2).



Рисунок 1 – Последовательность наложения валиков 1 – 4 на поверхность обода колеса

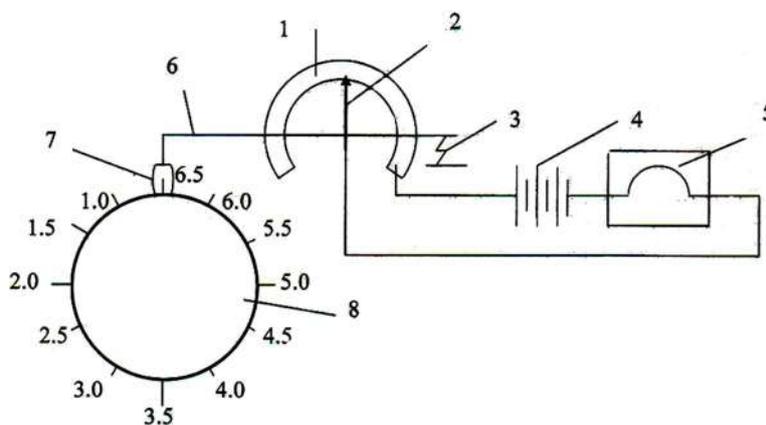


Рисунок 2 – Схема установки по регистрации коробления колеса: 1 – обмотка сопротивления датчика; 2 – скользящий контакт датчика; 3 – пружина сжатия; 4 – источник постоянного питания; 5 – оптический осциллограф К10-51; 6 – качалка; 7 – щуп; 8 – вагонное колесо

Величину коробления определяли как разность между отклонениями плоскости колеса в наплавленном и холодном состоянии. После фотообработки кривые, полученные с точностью до 0,25 мм, пересчитывали с помощью тарировочного графика в программе MS Excel с последующим выводом графиков отклонений. Для прослеживания динамики коробления колеса равномерно по диаметру обода колесо перед наплавкой условно разделили на шесть секторов по 60°, а для удобства подсчета каждый сектор разбили еще на две части с шагом 0,5 (см. рисунок 2). В результате для каждого наплавленного слоя было получено 12 значений отклонений, по которым строили график коробления колеса.

На рисунке 3 представлен образец обода вагонного колеса с трехслойной наплавочной поверхностью.

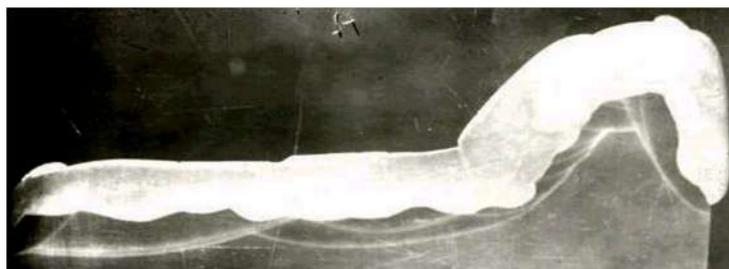


Рисунок 3 – Макроструктура образца обода с трехслойной наплавочной поверхностью

Макроструктурный анализ опытных колес показал, что наплавленные валики имеют хорошее формирование и относительно равномерную глубину проплавления. В местах сплавления с основным металлом и межслойных перекрытиях шлаковых включений обнаружено не было. В наплавленном металле кристаллизационные трещины отсутствовали. Ширина зоны термического влияния (ЗТВ) на поверхности катания в среднем составила 9 мм, а на гребне – 6 мм.

Металл наплавки первого слоя на поверхности катания колеса представляет собой мелкозернистую ферритно-перлитную структуру с твердостью НВ 242. По мере приближения к границе сплавления наблюдаются участки с укрупненными ферритными зёрнами (рисунок 4 (1)), которые образовались в результате двойного нагрева под действием зоны термического влияния второго слоя.

На границе сплавления (рисунок 4 (2)) металл имеет структуру мелкозернистого игольчатого феррита с перлитом со средней твердостью НВ 269. Согласно работе [9] металл, имеющий мелкозернистую структуру игольчатого феррита, характеризуется сочетанием высокой вязкости и прочности. В ЗТВ (рисунок 4 (3)) наблюдается прослойка избыточного феррита, что обусловлено высокой диффузионной подвижностью углерода в поверхностных слоях материала колеса. На рисунке 5 представлена структура на границе перехода ЗТВ в основной металл. Сравнительный анализ показывает, что структурных изменений в материале колеса не происходит. Единственным отличием зоны термического влияния является измельчение ферритно-перлитной основы исходного металла колеса. Значительное измельчение зерна в ЗТВ повышает ударную вязкость и усталостную прочность основного металла.

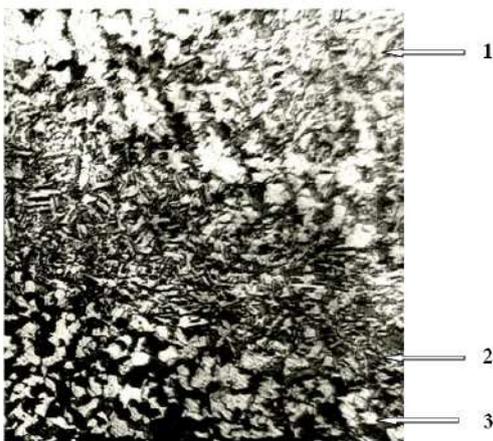


Рисунок 4 – Микроструктура околошовной зоны,  $\times 500$ : 1 – наплавленный металл, 2 – граница сплавления, 3 – зона термического влияния



Рисунок 5 – Микроструктура на границе перехода ЗТВ (1) в основной металл (2),  $\times 100$

Наплавка второго и третьего слоев приводит к увеличению содержания феррита в их структуре (рисунок 6), что связано с уменьшением скорости охлаждения (поскольку колесо достаточно прогрелось за счет наплавки нижнего слоя) и развитием диффузионных процессов перераспределения углерода. Прошедшие диффузионные процессы обусловили понижение твердости на поверхности наплавленного металла, значение которого составило НВ 210 – 225. Полученная структура обладает оптимальными свойствами пластичности, так как является мелкозернистой. Микроструктура наплавленного металла на поверхности гребня показана на рисунке 7.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

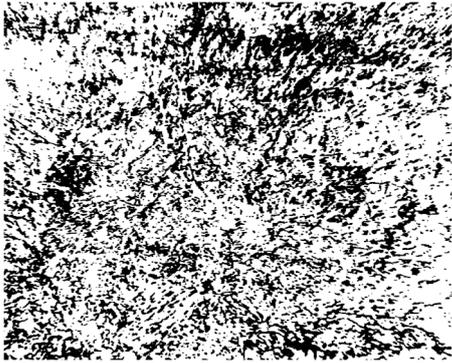


Рисунок 6 – Микроструктура наплавленного металла верхнего слоя на поверхности катания,  $\times 100$

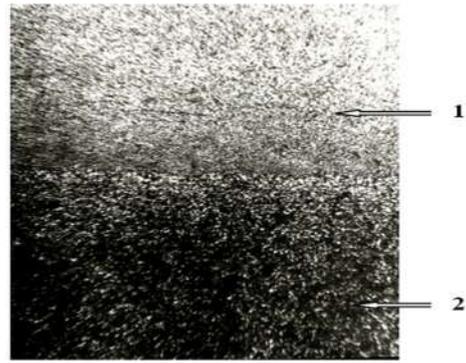


Рисунок 7 – Микроструктура наплавленного металла на рабочей поверхности гребня (1) и ЗТВ (2),  $\times 100$

Использованная в качестве наносимого металла низкоуглеродистая высокопрочная электродная проволока позволила получить наплавленный слой с малым содержанием углерода. Считаем, что это существенно повысит температуру структурных превращений при нагреве в процессе скольжения колеса по рельсу и тем самым затруднит образование мартенситных структур при охлаждении. Но в то же время наплавленный металл верхних слоев имеет низкую твердость, что требует продолжения поисковых работ до получения металла с необходимой эксплуатационной износостойкостью.

На рисунке 8 представлены кривые изменения коробления колеса в зависимости от количества наплаваемых слоев. Анализ результатов показывает неравномерное коробление колеса по различным его сечениям. Наплавка холодного колеса первым слоем медленно прогревает массивный обод. Коробление постепенно увеличивается и достигает максимального значения (2 мм) в сечениях, соответствующих началу и концу наплавки первого слоя. При наплавке второго слоя, когда обод хорошо прогревается, существенного увеличения коробления не происходит, т. е. создаются благоприятные условия для выравнивания температур по всему его сечению. Однако наплавка третьего слоя прогревает обод до более высоких градиентов и наблюдается значительный перепад температур на участках перехода обода в тонкостенный диск колеса, что вызывает нарастание коробления до высоких значений.

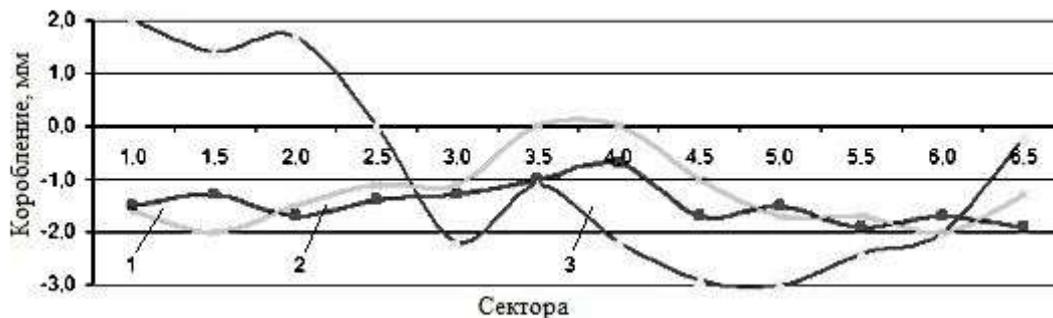


Рисунок 8 – График коробления колеса при трехслойной (1, 2, 3) наплавке поверхности катания («+» – отклонения колеса к поверхности планшайбы, «-» – отклонения колеса от поверхности планшайбы)

Таким образом, установлено, что с увеличением числа слоев коробление колеса, а значит и деформации, возрастают. Возможно, это связано со сложным характером распределения тепла между массивным ободом и тонкостенным диском. В связи с этим для уменьшения остаточных напряжений в этой зоне рациональным является двухслойная наплавка поверхности катания. Остаточное коробление колеса, фиксируемое в течение 10 мин после остановки процесса двухслойной наплавки, представлено на рисунке 9.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

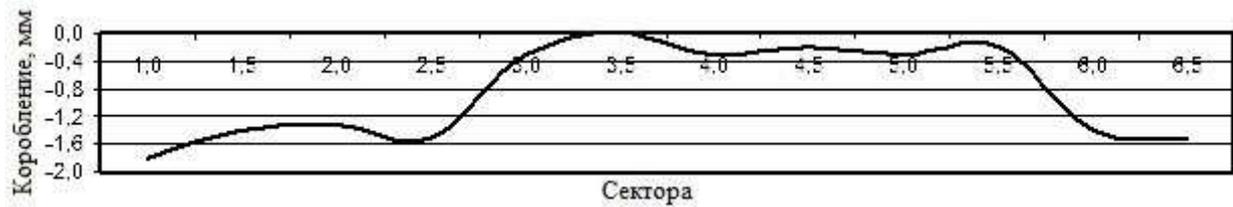


Рисунок 9 – Остаточное коробление колеса после двухслойной наплавки

Влияние коробления, а также наплавленного металла на работоспособность восстановленных колес проверяли в реальных условиях эксплуатации. Наплавка экспериментальных колесных пар с условными номерами 1 и 2 производилась в УП «Узжелдорреммаш» на промышленной многоэлектродной установке [10]. После обточки колесной пары № 2 было выявлено наличие шлаковых включений на поверхности гребня левого диска (рисунок 10, *а*). Наплавленный металл остальных дисков имел гладкую, хорошо сформированную поверхность без дефектов. Для сравнительных исследований были подготовлены две тележки полувагона, каждая из которой имела экспериментальную и обычную (без наплавки) колесную пару.

За работой колесных пар в пути следования наблюдали осмотрщики вагонов. Исследование наплавленных колес, выполненное в УП «Узжелдорреммаш» после пробега 14359 км показало, что на поверхности катания одного из дисков колесной пары № 2 в небольшом количестве имеются мелкие отслоения наплавленного металла (рисунок 10, *б*). На поверхности гребня противоположного диска обнаружен участок (длиной 375 мм) несплавления наплавленного металла с основным (рисунок 10, *в*). Состояние наплавленных дисков колесной пары № 1 было удовлетворительным: отслоение металла, трещин, выкрашиваний и других дефектов обнаружено не было. Данные по износу колес представлены в таблице.

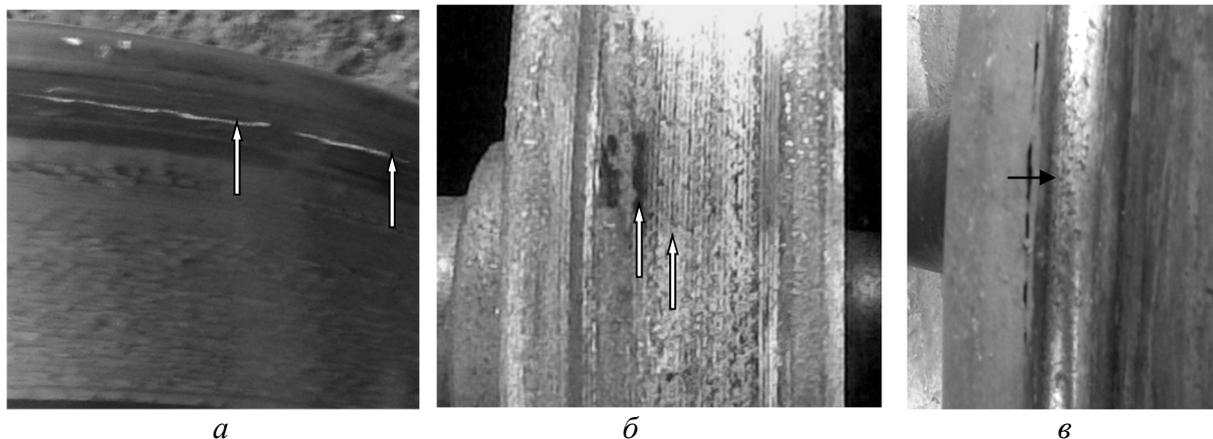


Рисунок 10 – Поверхность гребня со шлаковыми включениями (*а*), мелкие отслоения металла (*б*) и несплавление (*в*) на поверхности катания колеса (показаны стрелками)

Сведения по износу рабочих поверхностей колес после пробега 14359 км

Правое колесо		Левое колесо		
Величина износа, мм				
номер колесной пары	на поверхности катания	на поверхности гребня	на поверхности катания	на поверхности гребня
Наплавленные колесные пары				
1	0	1	1	3
2	2	2	1	1
Ненаплавленные колесные пары				
3	0	1	1	0,5
4	1	1,5	1	1

Таким образом, колеса, наплавленные по поверхности катания и гребня многоэлектродным способом, прошли первые эксплуатационные испытания и выдержали жесткие режимы эксплуатации без повреждений, угрожающих безопасности движения. Однако, как показывают результаты исследований, необходимо продолжить работы по усовершенствованию многоэлектродного процесса наплавки до устранения выявленных дефектов и получения структур в металле наплавки, обеспечивающих необходимую твердость и износостойкость восстановленных колес; провести исследование температурных напряжений с целью установления минимальной толщины обода колеса, допустимой к наплавке, а также определить предельно допустимую кратность наплавки с изучением влияния на свойства материала и его структуру.

Научно обоснованная технология многоэлектродной наплавки в сочетании с определенной периодичностью восстановления, а в дальнейшем и упрочнения, позволит увеличить срок службы колес в два раза и более.

### *Список литературы*

1. Наплавка гребней вагонных колесных пар / Н. В. Павлов, И. Д. Козубенко, Н. Е. Бызова, А. И. Рассоха. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 1993. – № 7. – С. 38–40.
2. Шефель, В. В. Восстановление гребней цельнокатаных вагонных колес наплавкой без применения термообработки / В. В. Шефель, Б. В. Парамонов, В. М. Лойко. – Текст : непосредственный // Сварочное производство. – 1997. – № 3. – С. 44–45.
3. «Холодная» дуговая наплавка гребней колес / Б. Ф. Якушин, Э. Л. Макаров, В. М. Лойко, В. Д. Стржалковский. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2000. – № 7. – С. 44–45.
4. Матвеев, В. В. Наплавка гребней вагонных колес после отжига поверхности катания на вагоноремонтных заводах Украины / В. В. Матвеев. – Текст : непосредственный // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – С. 42–48.
5. Меликов, В. В. Широкойслоная наплавка гребня цельнокатаного колеса многоэлектродным способом / В. В. Меликов, Ш. С. Файзибаев, Э. С. Набиев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 2 (18). – С. 30–36.
6. Исследование структуры сварных соединений сталей теплоэнергетического оборудования / А. В. Зайцева, Т. П. Муравьева, В. М. Боровик [и др.]. – Текст : непосредственный // Тяжелое машиностроение. – 2001. – № 8. – С. 29–33.
7. Павлов, Н. В. Наплавка рабочей поверхности колеса / Н. В. Павлов. – Текст : непосредственный // Сб. трудов ВНИИЖТа. – Москва : Интекст, 2004. – С. 140–143.
8. Матвеев, В. В. Восстановление вагонных колес наплавкой с предварительным отжигом поверхности катания / В. В. Матвеев. – Текст : непосредственный // Автоматическая сварка. – 2005. – № 11. – С. 36–40.
9. Касаткин, Б. С. Микроструктура и свойства сварных соединений низколегированных сталей / Б. С. Касаткин, О. Н. Козловец. – Текст : непосредственный // Автоматическая сварка. – 1989. – № 7. – С. 1–10.
10. Набиев, Э. С. Промышленная многоэлектродная наплавочная установка / Э. С. Набиев. – Текст : непосредственный // Вестник ТашИИТа. – 2013. – № 1/2. – С. 44–46.

### *References*

1. Pavlov N. V., Kozubenko I. D., Byzova N. E., Rassokha A. I. Surfacing of car wheelset ridges [Naplavka grebnei vagonnykh kolesnykh par]. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 1993, no. 7, pp. 38 – 40.

2. Shefel' V. V., Paramonov B. V., Loiko V. M. Restoration of the ridges of solid-rolled wagon wheels by surfacing without the use of heat treatment [Vosstanovlenie grebnei tsel'nokatanykh vagonnykh koles naplavkoi bez primeneniia termoobrabotki]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1997, no. 3, pp. 44 – 45.

3. Yakushin B. F., Makarov E. L., Loiko V. M., Strzhalkovskii V. D. "Cold" arc surfacing of wheel ridges [«Kholodnaia» dugovaia naplavka grebnei koles]. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2000, no. 7, pp. 44 – 45.

4. Matveev V. V. Surfacing of car wheel ridges after annealing of the rolling surface at car repair plants in Ukraine [Naplavka grebnei vagonnykh koles posle otzhiga poverkhnosti katanii na vagon-oremontnykh zavodakh Ukrainy]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding*, 2005, no. 6, pp. 42 – 48.

5. Melikov V. V., Faizibaev Sh. S., Nabiev E. S. The wide-layer welding of the solid wheel's comb by the many-electrode way [Shirokosloinaia naplavka grebnia tsel'nokatanogo kolesa mnogoelektrodnym sposobom]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 2 (18), pp. 30 – 36.

6. Zaitseva A. V., Murav'eva T. P., Borovik V. M. Investigation of the structure of welded joints of steels of thermal power equipment [Issledovanie struktury svarnykh soedinenii stali teploenergeticheskogo oborudovaniia]. *Tiazheloe mashinostroenie – Heavy engineering*, 2001, no. 8, pp. 29 – 33.

7. Pavlov N. V. Surfacing of the working surface of the wheel [Naplavka rabochei poverkhnosti kolesa]. *Sbornik trudov VNIIZhTa – Collection of works of VNIIZHT*, Moscow: Intekst Publ., 2004, pp. 140 – 143.

8. Matveev V. V. Restoration of wagon wheels by surfacing with pre-annealing of the rolling surface [Vosstanovlenie vagonnykh koles naplavkoi s predvaritel'nym otzhigom poverkhnosti katanii]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding*, 2005, no. 11, pp. 36 – 40.

9. Kasatkin B. S., Kozlovets O. N. Microstructure and properties of welded joints of low-alloy steels [Mikrostruktura i svoistva svarnykh soedinenii nizkolegirovannykh stali]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding*, 1989, no. 7, pp. 1 – 10.

10. Nabiev E. S. Industrial Multielectrode Surfacing Plant [Promyshlennaia mnogoelektrodnaia naplavochnaia ustanovka]. *Vestnik TashIITa – Bulletin of TasHIT*, 2013, no. 1/2, pp. 44 – 46.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Файзибаев Шерзод Сабирович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

Адылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ТГТРУ.

Тел.: (8-109-98-71) 299-06-81.

E-mail: sherzod\_fayzibaev@mail.ru

### Набиев Эльман Саядович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

Адылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Материаловедение и сварка», ТГТРУ.

Тел.: (8-109-98-71) 299-04-46.

E-mail: nes.2406@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Faizibaev Sherzod Sabirovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Adylkhodzhayeva st, Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Doctor Of Sciences in Engineering, professor, professor of the department «Wagons and wagon facilities», TSTU.

Phone: (8-109-98-71) 299-06-81.

E-mail: sherzod\_fayzibaev@mail.ru

### Nabiev Elman Saiadovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Adylkhodzhayeva st, Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, associate professor, senior researcher at the Materials Science and Welding Research Laboratory, TSTU.

Phone: (8-109-98-71) 299-04-46.

E-mail: nes.2406@mail.ru

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

**Соболева Ирина Юрьевна**

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

Адылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Старший преподаватель кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ТГТРУ.

Тел.: (8-109-98-71) 299-06-81.

E-mail: soboleva\_irinayu@mail.ru

**Soboleva Irina Yurevna**

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Adylkhodzhayeva st, Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Senior lecturer of the department «Wagons and wagon facilities», TSTU.

Phone: (8-109-98-71) 299-06-81.

E-mail: soboleva\_irinayu@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Файзибаев, Ш. С. Многослойная наплавка обода колеса грузового вагона / Ш. С. Файзибаев, Э. С. Набиев, И. Ю. Соболева. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 98 – 106.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Faizibaev Sh. S., Nabiev E. S., Soboleva I. Yu. Multilayer surfacing of a freight car wheel rim. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 3 (47), pp. 98 – 106 (In Russian).

УДК 621.311:621.331

**А. А. Комяков, А. С. Вильгельм, А. И. Шкулов**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СОВМЕСТНЫХ ТЯГОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ УЧАСТКОВ И ПОЕЗДНОЙ СИТУАЦИИ

**Аннотация.** Статья посвящена разработке усовершенствованного алгоритма расчета системы тягового электроснабжения для дальнейшей практической реализации с целью повышения точности определения расхода и потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения за счет совмещения тягового и электрического расчетов и с учетом действующей поездной ситуации. Актуальность поставленной задачи обусловлена необходимостью повышения точности расчетов пропускной и провозной способности по условиям устройств электроснабжения с учетом критериев энергоэффективности перевозочного процесса. Рассмотрены имеющиеся решения данной проблемы в виде готовых программных комплексов и алгоритмов. Проведен численный эксперимент для участка постоянного тока в программе «Комплекс расчетов тягового электроснабжения», который показал, что относительная погрешность, определяющая сходимость тяговых и электрических расчетов, составляет от 1,6 до 5,1 %. Основной причиной расхождения является недостаточно корректный учет напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. Предложен усовершенствованный алгоритм расчета системы тягового электроснабжения, отличительной чертой которого является проведение уточняющего полного тягового расчета до составления мгновенных схем. В результате проведенных исследований разработан общий алгоритм совместных тяговых и электрических расчетов с учетом характеристик и параметров работы участка и действующей поездной ситуации. Сделано заключение о преимуществах предлагаемого алгоритма и перспективных направлениях дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, подвижной состав, система тягового электроснабжения, энергоэффективность, пропускная способность, имитационное моделирование.

**Aleksandr A. Komyakov, Aleksandr S. Vilgelm, Andrey I. Shkulov**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## ALGORITHM FOR JOINT TRACTION AND ELECTRIC CALCULATIONS OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM WITH CONSIDERING THE PARAMETERS OF RAILWAY SECTIONS AND TRAINING SITUATION

**Abstract.** Paper is devoted to the development of an improved algorithm for calculating the traction power supply system for further practical implementation in order to improve the accuracy of calculations of the traction power supply system by combining traction and electrical calculations with considering the current train situation. The relevance of

*the task is due to the need to improve the accuracy of calculations of throughput and carrying capacity under the conditions of power supply devices with considering the criteria for energy efficiency of the transportation process. The available solutions to this problem in the form of ready-made software systems and algorithms are considered. A numerical experiment was carried out for the DC section in the program "Complex of calculations for traction power supply", which showed that the relative error that determines the convergence of traction and electrical calculations is from 1.6 % to 5.1 %. The main reason for the discrepancy is the insufficiently correct calculation of the voltage at the current collector of the electric rolling stock. An improved algorithm for calculating the traction power supply system is proposed. The distinguishing feature of this algorithm is the implementation of a clarifying full traction calculation before compiling instant schemes and instant electric and traction calculations. As a result of the research, a general algorithm for joint traction and electrical calculations with considering the parameters of railway sections and the current training situation has been developed. A conclusion about the advantages of the proposed algorithm and promising directions for further research is made.*

**Keywords:** railway, rolling stock, traction power supply system, energy efficiency, capacity, simulation.

В соответствии с Транспортной стратегией РФ до 2035 г. [1] ключевым инфраструктурным вызовом в части железнодорожного транспорта является недостаточная пропускная способность железнодорожных линий. Особенно остро эта проблема проявляется на Восточном полигоне, где имеют место ограничения пропускной и провозной способности, в том числе по условиям устройств электроснабжения. Для принятия решения о выборе способов ликвидации «узких мест» железнодорожной энергетической инфраструктуры с учетом удовлетворения будущего спроса на перевозки в большинстве случаев используется методология, основанная на имитационном моделировании работы системы тягового электроснабжения (СТЭ) и электроподвижного состава (ЭПС). При этом указанные расчеты должны выполняться с учетом критериев энергоэффективности перевозочного процесса, что также является одним из ключевых направлений развития ОАО «РЖД» [2].

В настоящее время существует ряд программных комплексов и разработок по данному направлению. Известны программный комплекс «Fazanord-качество», «Fazanord» и имитационная модель СТЭ для поездов повышенной массы.

Программный комплекс «Fazanord-качество» [3] предназначен для расчетов показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения, определяет отклонение напряжения, несимметрии, несинусоидальности напряжений и токов, максимальные рабочие токи фидеров и токи коротких замыканий, влияние поездной ситуации на показатели качества электрической энергии в районах электроснабжения нетяговых потребителей.

Программный комплекс «Fazanord» [4] предназначен для автоматизации расчетов режимов СТЭ, для обширного расчета параметров СТЭ и позволяет рассчитывать режимы схем, содержащих до 1000 узлов, 6000 ветвей и до 500 элементов СТЭ.

Имитационная модель СТЭ для поездов повышенной массы [5] содержит алгоритм расчета СТЭ, направленный на определение мероприятий по усилению СТЭ. Основной целью данного алгоритма является выявление энергооптимальной массы грузовых поездов, а также поездов повышенной массы и длины. Указанный алгоритм определяет проблемные участки, ограничивающие пропуск поездов, производит оценку энергоэффективности данной зоны и позволяет в дальнейшем определить мероприятия по повышению энергообеспеченности всего участка.

Однако в настоящее время на сети железных дорог наиболее широкое распространение для целей моделирования СТЭ получил программный комплекс «КОРТЭС» (Комплекс расчетов тягового электроснабжения), разработанный Научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта в 2004 г.

Заложенные в этом комплексе методы и алгоритмы расчета доказали высокую эффективность, однако, по мнению авторов статьи, по ряду критериев требуют усовершенствования. В частности, недостаточно корректно осуществляется учет напряжения на токоприемнике ЭПС, в связи с чем наблюдаются значительные расхождения между расчетными и фактическими значениями расхода и потерь электрической энергии в СТЭ. Решение данной проблемы может быть основано на проведении совместных тяговых и электрических расчетов СТЭ с учетом

постоянно меняющихся параметров работы участков железных дорог и действующей поездной ситуации.

**Цель исследования.** Разработка усовершенствованного алгоритма расчета системы тягового электроснабжения для дальнейшей практической реализации с целью оптимизации нагрузки на вычислительную технику за счет совмещения тягового и электрического расчетов и с учетом действующей поездной ситуации.

**Материал и методы исследования.** Предложенные алгоритмы основаны на теории тяги поездов, методах расчета электрических цепей (методы контурных токов, узловых потенциалов, наложения и др.), итерационных методах расчета, а также на авторской методике расчета показателей СТЭ железной дороги переменного тока для целей выбора типа и мощности средств компенсации реактивной мощности, которая заложена в основу СТО РЖД 07.022.1–2015 [6].

Основной задачей тягового расчета является определение показателей работы электроподвижного состава, таких как токи электровоза и его тяговых двигателей, расход электроэнергии, перегрев обмоток электродвигателей, масса состава, скорость движения и др. Расчет производится с учетом полного использования мощности и кинетической и потенциальной энергии поезда для заданных участков и типов ЭПС.

На основе результатов тяговых расчетов становится возможным составлять расписания движения поездов, режимные карты вождения поездов, определять нормы расхода электроэнергии на тягу поездов и анализировать факторы, возникающие в эксплуатации ЭПС, для их улучшения и повышения эффективности тяги поездов. Расчет может быть использован также для планирования, модернизации и реконструкции новых участков, что в свою очередь приведет к повышению эффективности эксплуатации системы тягового электроснабжения [7].

В настоящее время мощности вычислительной техники растут быстрыми темпами, что способствует развитию расчетов СТЭ методом мгновенных схем по сечениям графика движения поездов. При уменьшении шага расчетов повышается точность выполняемых расчетов, но это приводит к повышенной нагрузке на вычислительную технику.

Имитационная модель СТЭ является сложной системой соотношений начальных условий, параметров и характеристик процесса. По этой причине используется имитация процессов, протекающих в системе, с сохранением их логической структуры, а не переход к преобразованию в классическую математическую модель СТЭ.

Применяемый в настоящее время для расчетов параметров СТЭ программный комплекс «КОРТЭС» имеет существенный недостаток, связанный с раздельным выполнением тяговых и электрических расчетов, т. е. тяговые расчеты выполняются без учета параметров работы и характеристик СТЭ и графика движения поездов. При этом электрические расчеты выполняются на основе графиков движения поездов, построенных по результатам тяговых расчетов, изначально выполненных с погрешностью. Ключевой с точки зрения определения электроэнергетических параметров ЭПС фактор, который нужно учитывать для устранения этой погрешности при тяговом расчете, – напряжение на токоприемнике ЭПС. Учет напряжения, которое в свою очередь зависит от параметров работы и характеристик СТЭ и графика движения поездов, позволяет корректировать принимаемые к расчету тяговые, тормозные и токовые характеристики ЭПС, полученные при номинальных значениях напряжения (3 кВ для постоянного тока и 25 кВ для переменного тока). Изменение этих характеристик скорректирует и режимы ведения поезда, расчетные величины токопотребления и тока рекуперации, которые непосредственно влияют на энергетические параметры работы участка в целом, такие как, например, потери энергии в контактной сети и расход энергии по счетчикам тяговых подстанций.

Расчеты, выполненные в программном комплексе «КОРТЭС» для двухпутного участка постоянного тока с легким (равнинным) типом профиля пути, позволили оценить погрешности таких расчетов, в которых в процессе тягового расчета не учитывается изменяющееся напряжение на токоприемнике электровоза. Тяговые расчеты были выполнены для участка

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

протяженностью 147,3 км в обоих направлениях для электровоза 2ЭС4К с поездом массой 5000 т с одной остановкой в пути следования в каждом направлении. Значение напряжения на токоприемнике электровоза было принято 3 кВ. Расход энергии за поездку составил в четном направлении 6000 кВт · ч, в нечетном – 4580 кВт · ч, рекуперация – 171 и 307 кВт · ч соответственно. Техническая скорость по расчету составила 51 км/ч. Далее на основе тяговых расчетов был составлен график движения поездов на пять пар поездов с межпоездным интервалом 30 мин. Данный график определил продолжительность электрического расчета – 300 мин. Для электрического расчета были заданы все необходимые параметры СТЭ, включая параметры девяти тяговых подстанций, и выполнены четыре электрических расчета для различных заданных уровней выпрямленного напряжения холостого хода (3,6; 3,55; 3,5 и 3,45 кВ). По результатам каждого расчета определялись значения расхода энергии по тяговым подстанциям, потери энергии в контактной сети и в трансформаторах (нагрузочные и холостого хода), а также относительная погрешность расчета исходя из баланса отпущенной и потребленной на участке энергии с учетом потерь и рекуперации по отношению к расходу энергии по счетчикам тяговых подстанций по выражению, %:

$$\delta W = \frac{(W_{\text{ТП}} + W_{\text{рек}} - W_{\text{ЭПС}} - \Delta W_{\text{ТП}}^{\text{х.х}} - \Delta W_{\text{ТП}}^{\text{нагр}} - \Delta W_{\text{КС}})}{W_{\text{ТП}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $W_{\text{ТП}}$  – расчетный расход энергии по тяговым подстанциям, кВт · ч;

$W_{\text{рек}}$  – расчетная величина рекуперация по ЭПС, кВт · ч;

$W_{\text{ЭПС}}$  – расчетный расход энергии по ЭПС, кВт · ч;

$\Delta W_{\text{ТП}}^{\text{х.х}}$  – расчетные потери холостого хода по трансформаторам тяговых подстанций, кВт · ч;

$\Delta W_{\text{ТП}}^{\text{нагр}}$  – расчетные нагрузочные потери по трансформаторам тяговых подстанций, кВт · ч;

$\Delta W_{\text{КС}}$  – расчетные потери в контактной сети, кВт · ч.

Результаты четырех оценочных расчетов представлены в таблице.

Результаты расчетов по оценке погрешности расчетов показателей СТЭ в программном комплексе «КОРТЭС»

Номер расчета	Расход энергии по ЭПС, кВт · ч	Рекуперация, кВт · ч	Принятое к расчету выпрямленное напряжение холостого хода, кВ	Расход энергии по тяговым подстанциям, кВт · ч	Потери энергии по трансформаторам тяговых подстанций, кВт · ч		Потери в контактной сети, кВт · ч	Относительная погрешность расчета, %
					холостого хода	нагрузочные		
1	52900	2390	3,6	57679	990	108	3362	5,12
2	52900	2390	3,55	56795	990	108	3367	3,44
3	52900	2390	3,5	55835	990	108	3383	1,60
4	52900	2390	3,45	54972	990	108	3385	–0,04

Полученные результаты показывают, что для принятых уровней выпрямленного напряжения на тяговых подстанциях от 3,5 до 3,6 кВ относительная погрешность расчетов (расхождение результатов тяговых и электрических расчетов) составляет от 1,6 до 5,1 %, а для удовлетворительной сходимости результатов тяговых и электрических расчетов необходимо принять напряжение на тяговых подстанциях порядка 3,45 кВ. На практике же выпрямленное напряжение холостого хода на тяговых подстанциях является исходной информацией для расчетов, а изменяться в процессе расчетов в зависимости от поездной ситуации должны напряжения на токоприемниках ЭПС и, как следствие, токи, потребляемые ЭПС. Изменять напряжение на токоприемниках ЭПС в процессе тягового расчета, ориентируясь на результаты предварительных электрических расчетов, в комплексе «КОРТЭС» возможно, но данный процесс является

слишком трудоемким (требует корректировки режимной карты в программе тяговых расчетов по результатам множества электрических расчетов по мгновенным схемам с целью установления уровней напряжения по всем координатам участка для всех категорий поездов).

При этом более простой путь достижения сходимости тяговых и электрических расчетов с подбором уровней напряжений холостого хода тяговых подстанций (случай, описанный выше) приводит к существенным погрешностям, которые вызваны главным образом некорректным определением расходов энергии по тяговым подстанциям. В рассмотренном случае более высокие значения напряжений по тяговым подстанциям приводят к завышенному расходу энергии, поскольку токи, потребляемые электровозами, уже определены тяговыми расчетами и большее напряжение при неизменных токах естественно приводит к «перерасходу» энергии. Однако на практике более высокое напряжение на тяговых подстанциях приведет к большим напряжениям и на токоприемниках ЭПС и меньшим токам электровозов, что снизит потери энергии в контактной сети, а расходы энергии по тяговым подстанциям не будут так существенно зависеть от принятого напряжения холостого хода, а будут зависеть от потребляемой мощности тяговой нагрузки.

Таким образом, преимущество программного комплекса «КОРТЭС» заключается в том, что за короткий период времени могут быть выполнены тяговые расчеты, составлены графики движения поездов, выполнены электрические расчеты и получены необходимые значения энергетических параметров участка. Однако ввиду того, что в тяговых расчетах напряжение на токоприемнике ЭПС задается постоянным, результаты тягового и, как следствие, электрического расчета имеют существенные погрешности.

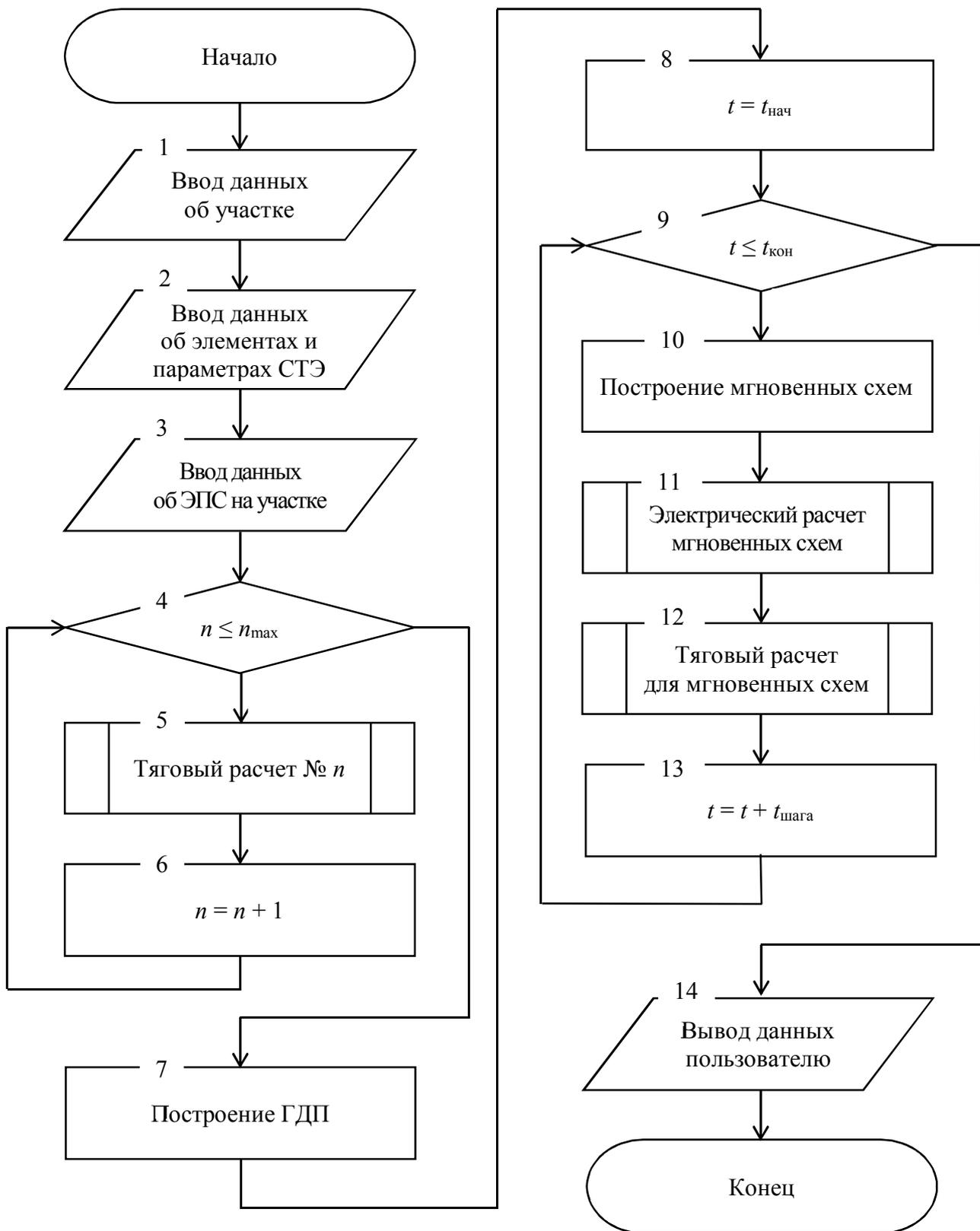
В исследованиях [8] учтен данный недостаток и в разработанном программном комплексе учитывается изменение напряжения в реальном времени, однако проведение уточняющего полного тягового расчета осуществляется после составления мгновенных схем. Это требует большого количества расчетов, в результате для их выполнения требуется длительное время. Объединение процессов электрического и тягового расчета позволяет моделировать процесс движения поезда, максимально приближенный к соответствующим реальным условиям и позволяет рассчитывать реальное напряжение на токоприемнике электровоза [9], [10]. Таким образом, при выполнении расчета должна создаваться база данных, приближенная к реальным показателям из расчетных матриц в каждый дискретный момент времени.

**Результаты исследования и их обсуждение.** В разработанном алгоритме (рисунок) для определения значения первичных токов, напряжений и скоростей движения предлагается производить предварительные тяговые расчеты по всем категориям поездов для составления предварительного графика движения поездов, используемого для дальнейшего расчета по мгновенным схемам. Далее идет поэтапный электрический и тяговый расчет с заданным дискретными шагом. Это необходимо для учета множества переменных, изменяющихся в реальном времени.

С учетом перечисленного выше создан алгоритм совместных тяговых и электрических расчетов с учетом характеристик и параметров работы участка и действующей поездной ситуации. Основой алгоритма является электрический расчет СТЭ с составлением мгновенных схем, использованием матричных выражений и тяговый расчет на основе правил тяговых расчетов для поездной работы. Это должно привести к повышению точности определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения в границах анализируемого участка.

В разработанном алгоритме ввод исходных данных осуществляется в три этапа. На первом этапе в блоке 1 вводятся данные участка железной дороги: план и профиль пути с указанием остановок, значения кривых и уклонов, ограничения скорости, остановки, протяженность участка.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Основной алгоритм расчета системы тягового электроснабжения

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На втором этапе в блоке 2 вводятся данные о параметрах СТЭ участка. К ним относятся информация о расположении объектов СТЭ (посты секционирования, тяговые подстанции), о контактной сети, устройство тяговых подстанций (тип и число понижающих и тяговых трансформаторов, тип проводов и длина фидерных линий), внешние характеристики тяговых подстанций. При вводе данной информации используются электронные базы данных.

На третьем этапе в блоке 3 вводятся данные о подвижном составе, которые находятся на участке: серия ЭПС, его масса и масса всего состава, количество осей состава, нагрузка на ось.

Блок 4 отвечает за запуск нового первичного тягового расчета для каждой единицы подвижного состава, находящегося на расчетном участке. Блок 5 является полным предварительным тяговым расчетом для всего ЭПС на расчетном участке движения в обоих направлениях. Данный расчет считается предварительным (расчетное напряжение на токоприемнике принимается постоянным, равным для постоянного тока 3 кВ, для переменного тока 25 кВ) и осуществляется на основе «Правил тяговых расчетов для поездной работы» [11] и ГОСТ 57670–2017 [12].

В результате получаем необходимые токи и скорости ЭПС для дальнейших расчетов. В блоке 7 строится расчетный график движения поездов (ГДП) на участке.

Блоки 8, 9 и 13 отвечают за то, чтобы расчеты производились с заданным шагом по времени от начала и до завершения расчета движения подвижного состава.

В блоке 10 производится построение мгновенной схемы замещения для расчетного участка. Схема замещения включает в себя следующие элементы: сопротивления ветвей, в том числе входящих в них элементов, электродвижущие силы, источник тока, который задает тяговую нагрузку. Данная схема необходима для дальнейшего электрического расчета.

Блок 11 предназначен для выполнения электрического расчета. Данный расчет необходим для определения напряжения на токоприемнике в дискретный момент времени, чтобы использовать эти значения в тяговом расчете.

Блок 12 представляет собой тяговый расчет в дискретный момент времени с учетом рассчитанного напряжения и расположения всех поездов на участке. Введение данного блока позволяет решить проблему, связанную с некорректным учетом напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, и таким образом повысить точность определения расхода и потерь электрической энергии.

Итогом работы алгоритма является вывод всех необходимых пользователю данных, полученных в результате работы алгоритма: напряжения на токоприемниках ЭПС, токи ЭПС, токи по фидерам тяговых подстанций, скорость, местоположения в каждый момент времени.

Основной особенностью предлагаемого алгоритма является выполнение совместных тяговых и электрических расчетов на основе предварительного тягового расчета, характеристик графика движения поездов и СТЭ. Отличительной чертой данного алгоритма является проведение уточняющего полного тягового расчета до составления мгновенных схем и мгновенного электрического и тягового расчета [8].

Данный подход позволяет снизить нагрузку на вычислительную технику и повысить скорость расчета для реализованной в будущем рабочей версии программы, повысить точность за счет учета в расчете действующей поездной ситуации, характеристик и параметров работы участка. Расчеты, выполняемые в программе на основе предлагаемого алгоритма, могут быть использованы для планирования, модернизации и реконструкции эксплуатируемых электрифицированных участков железных дорог, а также для проектирования параметров новых участков, что в свою очередь способствует повышению эффективности эксплуатации СТЭ.

### *Список литературы*

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : Распоряжение Правительства Российской Федерации № 3363-р от 27 ноября 2021 г. // <https://mintrans.gov.ru> : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://mintrans.gov.ru/file/473193> (дата обращения: 19.11.2021).

2. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года : Распоряжение ОАО «РЖД» № 2718р от 15 декабря 2011 г. // <http://www.rzd-expo.ru> : Текст : электронный. – URL : [http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ\\_Strateg\\_new.pdf](http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf) (дата обращения: 19.11.2021).
3. Крюков, А. В. Компьютерные технологии для моделирования систем электроснабжения железных дорог переменного тока / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 3 (28). – С. 61–65.
4. Закарюкин, В. П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока : монография / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск : Иркутский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 160 с. – Текст : непосредственный.
5. Гаранин, М. А. Моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока для пропуска поездов повышенной массы / М. А. Гаранин, Т. В. Бошкарева, С. А. Фроленков – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья – 2016. – № 5 (59). – С. 22–27.
6. СТО РЖД 07.022.1–2015 Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика расчета показателей для выбора типа и мощности средств компенсации реактивной мощности. Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 08.12.2015 № 2864р. – Москва : ОАО «РЖД», 2015. – 73 с. – Текст : непосредственный.
7. Черемисин, В. Т. Оценка технологических потерь в тяговой сети в условиях применения электроподвижным составом рекуперативного торможения / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. – 2014. – № 2 (54). – С. 106–111.
8. Тарута, П. В. Повышение эффективности использования энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения постоянного тока : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тарута Павел Викторович ; Омский гос. университет путей сообщения. – Омск, 2004. – 164 с. – Текст : непосредственный.
9. Марквардт, Г. Г. Алгоритм тягового расчета при заданном времени хода по участку постоянного тока с учетом изменяющегося напряжения на токоприемнике электровоза в режимах тяги и рекуперации / Г. Г. Марквардт. – Текст : непосредственный // сборник научных трудов ВНИИЖТа. – 1974. – Вып. 520.
10. Паристый, И. Л. Вождение поездов повышенного веса и длины: опыт Московской железной дороги / И. Л. Паристый, Р. Г. Черепашенец. – Москва : Транспорт, 1983. – 239 с. – Текст : непосредственный.
11. Правила тяговых расчетов для поездной работы : Распоряжение ОАО «РЖД» № 867р от 12.05.2016 // <https://docs.cntd.ru/> : Текст : электронный. – URL <https://docs.cntd.ru/document/1200079084> (дата обращения: 19.11.2021).
12. ГОСТ 57670–2017 Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 48 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. *Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda: Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii N 3363-r ot 27 noyabrya 2021* (Transportnaya strategiya Rossijskoj Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda: Decree of the Government of the Russian Federation No. 3363-r of November 27, 2021), Available at: <https://mintrans.gov.ru/file/473193> (accessed 19 November 2021).
2. *Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda : Rasporyazhenie ОАО «RZHD» № 2718r ot 15 dekabrya 2011* (Energy strategy of the holding "Russian Railways" for the period up to 2015 and for the future up to 2030 : Order of JSC "Russian Railways" No. 2718r dated December 15, 2011), Available at: [http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ\\_Strateg\\_new.pdf](http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf) (accessed 19 November 2021).

3. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. Computer technologies for modeling AC railway power supply systems [*Kompyuternyye tekhnologii dlya modelirovaniya sistem elektrosnabzheniya zheleznikh dorog peremennogo toka*]. *Transport Rossiyskoy Federatsii – The journal of Transport of the Russian Federation*, 2010, no. 3 (28), pp. 61 – 65.
4. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznikh dorog peremennogo toka* (Methods of joint modeling of traction and external power supply systems of AC railways monograph). Irkutsk: Irkutsk State Transport University Publ., 2010, 160 p.
5. Garanin M. A., Boshkareva T. V., Frolenkov S. A. Modeling of an alternating current traction power supply system for passing elevated trains [*Modelirovanie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya propuska poezdov povyshennyj massy*]. *Vestnik transporta Povolzh'ya – Bulletin of transport of the Volga region*, 2016, no 5 (59), pp. 22 – 27.
6. STO RZD 07.022.1–2015 «Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoj dorogi peremennogo toka. Metodika rascheta pokazatelej dlya vybora tipa i moshchnosti sredstv kompensacii reaktivnoj moshchnosti» (STO RZD 07.022.1-2015 «Traction power supply system of the AC railway. The method of calculating indicators for selecting the type and power»). Moscow : JSC «Russian Railways» Publ., 2015, 73 p.
7. Cheremisin V. T., Vilgelm A. S., Nezevak V. L. Evaluation of technological losses in the traction network under conditions of application of regenerative braking by electric rolling stock [*Ocenka tekhnologicheskikh poter' v tyagovoj seti v usloviyah primeneniya elektropodvizhnym sostavom rekuperativnogo tormozheniya*]. *Vestnik Rostovskogo gos. un-ta putej soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State University of Railways*, 2014, no. 5 (54), pp. 106 – 111.
8. Taruta P. V. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya energii rekuperacii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka* (Improving the efficiency use of energy recovery in the system of traction power supply DC). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2004, 164 p.
9. Marquardt G. G. *Algoritm tyagovogo rascheta pri zadannom vremeni hoda po uchastku postoyannogo toka s uchetom izmenyayushchegosya napryazheniya na tokopriemnike elektrovoza v rezhimakh tyagi i rekuperacii* [The Algorithm of calculation of traction at any given time of the stroke phase DC to changing the voltage at the pantograph of an electric locomotive in the modes of traction and recovery]. *Sbornik nauchnykh trudov VNIIZHT – collection of scientific works VNIIZHT*, 1974, issue 520.
10. Parity I. L., Ceripasina R. G. *Vozhdenie poezdov povyshennogo vesa i dliny: opyt Moskovskoj zheleznoj dorogi* (Driving trains increased weight and length: the experience of the Moscow railway). Moscow, Transport, 1983, 239 p.
11. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoj raboty : Rasporyazhenie OAO «RZHD» № 867r ot 12.05.2016* (Rules of traction calculations for train work: Order of JSC "Russian Railways" No. 867r dated 12.05.2016), Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200079084> (accessed 19 November 2021).
12. *Sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoj dorogi. Metodika vybora osnovnykh parametrov, GOST 57670-2017* (The railway track power supply systems. The methods of selecting fundamental parameters, GOST 57670-2017). Moscow, Standardinform, 2016, 48 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОМГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая электротехника».

Тел.: +7 904 322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Komyakov Aleksandr Anatol'evich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, K. Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor Of Sciences in Engineering, docent, professor of the department «Theoretical electrical engineering».

Phone: +7 904 322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

## Вильгельм Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7-983-528-93-74.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

## Vilgelm Aleksandr Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, K. Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Assistant Professor of the department «Rolling stock of electric railways».

Phone: +7-983-528-93-74.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

## Шкулов Андрей Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: + 79236954613.

E-mail: shkulov.ai@gmail.com

## Shkulov Andrey Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, K. Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: + 79236954613.

E-mail: shkulov.ai@gmail.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Комяков, А. А. Разработка алгоритма совместных тяговых и электрических расчетов с учетом характеристик и параметров участков и поездной ситуации / А. А. Комяков, А. С. Вильгельм, А. И. Шкулов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 106 – 115.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Komyakov A. A., Vil'gel'm A. S., Shkulov A. I. Algorithm for joint traction and electric calculations of traction power supply system with considering the parameters of railway sections and training situation. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 3 (47), pp. 106 – 115 (In Russian).

УДК 625.1+624.139.6

**Т. В. Шепитько, А. А. Зайцев, Н. И. Тенирядко, В. А. Бучкин**

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

## ТРАНСПОРТНОЕ РАЗВИТИЕ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ

**Аннотация.** В ходе научного сопровождения проектирования, строительства и эксплуатации, а также прогнозирования развития транспортной инфраструктуры в Арктическом регионе учеными РУТа (МИИТа) предложена методика отработки новых конструктивно-технологических решений посредством их апробации на небольшом участке трассы, получившем статус опытно-экспериментального; предложен ряд решений, которые могут учитываться и использоваться в ходе развития транспортной инфраструктуры в Арктике.

В последние годы предпринят ряд экспедиций для изучения особенностей условий строительства транспортных объектов, включая климатические и инженерно-геологические, а также фактическое состояние существующих транспортных объектов (Полярная магистраль Салехард – Игарка): обследовательские экспедиции 2005, 2012 гг.; совместные экспедиции с Русским географическим обществом с участием ученых Института пути, строительства и сооружений РУТа (МИИТа) в Арктическом регионе в 2019 – 2021 гг., в ходе последних организована сеть геомониторинга; получены данные по температурам в воздушной среде и в приповерхностной зоне грунтовой среды; проведены лабораторные и полевые испытания грунтов; даны рекомендации по особенностям строительства транспортных объектов, включая возведение земляного полотна, с использованием различных вариантов технических и конструктивно-технологических решений.

Целью статьи является обобщение опыта освоения северных территорий за счет развития транспортных коммуникаций и апробации новых конструктивно-технологических решений по сооружению земляного полотна на опытно-экспериментальном участке трассы.

Представленный в настоящей статье подход может быть использован для формирования эффективной Высокоширотной российской транспортной системы в Арктической зоне РФ с прогнозированием трендов ее развития.

**Ключевые слова:** транспорт, транспортная доступность, инфраструктура железных дорог, Северный широтный ход, Восточный участок, ЯНАО и Красноярский край.

Taisiia V. Shepitko, Andrei A. Zaytsev, Nadezhda I. Teniryadko, Vitalii A. Buchkin

Russian Transport University (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

## TRANSPORT DEVELOPMENT OF THE NORTHERN TERRITORIES OF RUSSIA

**Abstract.** *in the course of scientific support of design, construction and operation, as well as forecasting the development of transport infrastructure in the Arctic region, RUT (MIIT) scientists have proposed a methodology for working out new design and technological solutions by testing them on a small section of the route that has received the status of experimental; a number of solutions have been proposed that can be taken into account and used during the development of transport infrastructure in the Arctic.*

*To verify the university's developments, a number of expeditions were undertaken to study the features of the conditions of construction of transport facilities, including climatic and engineering-geological, as well as the condition of existing transport facilities (the Salekhard - Igarka Polar Highway): survey expeditions in 2005, 2012; joint expeditions with the Russian Geographical Society with the participation of scientists from the Institute of Roads, Construction and Structures of the Russian Institute of Transport (MIIT) in the Arctic region in 2019 - 2021, during which a geomonitoring network was organized; data on temperatures in the air, near-surface zones and in the ground environment were obtained; the analysis of the ground environment was carried out; recommendations were given on the specifics of the construction of transport facilities, including the construction of the roadbed, using different variants of technical and structural and technological solutions.*

*The purpose of the article is to generalize the experience of the development of the northern territories through the development of transport communications and the testing of new structural and technological solutions for the construction of the roadbed by means of a local section of the highway in the status of a pilot site.*

*The approach presented in this article can be used to form a methodology for solving the problem of creating an effective High-latitude Russian transport system in the Arctic zone of the Russian Federation with forecasting trends in its development.*

**Keywords:** *Transport, transport accessibility, railway infrastructure, Northern latitudinal course, Eastern section, Yamalo-Nenets Autonomous District and Krasnoyarsk Territory*

**Введение.** Экономическое развитие России, территория которой охватывает 11 часовых поясов, и ее государственная целостность тесно связаны с необходимостью постоянного развития транспортной инфраструктуры. Именно на решение этой стратегической задачи направлен ряд документов государственно-стратегического планирования и транспортно-экономического развития страны, в том числе Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. [1] и ее новая редакция с прогнозом на период до 2035 года, утверждена Правительством России в 2021 г. (26.11.2021); Стратегия пространственного развития РФ на период до 2025 года [2], в которой в качестве инструмента реализации указывается «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года» [3]; Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года [4].

Из перечисленных документов следует, что одним из основных способов повышения конкурентоспособности отечественной экономики как важной задачи, стоящей перед государством, является реализация качественных транспортных услуг и использование географического положения страны. При этом основным направлением Стратегии [2] является полицентрическое развитие, направленное на увеличение числа центров экономического роста в Арктической зоне, которую в настоящее время отличает узкоспециализированная экономика, недостаточно развитый рынок труда, низкий уровень инвестиций в инфраструктуру, недостаточная транспортная связанность с административными центрами страны. В результате остается нереализованным высокий транзитный потенциал Российской Федерации.

При этом понятно, что неотъемлемой частью торговых отношений между странами Восточной Азии, Россией и странами Европы (маршруты и плотность следования судов показаны на рисунке 1) является Северный морской путь, который связывает Тихоокеанский и Североатлантический бассейны.

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

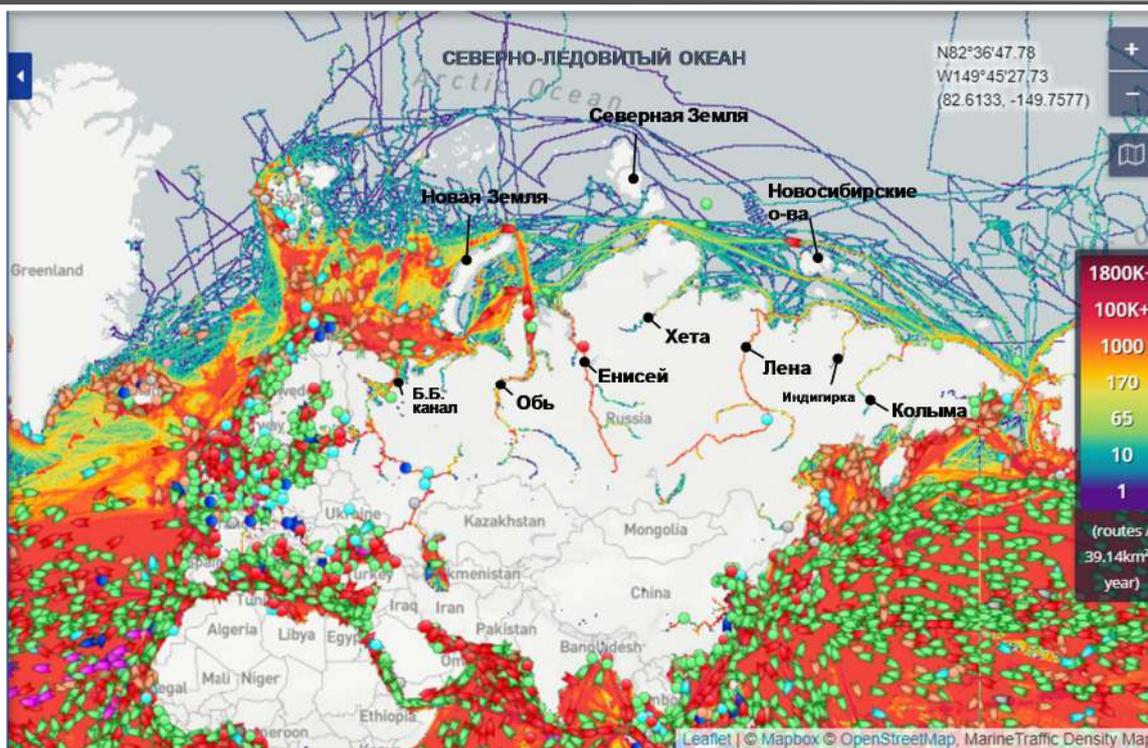


Рисунок 1 – Маршруты и плотность следования судов вокруг Евразийского континента 2019 – 2020 гг. (сайт [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com))

Северный морской путь (СМП) имеет существенный недостаток – замерзающие в зимнее время порты. Поэтому для обеспечения всесезонного транспортного сообщения должна быть развита транспортная инфраструктура и иметь, в дополнение к СМП, следующие элементы: тяготеющий к нему железнодорожный Северный широтный ход (СШХ) по маршруту Салехард – Надым – Коротчаево и далее Игарка – Норильск – Дудинка, меридиональные железнодорожные и речные маршруты (см. рисунок 1). В комплексе они позволят сформировать национальную высокоширотную транспортную систему России в Арктике, интегрированную в систему международных транспортных коридоров.

**Предпосылки развития железных дорог на Крайнем Севере.** На факт необходимости развития путей сообщения в Арктике обращали внимание государственные деятели нашей страны еще в XIX веке. В 1858 г. генерал-губернатор Восточной Сибири Николай Муравьев-Амурский представил фантастический для того времени проект от Волги до Байкала [5]. Полковник Генерального Штаба Николай Волошинов в 1890 г. в собрании Русского географического общества (РГО) утверждал о необходимости сделать Сибирь такой частью России, чтобы люди при этом не ощущали «гнета громадных расстояний» [6].

Председатель комитета финансов (1911 – 1915 гг.) Витте С. Ю. изложил свое видение освоения северных территорий и пути решения этого вопроса в виде конспекта лекций о народном и государственном хозяйстве (1912 г.) [7].

Идеи строительства Северного широтного хода нашли свое отражение в зарисовках Александра Борисова в 1894 г., когда он предпринял путешествие на север на корабле «Ломоносов». По его мнению, Северный широтный ход должен со временем обогнуть по перевозкам Северный морской путь, ему казалось возможным соединить железную дорогу с Китаем и через Берингов пролив с Америкой; Борисов А. А. первым использовал слово «ход» для сухопутной магистрали, чтобы подчеркнуть разницу с морским «путем» [8].

На рубеже XIX и XX вв. транспортная проблема нашей страны была решена строительством Транссиба. Тем самым были заложены основы устойчивого функционирования развития экономики, сформированы условия для интеграции населения не только в хозяйственные процессы, но и в формирование особой модели культурной среды [9].

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

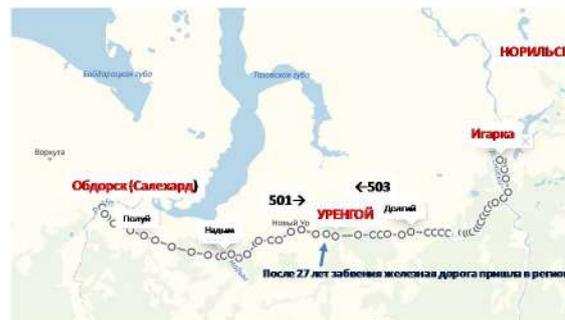
Двадцатый век для нашей страны – это век развития инфраструктуры в арктических регионах (в Заполярье), становление точек роста и их транспортной доступности.

Современная история экспедиций в регион началась с 20-х гг. XX в. деятельностью первооткрывателя Норильска (рисунок 1, а), исследователя Таймыра, Хатангского залива, полуострова Юрунг-Тумус, бухты Нордвик и других географических объектов Николая Урванцева [10]. Урванцев Н. Н. проводил в том числе экспедиции на тракторах из Дудинки в Норильск [9, 10] – рисунок 2. В истории Северного морского пути, описанной Михаилом Беловым, отмечено, что при геологоразведочных работах уже в то время использовались геофизические методы. Для охвата больших площадей в низовьях Енисея еще в 1939 г. широко применялись такие методы, как гравитационная разведка, сейсмометрия, магнитометрия и электроразведка [11].



а

Дом-музей Н. Н. Урванцева постройки 1921 г.  
в Норильске (фото Зайцева А. А. 2019 г.)



б

Схема линии Салехард – Игарка,  
1949 – 1953 гг.

Рисунок 2 – Дом-музей Н. Н. Урванцева и схема линии Салехард – Игарка

С открытием полезных ископаемых в северных арктических районах вопрос о развитии сети железных дорог становится первостепенным. После окончания Великой Отечественной войны в 1947 г. тяжелым трудом заключенных началось строительство Трансполярной магистрали (501-я и 503-я стройки) от станции Чум (Республика Коми) до города Игарки Красноярского края (рисунок 1, б). Значительная часть инфраструктуры дороги была возведена по облегченным нормам даже для того времени, но потребовала значительных средств на ее завершение и ввод в эксплуатацию. В 1953 г. решением правительства строительство прекратилось, а в эксплуатацию был сдан только участок Чум – Лабытнанги западнее р. Обь.

## Особенности железнодорожного строительства в условиях российского Заполярья.

Из современного опыта освоения ряда месторождений следует, что железная дорога в силу ее всесезонности в сложных природных условиях Арктики является наилучшей альтернативой всем другим средствам сообщения при разработке природных месторождений.

Обращаясь к опыту строительства железных дорог на полуострове Ямал, можно отметить более сложные природно-климатические условия полуострова, чем в направлении Надым-Пур-Тазовского района. Это накладывает особые ограничения и требования к развитию транспортной инфраструктуры, которые были выявлены в ходе научного сопровождения строящихся на Ямале железнодорожных линий. В частности, ученые РУТа (МИИТа) выполняли и выполняют научное сопровождение проектирования, строительства и эксплуатации Ямальской железнодорожной линии Обская – Бованенково – Карская, начиная с 1986 г. Уникальность этой линии состоит не только в том, что она построена за Полярным кругом, но и в том, что при ее строительстве многие решения были предложены учеными впервые. При проектировании и строительстве этой линии необходимо учитывать условия сохранения многолетнемерзлых грунтов в основании. Для обеспечения устойчивости насыпей была разработана и применена послойная система термоизоляции грунтовых слоев в обоймах из геосинтетических материалов.

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Как и при строительстве Байкало-Амурской магистрали (БАМа), часть первоначально принятых решений при строительстве железнодорожной линии Обская – Бованенково – Карская корректировали в ходе выполнения работ в связи с выявлением новых особенностей, возможностей подрядных организаций, накоплением опыта. Эти решения, принятые в ходе научного сопровождения, отрабатывались непосредственно в ходе строительства и имели целью оптимальное или близкое к оптимальному использование ресурсов. В целях ускорения внедрения новых конструктивно-технологических решений учеными было предложено отрабатывать последние на экспериментальном участке (разъезд Хралов – ст. Сохонто). Затем наиболее эффективные из них распространять на последующие участки трассы.

К таким решениям можно отнести замену металлических гофрированных труб на гладкие газовые стальные трубы; замену массивных лекальных бетонных блоков под концевыми участками труб на противодиффузионные экраны из цементно-грунтовой смеси; использование специальных «продухов», в том числе с применением каркасных габионных конструкций; технологию укладки труб с устройством основания из крупнообломочных грунтов а также устройством фундамента опор мостов из буронабивных свай с обсадными трубами и камуфлетными уширенными [12].

Одной из проблем, возникающих при производстве работ в Арктической зоне РФ, в частности, на полуострове Ямал, являются внезапные изменения погоды, влекущие за собой остановку работы или необходимость выполнения дополнительных объемов работ. Например, снежные заносы создают дополнительные объемы работ по расчистке снега перед выгрузкой балласта [13].

На рисунке 3 приведены относительные стоимостные показатели строительства некоторых железных дорог в северных районах и их протяженность [14].

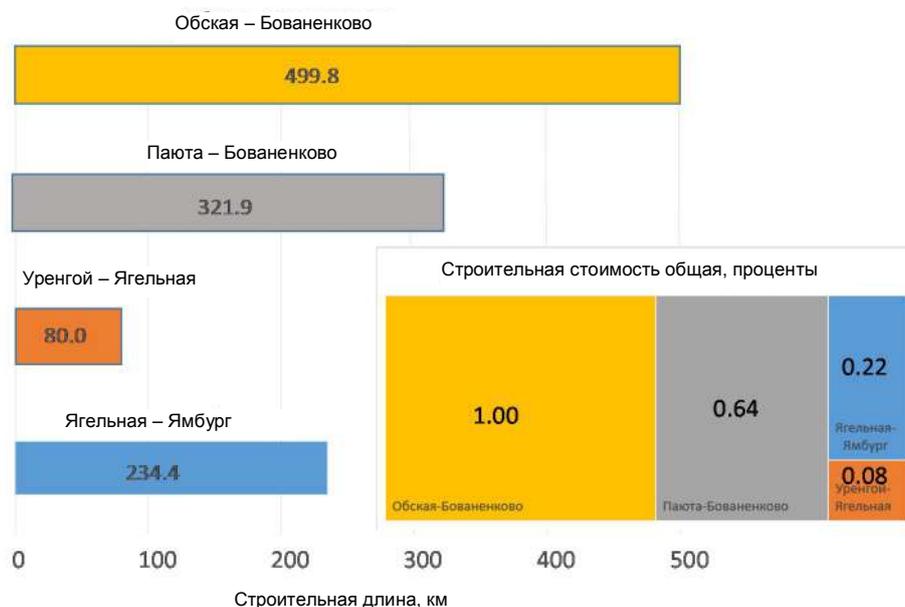


Рисунок 3 – Протяженность и относительные стоимостные показатели строительства некоторых железных дорог в северных районах

Значительные объемы земляных работ на этих линиях приводят к их высокой стоимости, достигающей 50 % от общей стоимости строительства железной дороги. Так, затраты на эксплуатацию машин, занятых на земляных работах, в этих условиях составляют около 85 % от себестоимости разработки грунта [14]. Отсюда ясно, что одним из реальных путей снижения себестоимости производства работ в сложных природных условиях Арктики является использование обоснованных конструктивных, организационно-технологических решений в сочетании с рациональным использованием технических средств, максимально пригодных для работы в условиях Заполярья.

Систематическая и целенаправленная работа по исследованию и получению обобщенных результатов, которые можно было использовать при строительстве железных дорог в сложных инженерно-геологических и природно-климатических условиях, была начата в 50-е гг. [15 – 18]. Работы проводились сотрудниками ВНИИ транспортного строительства (ЦНИИСа) и принадлежащих ему Сковородинской (Тындинской) мерзлотной станции и Новосибирского филиала института (СибЦНИИСа). Широко известны труды сотрудников лабораторий сооружения и конструкций земляного полотна, водоотводных и противоналедных сооружений, инженерного мерзлотоведения, сооружения железнодорожного пути в заполярной тундре, сооружения верхнего строения пути.

Разработка технологических схем отсыпки земляного полотна, монтажа водопропускных сооружений, устройства верхнего строения пути в сложных природно-климатических условиях велась институтом ВПТИТрансстрой, проектирование производства работ осуществлялось трестами, выполнявшими соответствующие виды работ – Ямалтрансстроем, Севстроймеханизацией, Тюменьтрансстроем и др. Так, было установлено, что, несмотря на отсутствие противодеформационных мероприятий, направленных на сохранение мерзлого состояния грунтов, земляное полотно не всегда было подвержено деформациям. Они возникали в местах скопления поверхностных вод вблизи земляного полотна, если водоотводные сооружения были в неисправном состоянии, или в случае использования для сооружения земляного полотна переувлажненных глинистых грунтов, а также при отсутствии укрепления откосов и недостаточной толщине балластного слоя.

К 1962 г. были регламентированы вопросы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог в районах вечной мерзлоты на основе опыта строительства железных дорог в Заполярье, в том числе в условиях тундры [17], проявилась необходимость более детального изучения ряда вопросов, в том числе способов механизированной разработки мерзлых грунтов. Были выполнены методические разработки и решен ряд вопросов по конструкциям земляного полотна, противодеформационным мероприятиям, по технологии механизированного производства земляных работ. Их обоснованность была проверена позже при выполнении проектно-изыскательских и строительных работ при сооружении Байкало-Амурской магистрали. Были изданы рекомендации и справочники в помощь строителям БАМа [18 – 20]. В ряде работ кроме предложений по конструкциям земляного полотна и способам сохранения вечной мерзлоты (строительство по принципу I) даны указания по времени производства земляных работ. Но, как и в работах, вышедших в 30-х – 40-х гг. XX в., в этой работе здесь также отсутствовала технико-экономическая оценка и указание на необходимость рассмотрения нескольких альтернативных вариантов, обеспечивающих эксплуатационную надежность земляного полотна.

В 70-х – 80-х гг. в качестве основной причины наиболее распространенного вида деформаций уже четко указывается оттаивание многолетнемерзлых (вечномерзлых) грунтовых оснований (ММГ (ВМГ)) вследствие нарушения их естественного теплового режима. Появляются исследования по усовершенствованию технологии работ по устройству водоотводных канав типовой конструкции, принимается принципиально новое техническое решение – поперечный пропуск поверхностной воды (взамен продольного отвода по водоотводным канавам) с помощью фильтрующих насыпей и дренирующих прорезей.

Практика хозяйственного освоения районов с ММГ привела к необходимости развития теории об общих закономерностях развития мерзлых пород и ее практической реализации в виде инженерного мерзлотоведения, где изучаются изменения мерзлотных условий при строительстве на ММГ.

Следует особо выделить работы, которые выполнил Цернант А. А., который обосновал возможность использования мерзлых грунтов для возведения земляного полотна в криолитозоне и изложил методы управления тепловыми процессами в рамках экосистемного подхода; предложил апробированные им на железнодорожных линиях Ягельная – Ямбург и Обская –

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Бованенково организационно-технологические схемы сооружения земляного полотна, которые позволили перейти к круглогодичному строительству с перераспределением технологических операций по сезонам года. Эти схемы позволили увеличить долю объемов земляных работ, выполняемых в зимнее время, до 60 – 70 %.

**Современное экспедиционное изучение транспортных объектов в ЯНАО и на севере Красноярского края.** Аношкин Д. С. (подразделение промышленной логистики и аутсорсинга АО «РЖД») на Форуме Ассоциации полярников в декабре 2020 г. отметил, что для эффективного функционирования СМП, который имеет протяженность в 5770 морских миль, необходима эффективная его «поддержка» за счет работы портов Запада и Востока: Мурманск, Владивосток, Петропавловск-Камчатский, а также на пути следования судов: Варандей, Сабетта (рисунок 4), Дудинка, Тикси, Певек. Активное наполнение объемов перевозок в направлении на восток происходит за счет сжиженного природного газа, железорудного концентрата, сырой нефти, газоконденсата. С востока на запад идут уголь, светлые нефтепродукты, контейнерные грузы, в пределах России – перевозки никелевого файнштейна из Норильска в Мурманск на переработки. Маршруты и плотность следования судов вокруг полуострова Ямал в 2019 – 2020 гг. показаны на рисунке 4.

Для развития железнодорожных перевозок в Арктическом регионе, в частности, в ЯНАО, появления «связующего звена» между Северной и Свердловской железными дорогами важнейшее значение имеют развитие и реализация проекта СШХ, основными целями которого являются обеспечение пропускной способности до 24 млн т груза, сокращение протяженности транспортных маршрутов от месторождений к северным портам, а также развитие Арктической зоны Российской Федерации – уход от так называемого «Нулевого варианта» [21].

Будущие вызовы – это возвращение к активному строительству в Междуречье Пур – Таз – Енисей и на правом берегу Енисея. Так, в октябре 2020 г. состоялось открытие автодорожного Пуровского моста, важного для региона объекта, который был построен за два года. Этот мост через реку Пур обеспечивает круглогодичное сообщение с «Большой землей» для жителей поселка Уренгой, Тазовского и Красноселькупского районов, где проживают около 20 тыс. человек. Кроме того, обеспечивается непрерывный доступ к 50 месторождениям для нефтегазовых компаний [22].

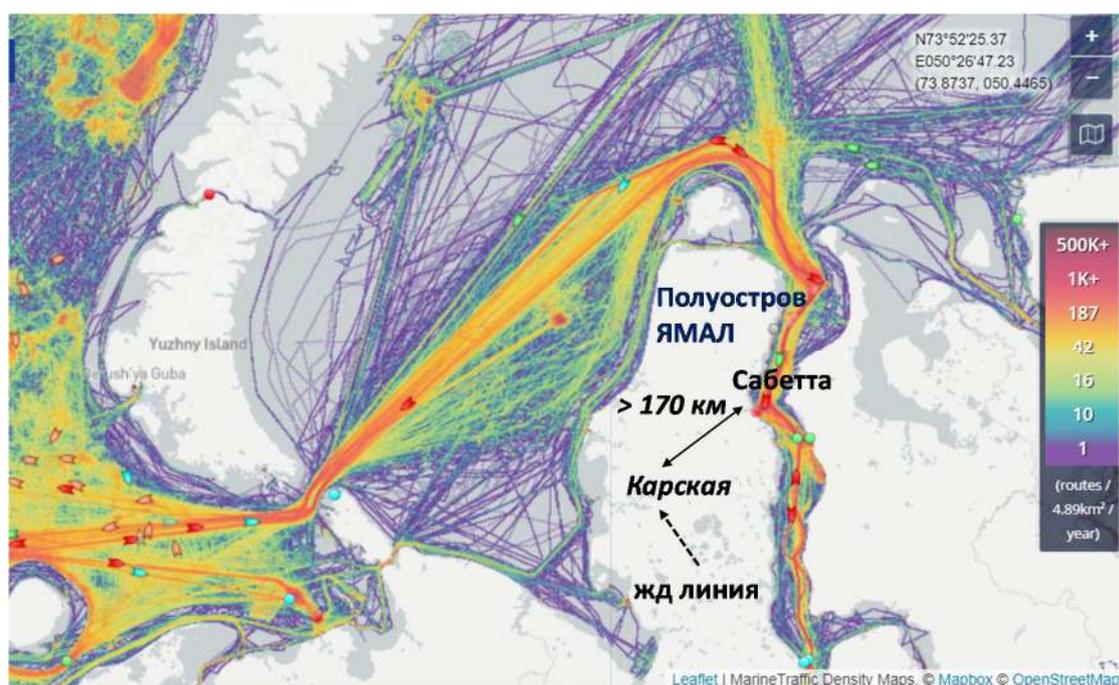


Рисунок 4 – Маршруты и плотность следования судов вокруг полуострова Ямал 2019 – 2020 гг. (сайт [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com))

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Трасса железной дороги Чум – Салехард – Игарка протяженностью 1482 км на заболоченных пространствах, в тундре, в районах распространения многолетнемерзлых грунтов проходила через реки Обь, Надым, Пур, Таз, Енисей, через единственный небольшой город Обдорск (Салехард) и пять населенных пунктов (Янгйюган, Надым, Уренгой, Янов Стан). Строительство этой магистрали в период 1949 – 1953 гг. велось на основе имеющихся в то время скурых данных по мерзлотным грунтовым условиям. При сооружении земляного полотна нарушалось естественное состояние ММГ, в результате начиналось их обводнение и протаивание и, как следствие, деформации земляного полотна. В 1953 г., как уже отмечалось, строительство Полярной магистрали Салехард – Игарка было прекращено. И все же в 80-е гг. XX в. железная дорога пришла в регион. Участок железной дороги Тюмень – Сургут – Уренгой (Нижневартовск) стал транспортным стержнем всего края. Вслед за развитием инфраструктуры железной дороги началось строительство городов, автомобильных дорог, интенсивное освоение месторождений.

Возродился интерес к Полярной магистрали: в 2005 г. по поручению ОАО «РЖД» учеными РУТа (МИИТа) был обследован восточный участок Полярной магистрали Салехард – Игарка. Результаты этой масштабной экспедиции (в работе были задействованы три отряда, каждый из которых обследовал порученный ему участок магистрали) были представлены в книге Полярная магистраль [24]. Западный участок магистрали обследован по заказу Министерства транспорта России в 2012 г.

В начале 2019 г. руководством университета принято решение об участии сотрудников и ученых РУТа (МИИТа) в Трансполярной экспедиции Русского географического общества (РГО) – рисунок 5.



Рисунок 5 – Участники совместной Трансполярной экспедиции РГО, Института пути, строительства и сооружений РУТа (МИИТа), осень 2019 г.

Перед экспедицией была поставлена задача выполнить рекогносцировку местности и организовать сеть геомониторинга возможной трассы железной дороги от Уренгоя к Норильскому промышленному району. В апреле этого же года результаты первого этапа экспедиции были доложены на заседании попечительского совета РГО с участием Президента России, а также в сюжетах телерадиокомпании РТР [25, 26].

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Следует отметить, что вопросы проработки вариантов трассы от Уренгоя к Норильскому промышленному району требуют проведения общественных слушаний по данному проекту с участием местного населения: на севере Красноярского края, в частности, в Туруханском районе компактно проживают кеты (Келог), селькупы (Фарково, Баиха), эвенки (Советская Речка), долгане (Сургутиха). В ходе проведенных нескольких этапов Трансполярной экспедиции состоялись беседы с представителями населения и администрации Туруханска, Старотуруханска, Игарки и, конечно, Норильска. Оказалось, что необходимость и возможность строительства железной дороги в регион постоянно обсуждается и население надеется на положительную динамику в этом вопросе.

На маршруте экспедиции кроме создания геомониторинговой сети экспресс-методом выполнялись полевые исследования грунтов. Лабораторные испытания отобранных в ходе экспедиции образцов грунтов показали, что они имеют высокую влажность, что сказывается на прочностных свойствах глинистых грунтов.

Основным результатом проведенной экспедиции явилась организация сети геомониторинга; в ходе четырех этапов экспедиции с ее использованием получены температурные данные за две продолжительные зимы. Мониторинг осуществляется по 22-м скважинам, заложенным в ходе второго этапа экспедиции, с помощью регистраторов НОВО (рисунок 6).

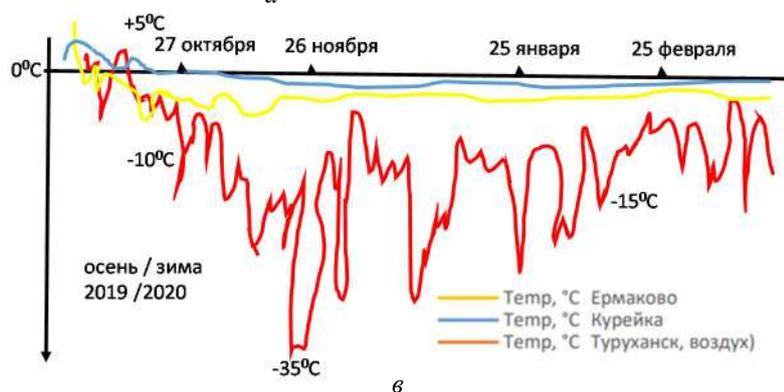


Проезд маршрута на снегоболотоходе «Тайга» Динамическое зондирование грунта



б

Регистратор данных НОВО



в

Абрис температурного ряда (точки мониторинговой сети в Ермаково, Курейке, Туруханске)

Рисунок 6 – Работы, техника и оборудование экспедиций

Известно, что за последние 20 – 25 лет температура воздуха в Арктическом регионе повысилась на 0,2 – 2,5 °С. Повышение температуры в верхних горизонтах мерзлых пород за этот период достигает 1,0 – 1,5 °С и распространяется до глубины 60 – 80 м. Следует отметить влияние освоения территории на мерзлотно-геологические условия площадок застройки, которое состоит в основном в увеличении глубины деятельного слоя после возведения насыпей

и влажности из-за изменения условий поверхностного стока. Эти два явления характерны для освоенных территорий и приводят к существенным деформациям пучения малонагруженных свайных фундаментов, в частности, эстакад и других открытых сооружений.

В результате анализа полученных в ходе экспедиции с использованием сети геомониторинга графиков изменения температур грунтов и воздуха предлагается выделить три однородных зоны с соответствующими рекомендациями по принципам проектирования и строительства:

I зона – Норильск и Дудинка; по данным геомониторинга температур грунтов в районе Норильска получено, что датчик, установленный на глубине 0,5 м, регистрирует наиболее низкие отрицательные температуры из всех 22 скважин. В ходе этапа экспедиции 23.09.2019 в процессе бурения на глубине 3 м вскрылась серая глина с включением льда. Имеет место сплошное распространение многолетнемерзлых грунтов, их средняя температура составляет от  $-5$  до  $-9$  °С. Это позволяет рекомендовать к дальнейшему использованию в зоне Норильска и Дудинки I принцип проектирования и строительства объектов на многолетнемерзлых грунтах – с сохранением грунтов оснований сооружений в мерзлом состоянии.

II зона (тундра) – территории вблизи Сузунского, Ванкорского, Тагульского месторождений, Игарский район. В процессе бурения грунта при формировании геомониторинговой сети здесь на глубине 5 м были вскрыты грунты с включением льда, имеет место сплошное распространение ММГ с отдельными включениями таликов. Проектирование и строительство объектов здесь также рекомендуется по I принципу; в то же время с учетом долгосрочных прогнозов изменений климата возможна дальнейшая деградация мерзлых грунтов основания. В связи с этим для предотвращения деформаций следует применять технические решения, способствующие сохранению грунта в мерзлом состоянии, например, технологию термостабилизации с использованием сезонных охлаждающих устройств (СОУ). В период отрицательных температур холод аккумулируется в основании, и в летний период он поддерживает грунты в мерзлом твердом состоянии, из-за чего устойчивость сооружений существенно повышается.

III зона – Ермаково, Курейка, Туруханск, Уренгой, Русское месторождение и река Русская (зона достаточно обширная и в дальнейшем будет дифференцирована). Из всех 22 точек геомониторинга, организованных экспедицией, в данной местности получены самые высокие температуры грунтов и воздуха. В этой зоне установлено наличие прерывистой мерзлоты (встречаются талые участки). Имеет место высокотемпературная мерзлота: температура мерзлого грунта составляет от 0 до  $-2$  °С. С учетом этого при проектировании и строительстве здесь рекомендуется и используется как I принцип, так и II – с допущением оттаивания ММГ и укреплением грунтов основания [27 – 29].

Таким образом, в ходе научного сопровождения проектирования, строительства и эксплуатации, а также прогнозирования развития транспортной инфраструктуры в Арктическом регионе учеными РУТа (МИИТа) предлагается использовать для отработки новых конструктивно-технологических решений их апробацию на небольшом участке трассы, переводя его в статус опытно-экспериментального. В случае успешной реализации эти решения могут учитываться и использоваться в ходе развития транспортной инфраструктуры в Арктике.

Предпринят ряд экспедиций для изучения особенностей условий строительства, включая климатические и инженерно-геологические, а также для оценки состояния существующих транспортных объектов (Полярная магистраль Салехард – Игарка). Это обследовательские экспедиции 2005, 2012 гг., а также совместные экспедиции с Русским географическим обществом с участием ученых Института пути, строительства и сооружений РУТа (МИИТа) в 2019 – 2021 гг., в ходе которых

организована сеть геомониторинга (22 скважины);

получены данные по температурам в воздушной, приповерхностной зонах и в грунтовой среде;

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

проведен анализ грунтовой среды, результаты которого отражены в отчете по основному этапу экспедиции;

даны рекомендации по особенностям строительства транспортных объектов, включая возведение земляного полотна, с использованием разных вариантов технических и конструктивно-технологических решений;

проанализированы варианты мероприятий по обеспечению устойчивости основания земляного полотна, показано влияние различных технологий усиления грунтов основания земляного полотна на их физико-механические и теплофизические характеристики;

уточнены особенности инженерно-геологических условий исследуемого региона.

Выполняемая учеными Института пути, строительства и сооружений РУТа (МИИТа) совместно с Русским географическим обществом работа позволит дать обоснованные рекомендации по вариантам развития новой железнодорожной линии Северный широтный ход (Салехард – Надым – Коротчаево) далее на северо-восток до Норильска и Дудинки.

Представленный в настоящей статье подход может быть использован для формирования методики решения задачи создания эффективной Высокоширотной российской транспортной системы в Арктической зоне РФ с прогнозированием трендов ее развития.

Коллектив авторов выражает благодарность Департаменту экспедиционной деятельности и развития туризма Русского географического общества (РГО), директору Департамента Чечулину Сергею Анатольевичу за организацию и реализацию экспедиций по проекту «Трансполярная магистраль» и неоценимую поддержку в развитии сотрудничества РГО и Российского университета транспорта (МИИТа).

### *Список литературы*

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-п // [garant.ru](http://garant.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/94460/> (дата обращения: 25.10.2021).

2. Стратегия пространственного развития РФ на период до 2025 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 207-п // [garant.ru](http://garant.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72074066/> (дата обращения: 25.10.2021).

3. Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года. Утвержден распоряжением правительства Российской Федерации от 30 сентября 2018 г. № 2101-п // [static.government.ru](http://static.government.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://static.government.ru/media/files/MUNhgWFddP3UfF9RJASDW9VxP8zwcB4Y.pdf> (дата обращения: 25.10.2021).

4. Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. Утверждена Указом Президента РФ от 26.10.2020 № 645 // [garant.ru](http://garant.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74710556/> (дата обращения: 25.10.2021).

5. Юдин, А. В. Транссибирская магистраль. Путеводитель / А. В. Юдин. – Москва : ООО «Красивая страна», 2007. – С. 5 – 14. – Текст : непосредственный.

6. Хобта, А. В. Строительство Транссиба: очерки истории (конец 19 – начало 20 в.) / А. В. Хобта. – Иркутск : Земля Иркутская, 2009. – 383 с. – Текст : непосредственный.

7. Витте, С. Ю. Конспект лекций о народном и государственном хозяйстве, читаемых Его Императорскому Высочеству Великому Князю Михаилу Александровичу в 1900 – 1902 гг. – Санкт-Петербург, 1912. – 572 с. – Текст : непосредственный.

8. Экономика современной Арктики: в основе успешности эффективное взаимодействие и управление интегральными рисками : монография / под научной редакцией В. А. Крюкова,

Т. П. Скуфьиной, Е. А. Корчак. – Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2020. – 245 с. – Текст : непосредственный.

9. Колумб Севера. Как Николай Урванцев нанес на карту русскую Арктику // lenta.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://lenta.ru/articles/2016/05/08/urvantsev/> (дата обращения: 25.10.2021).

10. Урванцев, Н. Н. Открытие Норильска / Н. Н. Урванцев. – Москва : Наука, 1981. – 176 с. – Текст : непосредственный.

11. Белов, М. И. История открытия и освоения Северного морского пути / М. И. Белов. – Москва : Гидрометеорологическое издательство, 1969. – Т. 4. – 612 с. – Текст : непосредственный.

12. Строительство путей сообщения на Севере : научно-практическое издание / С. Я. Луцкий, Т. В. Шепитько, П. М. Токарев, А. Н. Дудников. – Москва : ЛАТМЭС, 2009. – 286 с. – Текст : непосредственный.

13. Нак, И. В. Методы организации и технологии строительно-путевых работ в условиях Заполярья : специальность 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нак Игорь Владимирович. – Московский гос. ун-т путей сообщения (МИИТ). – Москва, 2003. – 24 с. – Текст : непосредственный.

14. Жинкин, Г. Н. Особенности строительства железных дорог в районах распространения вечной мерзлоты и болот : учебное пособие / Г. Н. Жинкин, И. А. Грачев. – Москва : УМК МПС России, 2000. – 420 с. – Текст : непосредственный.

15. Суходольский, Б. И. О сооружении железнодорожного полотна в условиях северных районов области вечной мерзлоты / Б. И. Суходольский // Тр. ин-та мерзлотоведения АН СССР. – Москва : АН СССР, 1945. – Т. II. – 215 с. – Текст : непосредственный.

16. Перетрухин, Н. А. Вопросы проектирования и возведения железнодорожного земляного полотна в районах вечной мерзлоты / Н. А. Перетрухин // Вопросы транспортного строительства в районах вечной мерзлоты. Сообщение № 121. – Москва : ЦНИИС, 1968. – С. 5–23. – Текст : непосредственный.

17. Изыскания и проектирование трассы Байкало-Амурской магистрали / под ред. Д. И. Федорова. – Москва : Транспорт, 1977. – 280 с. – Текст : непосредственный.

18. Сессаревский, А. Н. Пособие строительному мастеру и производителю работ по укладке и балластировке пути / А. Н. Сессаревский, А. Р. Костюкович, И. Д. Уланцев. – Москва : Транспорт, 1978. – 183 с. – Текст : непосредственный.

19. Цвелодуб, Б. И. Наставление по сооружению земляного полотна и верхнего строения пути. Ч. 1. Земляное полотно. В помощь строителям БАМа / Б. И. Цвелодуб, Г. С. Переселенков, В. П. Чернавский. – Москва : Оргтрансстрой, Минтрансстрой, 1976. – 323 с. – Текст : непосредственный.

20. СП 25.13330.2012 (СниП II–18–76. Строительные нормы и правила. Ч. II. Нормы проектирования). Гл. 18. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – Москва : НИИОСП им. Герсевича, 2012. – 118 с. – Текст : непосредственный.

21. Сценарии развития арктического региона (2020 – 2035 гг.) / К. С. Зайков, Н. А. Кондратов, Е. В. Кудряшова [и др.]. – Текст : непосредственный // Арктика и Север. – 2019. – № 35. – С. 5–24.

22. Мост через реку Пур открылся на Ямале // trans.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://trans.ru/news/most-chez-pur-v-ya-nao-otkroyut-16-oktyabrya> (дата обращения: 25.10.2021).

23. Сериков, С. Г. Влияние температурных колебаний на условия проживания населения северных окраин Сибири. Современные проблемы регионального развития / С. Г. Сериков. – Биробиджан : Институт комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения РАН, 2016. – С. 471–474. – Текст : непосредственный.

24. Полярная магистраль / под общ. ред. Т. Л. Пашковой. – Москва : Вече, 2007. – 448 с. – Текст : непосредственный.

25. Выступление Сергея Шойгу на заседании попечительского совета Русского географического общества (23 апреля 2019 г., Санкт-Петербург). – Текст : электронный. – URL: <https://www.rgo.ru/ru/article/vystuplenie-sergeya-shoygu-na-zasedanii-opечitel'skogo-soveta-russkogo-geograficheskogo-4> (дата обращения: 25.10.2021).

26. Шадринцев, Б. Здесь проходил Семен Дежнев : «Вести Ямал» вместе с РГО отправились по пути легендарной 503-й стройки. Видеосюжет Вести – Ямал 24 апреля 2019 г. – URL: [https://vesti-yamal.ru/ru/vjesti\\_jamal/istoriya177440](https://vesti-yamal.ru/ru/vjesti_jamal/istoriya177440) (дата обращения: 25.10.2021).

27. Перспективы развития транспортной инфраструктуры Арктического региона: участок от Уренгоя до Норильского промышленного района / Т. В. Шепитько, А. А. Зайцев [и др.]. – Текст : непосредственный // IX международный форум. Арктика: настоящее и будущее : сборник докладов. – Санкт-Петербург : АСПОЛ, 2019. – С. 220–224.

28. Организация сети геомониторинга для оценки возможности развития инфраструктуры железнодорожного транспорта / Т. В. Шепитько, А. А. Зайцев, И. В. Нестеров [и др.]. – Текст : непосредственный // X международный форум. Арктика: настоящее и будущее : сборник докладов. – Санкт-Петербург : АСПОЛ, 2020. – С. 351–352.

29. Зайцев, А. А. Исследование грунтов основания Красноярского края и способ их усиления / А. А. Зайцев, И. А. Артюшенко. – Текст : электронный // Транспортные сооружения, 2020. – № 1. – URL: <https://t-s.today/PDF/01SAT5120.pdf> (дата обращения: 25.10.2021).

### References

1. *Transportnaia strategiia Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 22 noiabria 2008 g. № 1734-r* (Transport strategy of the Russian Federation until 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1734-r dated November 22, 2008), Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/94460/> (accessed 25 October 2021).

2. *Strategiia prostranstvennogo razvitiia RF na period do 2025 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 13 fevralia 2019 g. № 207-r* (Spatial development strategy of the Russian Federation for the period up to 2025. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 207-r dated February 13, 2019), Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72074066/> (accessed 25 October 2021).

3. *Kompleksnyi plan modernizatsii i rasshireniia magistral'noi infrastruktury na period do 2024 goda. Utverzhden rasporyazheniem pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 30 sentiabria 2018 g. № 2101-r* (A comprehensive plan for the modernization and expansion of the backbone infrastructure for the period up to 2024. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 2101-r dated September 30, 2018), Available at: <http://static.government.ru/media/files/MUNhgWFddP3UfF9RJASDW9VxP8zwcB4Y.pdf> (accessed 25 October 2021).

4. *Strategiia razvitiia Arkticheskoi zony RF i obespecheniia natsional'noi bezopasnosti na period do 2035 goda. Utverzhdena Ukazom Prezidenta RF ot 26.10.2020 № 645* (Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035. Approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 645 dated 26.10.2020), Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74710556/> (accessed 25 October 2021).

5. Yudin A. V. *Transsibirskaya magistral'. Putevoditel'* (Trans-Siberian railway. Travel Guide). Moscow: LLC "Beautiful country" Publ., 2007, pp. 5 – 14.

6. Khobta A. V. *Stroitel'stvo Transsiba: ocherki istorii (konets 19 – nachalo 20 v.)* [Construction of the Trans-Siberian Railway: Essays on History (late 19th – early 20th century)]. Irkutsk: Irkutsk Land Publ., 2009, 383 p.

7. Vitte S. Yu. *Konspekt lektsii o narodnom i gosudarstvennom khoziaistve, chitaemykh Ego Imperatorskomu Vysochestvu Velikomu Kniaziiu Mikhailu Aleksandrovichu v 1900 – 1902 gg.* (Summary of lectures on national and state economy delivered to His Imperial Highness Grand Duke Mikhail Alexandrovich in 1900 – 1902). Saint Petersburg : JSC Brockhaus-Efron Publ., 1912, 572 p.

8. Kriukov V. A., Skufina T. P., Korchak E. A. ed. *Ekonomika sovremennoi Arktiki: v osnove uspekhov effektivnoe vzaimodeistvie i upravlenie integral'nymi riskami : monografiia* (The economy of the modern Arctic: the basis of success is effective interaction and integrated risk management : monograph). Apatites: FITC KNC RAS Publ., 2020, 245 p.
9. *Kolumb Severa. Kak Nikolai Urvantsev nanes na kartu russkuiu Arktiku* (Columbus of the North. How Nikolai Urvantsev mapped the Russian Arctic), Available at: <https://lenta.ru/articles/2016/05/08/urvantsev/> (accessed 25 October 2021).
10. Urvantsev N. N. *Otkrytie Noril'ska* (Opening of Norilsk). Moscow: Nauka Publ., 1981, 176 p.
11. Belov M. I. *Istoriia otkrytiia i osvoeniia Severnogo morskogo puti* (The history of the discovery and development of the Northern Sea Route). Moscow: Hydrometeorological Publishing House, 1969, vol. 4, 612 p.
12. Lutskaa S. Ia., Shepit'ko T. V., Tokarev P. M., Dudnikov A. N. *Stroitel'stvo putei soobshcheniia na Severe : nauchno-prakticheskoe izdanie* (Construction of communication routes in the North : a scientific and practical publication). Moscow: LATMES Publ., 2009, 286 p.
13. Nak I. V. *Metody organizatsii i tekhnologii stroitel'no-putevykh rabot v usloviakh Zapoliar'ia* (Methods of organization and technologies of construction and track work in the Arctic). Doctor's thesis abstract, Moscow, MIIT, 2003, 24 p.
14. Zhinkin G. N., Grachev I. A. *Osobennosti stroitel'stva zheleznykh dorog v raionakh rasprostraneniia vechnoi merzloty i bolot : uchebnoe posobie* (Features of railway construction in permafrost and swamp areas : textbook). Moscow: UMK MPS of Russia Publ., 2000, 420 p.
15. Sukhodol'skii B. I. *O sooruzhenii zheleznodorozhnogo polotna v usloviakh severnykh raionov oblasti vechnoi merzloty* (About the construction of a railway track in the conditions of the northern regions of the permafrost region). Moscow: USSR Academy OF Sciences Publ., 1945, vol. II, 215 p.
16. Peretrukhin N. A. Issues of design and construction of railway roadbed in permafrost areas [Voprosy proektirovaniia i vozvedeniia zheleznodorozhnogo zemlianogo polotna v raionakh vechnoi merzloty]. *Voprosy transportnogo stroitel'stva v raionakh vechnoi merzloty. Soobshchenie № 121 – Issues of transport construction in permafrost areas. Message No. 121*. Moscow: TSNIIS Publ., 1968, pp. 5 – 23.
17. Fedorov D. I. ed. *Izyskaniia i proektirovanie trassy Baikalo-Amurskoi magistrali* (Surveys and design of the Baikal-Amur Highway). Moscow: Transport Publ., 1977, 280 p.
18. Sessarevskii A. N., Kostiukovich A. R., Ulantsev I. D. *Posobie stroitel'nomu masteru i proizvoditeliu rabot po ukladke i ballastirovke puti* (Manual for a construction foreman and a manufacturer of works on laying and ballasting the track). Moscow: Transport Publ., 1978, 183 p.
19. Tselodub B. I., Pereselenkov G. S., Chernavskii V. P. *Nastavlenie po sooruzheniiu zemlianogo polotna i verkhnego stroeniia puti. Ch. I. Zemlianoie polotno. V pomoshch' stroiteliam BAMa* (Instruction on the construction of the roadbed and the upper structure of the path. Part 1. The roadbed. To help the builders of BAM). Moscow: Orgtransstroii, Mintransstroii Publ., 1976, 323 p.
20. *SP 25.13330.2012 (SniP II–18–76. Stroitel'nye normy i pravila. Ch.II. Normy proektirovaniia). Gl. 18. Osnovaniia i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh* [SP 25.13330.2012 (SniP II-18-76. Building codes and regulations. Part II. Design standards). Chapter 18. Foundations and foundations on permafrost soils]. Moscow, NIIOSP im. Gersevanova Publ., 2012, 118 p.
21. Zaikov K. S., Kondratov N. A., Kudryashova E. V., Lipina S. A., Chistobaev A. I. Scenarios for the development of the Arctic region (2020 – 2035) [Stsenarii razvitiia arkticheskogo regiona (2020 – 2035 gg.)]. *Arktika i Sever – Arctic and North*, 2019, no. 35, pp. 5 – 24.
22. *Most cherez reku Pur otkrylsia na Yamale* (The bridge over the Pur River opened in Yamal), Available at: <https://trans.ru/news/most-cherez-pur-v-yanao-otkroyut-16-oktyabrya> (accessed 25 October 2021).
23. Serikov S. G. *Vliianie temperaturnykh kolebaniy na usloviia prozhivaniia naseleniia severnykh okrain Sibiri. Sovremennye problemy regional'nogo razvitiia* (The influence of temperature fluctuations on the living conditions of the population of the northern outskirts of Siberia. Modern problems of regional development). Birobidzhan: Institute of Complex Analysis of Regional Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2016, pp. 471 – 474.

24. Pashkova T. L. ed. *Poliarnaia magistral'* (Polar Highway). Moscow: Veche Publ., 2007, 448 p.

25. Vystuplenie Sergeia Shoigu na zasedanii popechitel'skogo soveta Russkogo Geograficheskogo Obshchestva (23 apreliia 2019 g., Sankt-Peterburg) [Sergey Shoigu's speech at the meeting of the Board of Trustees of the Russian Geographical Society (April 23, 2019, St. Petersburg)], Available at: <https://www.rgo.ru/ru/article/vystuplenie-sergeya-shoigu-na-zasedanii-opechitel'skogo-soveta-russkogo-geograficheskogo-4> (accessed 25 October 2021).

26. Shadrin'tsev, B. Zdes' prokhodil Semen Dezhnev : «Vesti Iamal» vmeste s RGO otpravilis' po puti legendarnoi 503-i stroiki. Videosiužhet Vesti – Iamal 24 apreliia 2019 g. (Shadrin'tsev, B. Semyon Dezhnev passed here: "Vesti Yamal" together with the RGO set off along the path of the legendary 503rd construction site. Vesti – Yamal video on April 24, 2019), Available at: [https://vesti-yamal.ru/ru/vjesti\\_jamal/istoriya177440](https://vesti-yamal.ru/ru/vjesti_jamal/istoriya177440) (accessed 25 October 2021).

27. Shepit'ko T. V., Zaitsev A. A., Nesterov I. V., Riumin M. G., Artiushenko I. A. Prospects for the development of transport infrastructure in the Arctic region: the section from Urengoy to the Noril'sk Industrial District [Perspektivy razvitiia transportnoi infrastruktury Arkticheskogo regiona: uchastok ot Urengoiia do Noril'skogo promyshlennogo raiona]. *IX mezhdunarodnyi forum. Arktika: nastoiashchee i budushchee: sbornik dokladov* (IX International Forum. Arctic: Present and future: collection of reports). – Saint Petersburg: ASPOL Publ., 2019, pp. 220 – 224.

28. Shepit'ko T. V., Zaitsev A. A., Nesterov I. V., Riumin M. G., Artiushenko I. A. Organization of a monitoring network to assess the possibility of developing railway transport infrastructure [Organizatsiia seti geomonitoringa dlia otsenki vozmozhnosti razvitiia infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta]. *X mezhdunarodnyi forum. Arktika: nastoiashchee i budushchee: sbornik dokladov* (X International Forum. Arctic: Present and future: collection of reports). – Saint Petersburg: ASPOL Publ., 2020, pp. 351 – 352.

29. Zaitsev A. A., Artiushenko I. A. Investigation of the foundation soils of the Krasnoyarsk Territory and the method of their reinforcement [Issledovanie gruntov osnovaniia Krasnoyarskogo kraia i sposob ikh usileniia]. *Transportnye sooruzheniia – Transport facilities*, 2020, no. 1, Available at: <https://t-s.today/PDF/01SATS120.pdf> (accessed 25 October 2021).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Шепитько Таисия Васильевна

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, директор Института пути, строительства и сооружений, член РОМГГиФ, научный руководитель арктических экспедиций ИПСС РУТа (МИИТа) на север Красноярского края.

Тел.: +7 (495) 681-34-63.

E-mail: shepitko-tv@mail.ru

### Зайцев Андрей Александрович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», член РОМГГиФ и ISSMGE, ТС-104, член РОМГО, Совета РОМГО и IGS, участник трех арктических экспедиций на север Красноярского края.

Тел.: +7 (495) 684-22-06.

E-mail: andrei.zaitsev2010@yandex.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Shepitko Taisiia Vasil'evna

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Obraztsova str., 9, p. 9, Moscow, 127994, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, Director of the Institute of Roads, Construction and Structures, member of the ROMGGiF, scientific director of the Arctic Expeditions of the IPSS RUT (MIIT) to the North of the Krasnoyarsk Territory.

Phone: +7 (495) 681-34-63.

E-mail: shepitko-tv@mail.ru

### Zaitsev Andrei Aleksandrovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Obraztsova str., 9, p. 9, Moscow, 127994, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the Department «Path and Track Management», member of ROMGGiF and ISSMGE, TC-104, member of ROMGO, ROMGO Council and IGS, participant of 3 Arctic expeditions to the North of the Krasnoyarsk Territory.

Phone: +7 (495) 684-22-06.

E-mail: andrei.zaitsev2010@yandex.ru

## Тенирядко Надежда Ивановна

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты», член РОМГО и IGS.

Тел.: +7 (495) 684-29-23.

E-mail: nad1010@inbox.ru

## Teniriadko Nadezhda Ivanovna

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Obraztsova str., 9, p. 9, Moscow, 127994, the Russian Federation..

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the Department «Highways, Airfields, foundations and foundations», member of the ROMGO and IGS.

Phone: +7 (495) 684-29-23.

E-mail: nad1010@inbox.ru

## Бучкин Виталий Алексеевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование и строительство железных дорог».

Тел.: +7 (495) (495)684-24-64.

E-mail: buchkin@mail.ru

## Buchkin Vitalii Alekseevich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Obraztsova str., 9, p. 9, Moscow, 127994, the Russian Federation..

Doctor of Sciences in Engineering, Professor of the Department «Design and Construction of Railways».

Phone: +7 (495) (495)684-24-64.

E-mail: buchkin@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Транспортное развитие северных территорий России / Т. В. Шепитко, А. А. Зайцев, Н. И. Тенирядко, В. А. Бучкин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 115 – 130.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shepitko T. V., Zaytsev A. A., Teniryadko N. I., Buchkin V. A. Transport development of the northern territories of Russia. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 3 (47), pp. 115 – 130 (In Russian).

УДК 656.216.22

**Г. Г. Ахмедзянов, В. В. Дремин**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАБОТУ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПЕРЕЕЗДА

**Аннотация.** Железнодорожный переезд является системой взаимодействия железнодорожного и автомобильного транспорта. Обеспечение безопасности движения на железнодорожных переездах является важной государственной задачей. Несмотря на ежегодное сокращение числа железнодорожных переездов и оснащение их современными системами сигнализации и ограждения, количество дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах Российской Федерации, включая случаи с человеческими жертвами, остается значительным. Предметом исследования являются факторы, влияющие на работу и безопасность железнодорожных переездов. Целью работы является определение факторов, имеющих максимальное влияние на безопасность работы железнодорожных переездов Российской Федерации. Для исследования использовались: блок-схемы факторов, влияющих на работу железнодорожного переезда; априорный анализ методом экспертных оценок; расчет коэффициента конкордации Кендалла для отдельных групп факторов; сортировка факторов по средней оценке экспертов.

В статье приведены данные о числе дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах Российской Федерации за период с 2005 по 2020 г., количестве железнодорожных переездов разных категорий на 2020 г. Предложена гипотеза о том, что основной причиной дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах является несоблюдение правил дорожного движения водителями автотранспорта. На основании схемы ответственного технологического процесса построена блок-схема факторов, имеющих влияние на работу железнодорожного переезда. Факторы, имеющие влияние на работу железнодорожного переезда, разделены на четыре группы. Рассчитаны коэффициенты конкордации Кендалла для отдельных групп факторов. Построено распределение факторов, оказывающих воздействие на работу железнодорожного переезда, по средней оценке экспертов для отдельных групп факторов. Распределение показало достоверность выдвинутой гипотезы. Учет веса факторов при разработке методов, повышающих безопасность работы железнодорожных переездов, позволит сократить количество дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах. Полученные в исследовании результаты могут использоваться как при модернизации существующих железнодорожных переездов, так и при разработке новых организационных и технических мероприятий по повышению безопасности на железнодорожных переездах.

**Ключевые слова:** железнодорожный переезд, априорный анализ, метод экспертных оценок, коэффициент конкордации Кендалла, ранжирование факторов, безопасность.

**Gayaz G. Akhmedzyanov, Vladimir V. Dremin**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## ANALYSIS OF THE FACTORS AFFECTING THE OPERATION OF A LEVEL CROSSING

**Abstract.** A level crossing is a system of interaction between rail and road transport. Traffic safety at level crossings is a priority in Russia. Despite the annual reduction in the number of level crossings and the modernization of existing level crossings, the number of accidents at level crossings, including fatalities, remains at the significant level. The subject of research is the factors affecting the safety of level crossings. The aim of the work is to identify the factors with the greatest affecting the operation of a level crossings in the Russian Federation. The research used: a generalized block diagram of a level crossing, a block diagram of factors affecting the operation of a level crossing, a prior analysis by the evaluation, calculation of the Kendall coefficient for individual groups of factors, sorting of factors according to the average assessment of experts.

The article provides data on the number of road traffic accidents at level crossings in the Russian Federation for the period from 2005 to 2020, and the number of level crossings of different categories for 2020. It has been hypothesized that the main cause of accidents at level crossings is violation of the rules by vehicle drivers. The block diagram of factors affecting the operation of a level crossing based on the generalized block diagram of a level crossing. Factors affecting the operation of a level crossing are divided into four groups. The Kendall coefficient was calculated for individual groups of factors. Evaluation of the factors affecting the operation of a level crossing was implemented, according to the average assessment of the experts. This hypothesis was confirmed. Using of the results of this analysis will reduce the number of accidents at level crossings. The results can be used both in the modernization of existing level crossings and in the design of new level crossings.

**Keywords:** level crossing, prior analysis, evaluation, Kendall coefficient of concordance, ranking of factors, safety.

Железнодорожный переезд (ЖДП) представляет собой место пересечения железнодорожных путей и автодорог в одном уровне и является объектом повышенной опасности. Несмотря на ежегодное сокращение числа железнодорожных переездов в Российской Федерации (обычно ликвидируют ЖДП первой категории), количество транспортных происшествий остается примерно на одном уровне (рисунок 1), как и число погибших и раненых в этих происшествиях. Дорожно-транспортные происшествия (ДТП) на переездах приводят к финансовым потерям. Так, общий материальный ущерб ОАО «РЖД» от ДТП в 2020 г. составил 26658 тыс. руб.

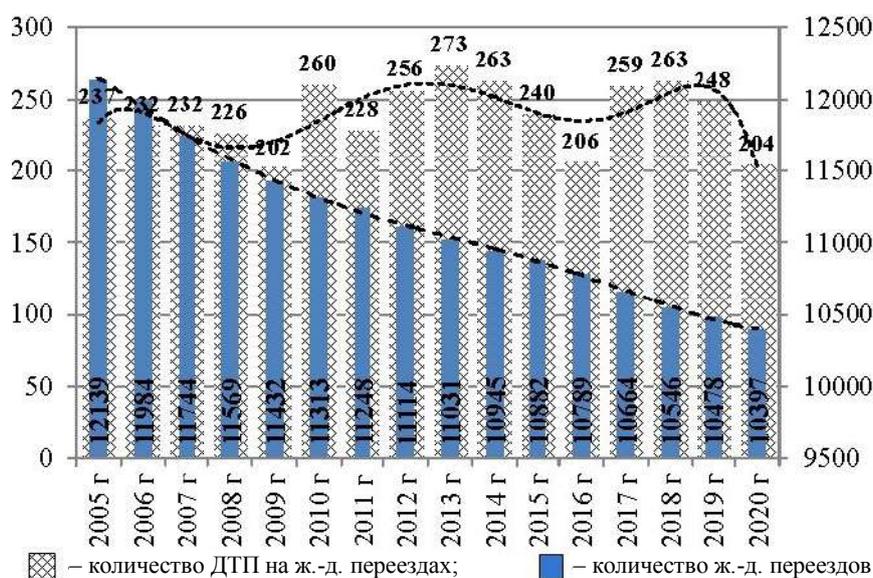


Рисунок 1 – Число ДТП на железнодорожных переездах России и общее количество переездов

Наиболее действенным способом обеспечения безопасности на ЖДП является сооружение путепроводов для организации пересечения автомобильных и железных дорог в разных уровнях. Однако этот способ требует значительных инвестиций и не всегда возможен в условиях имеющегося ландшафта [1].

Рассмотрим ДТП, произошедшие на ЖДП Западно-Сибирской железной дороги с 2015 по 2020 г. [2]. За это время произошло 109 ДТП, жертвами которых стали 18 человек, отмечено 11 случаев повреждения железнодорожной инфраструктуры. Следует отметить, что 104 (95,4 %) ДТП случилось на неохраемых ЖДП.

Рассмотрим число ЖДП разных категорий и количество ДТП, произошедших на них (рисунок 2).

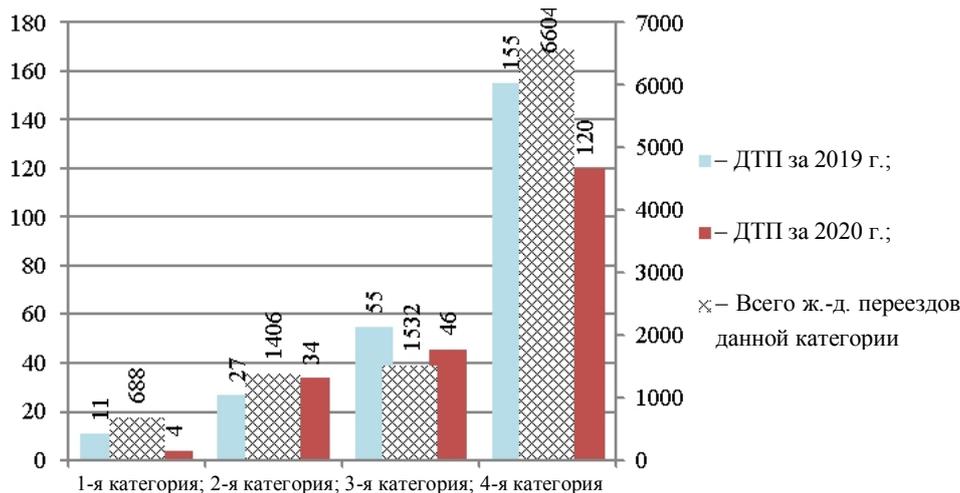


Рисунок 2 – Число переездов в России различных категорий на 2020 г. и количество произошедших на них ДТП за 2019 и 2020 гг.

Видно, что за два года (2019 и 2020) на переезды третьей и четвертой категорий приходится 83,2 % от общего числа ДТП на ЖДП Российской Федерации, хотя их доля от общего числа переездов составляет 79,5 %.

В ходе рассмотрения причин отдельных ДТП на ЗСЖД предложена гипотеза о том, что основным фактором ДТП на переездах является несоблюдение правил дорожного движения (ПДД) водителями автотранспорта (проезд зоны ЖДП при запрещающем показании светофора, обгоны и т. п.).

Известны различные факторы, влияющие на функционирование ЖДП [3 – 8]. Для определения внутренних и внешних факторов, имеющих влияние на работу и безопасность ЖДП, необходимо сформировать модель работы ЖДП. Железнодорожный переезд является сложной системой, состоящей из нескольких подсистем и отдельных устройств, взаимодействующих между собой и обеспечивающих безопасность движения. Поэтому для построения модели работы ЖДП использовалась схема ответственного технологического процесса (ОТП), которая позволяет моделировать сложные технологические операции. Обобщенная структурная схема функционирования ЖДП как ОТП приведена на рисунке 3.

Схема ОТП состоит из исходного продукта, технологической системы, выходных продуктов – основных и побочных, внешнего мира (среда технологическая, социум и природа) [9]. В случае ЖДП исходный продукт – транспорт (железнодорожный и автомобильный) с координатами  $X_1, Y_1, Z_1$  и  $A_1, B_1, C_1$ . Основной продукт – это тот же транспорт, но уже с измененными координатами –  $X_2, Y_2, Z_2$  и  $A_2, B_2, C_2$ . Побочными продуктами работы ЖДП являются вредные выбросы двигателей транспорта, шумы, вибрации и т. п. [10].

Обобщенная структурная схема работы ЖДП необходима для систематизации факторов, влияющих на работу ЖДП. Для наглядности факторы, влияющие на работу ЖДП, разделены на четыре группы – параметры подвижного состава и автотранспорта, среда технологическая, природа, социум. Сам набор факторов формировался на основании анализа литературы [3 – 8,

10] и опроса работников железной дороги, обслуживающих ЖДП. В первую группу включены технические характеристики подвижного состава и автомобильного транспорта. В группу «среда технологическая» включены факторы, связанные с техническими средствами ЖДП, инфраструктурой автомобильных и железных дорог. Третья группа состоит из факторов времени и метеорологических факторов. Группа «социум» включает в себя ошибки технического персонала и характеристики опасного поведения водителей.



Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема работы железнодорожного переезда

В результате составлена блок-схема факторов, влияющих на работу ЖДП (рисунок 4). Блок-схема факторов содержит также побочные продукты работы ЖДП, поскольку они влияют на внешние факторы.

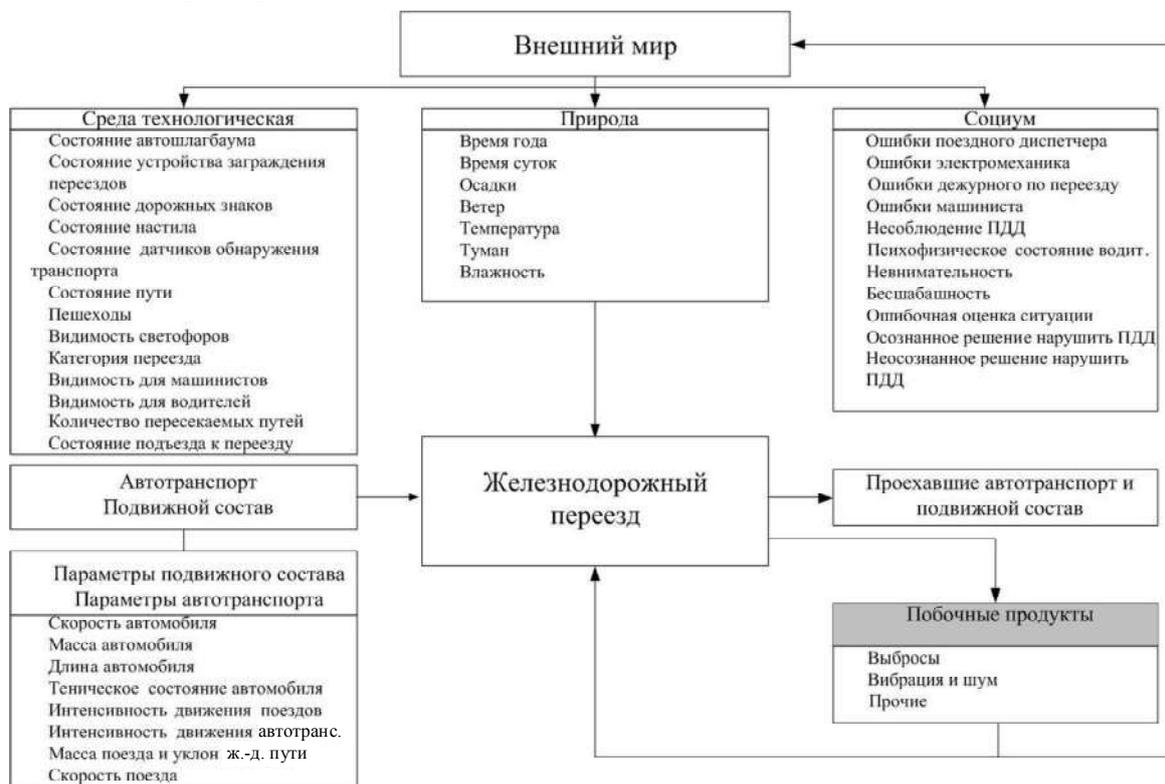


Рисунок 4 – Блок-схема факторов, влияющих на работу железнодорожного переезда

В блок-схеме приведены 39 различных факторов, влияющих на работу ЖДП. Для определения ключевых факторов целесообразно использовать априорный анализ методом экспертных оценок. При этом методе априорная информация получается на основании суждений группы экспертов. В качестве экспертов были приглашены работники железной дороги, имеющие значительный опыт в сфере обслуживания переездных устройств (всего 79 человек). Экспертами выставлялась оценка, отражающая степень влияния фактора на безопасность эксплуатации ЖДП. Использовались оценки от 0 до 5, где 5 – «сильно воздействует», 0 – «нет воздействия».

Рассчитаем для групп факторов коэффициент конкордации Кендалла (коэффициент ранговой корреляции у группы из  $m$  экспертов, которые оценивают  $k$  факторов). Коэффициент конкордации Кендалла определяется по формуле:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta i^2}{\max \sum_{i=1}^k \Delta i^2 - \xi} = \frac{\sum_{i=1}^k [p_{i_\epsilon} - \frac{1}{2}m(k+1)]^2}{\frac{1}{12}m^2(k^3 - k) - m \sum_{j=1}^m T_j}, \quad (1)$$

где  $p_{i_\epsilon} = \sum_{j=1}^m p_{ij}$  – общий ранг  $i$ -го объекта блок-схемы по мнению всех экспертов;

$p_{ij}$  – ранг  $i$ -го объекта по мнению  $j$ -го эксперта;

$T_j$  – число совпадающих элементов для  $j$ -го эксперта.

Разница  $i$ -го общего ранга и среднего значения общих рангов

$$\Delta i = p_{i_\epsilon} - p_{cp_\epsilon} = p_{i_\epsilon} - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m p_{ij} = p_{i_\epsilon} - \frac{1}{2}m(k+1). \quad (2)$$

Максимальная сумма квадратов разностей  $\Delta i$ , появляющаяся в случае взаимного согласия всех экспертов, рассчитывается по формуле:

$$\max \sum_{i=1}^k \Delta i^2 = \frac{1}{12}m^2(k^3 - k). \quad (3)$$

Кроме того, находим поправку, возникающую из-за совпадающих рангов у экспертов:

$$\xi = m \sum_{j=1}^m T_j = m \sum_{j=1}^m \frac{1}{12} \sum_{i=1}^k (t_i^3 - t_i), \quad (4)$$

где  $t_i$  – число повторений  $i$ -го ранга в ранжировке  $j$ -го эксперта.

Рассчитанные величины коэффициента конкордации Кендалла для групп факторов работы ЖДП показаны на рисунке 5.

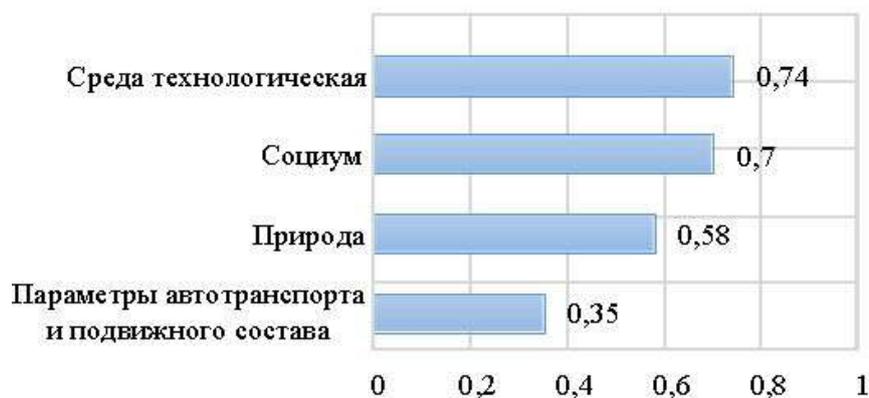


Рисунок 5 – Значение коэффициента конкордации Кендалла для отдельных групп факторов

На основании полученных значений коэффициента конкордации Кендалла  $W$  делаем вывод о том, что при оценке факторов, влияющих на работу ЖДП, мнения экспертов согласуются ( $W > 0,5$ ) для групп факторов «среда технологическая», «социум», «природа». Для группы факторов «параметры автотранспорта и подвижного состава» мнения экспертов не согласуются, это можно объяснить тем, что эксперты не являются специалистами в области автотранспорта и подвижного состава.

Далее рассмотрим распределение факторов по средней оценке экспертов (рисунки 6 – 9).



Рисунок 6 – Распределение по средней оценке экспертов факторов группы «среда технологическая»

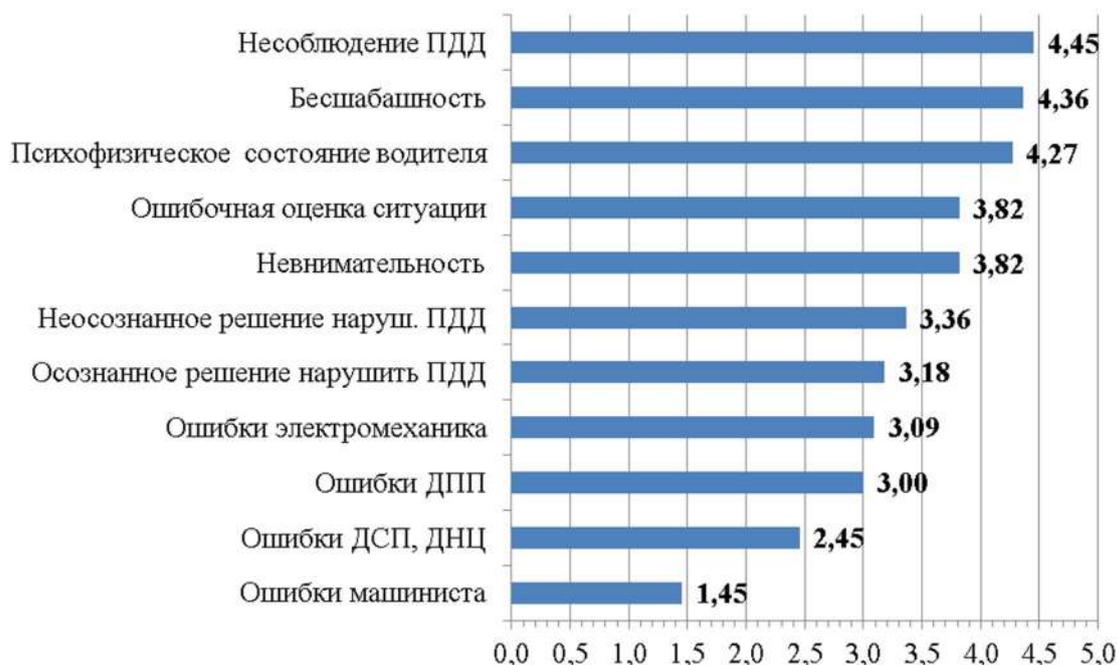


Рисунок 7 – Распределение по средней оценке экспертов факторов группы «социум»

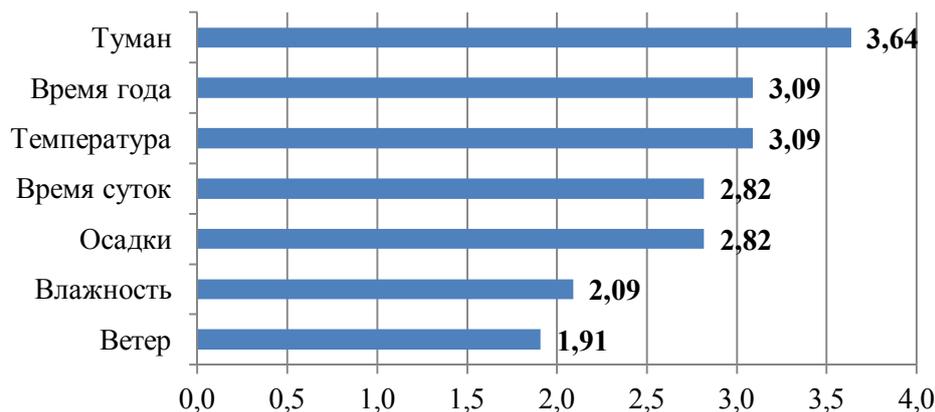


Рисунок 8 – Распределение по средней оценке экспертов факторов группы «природа»

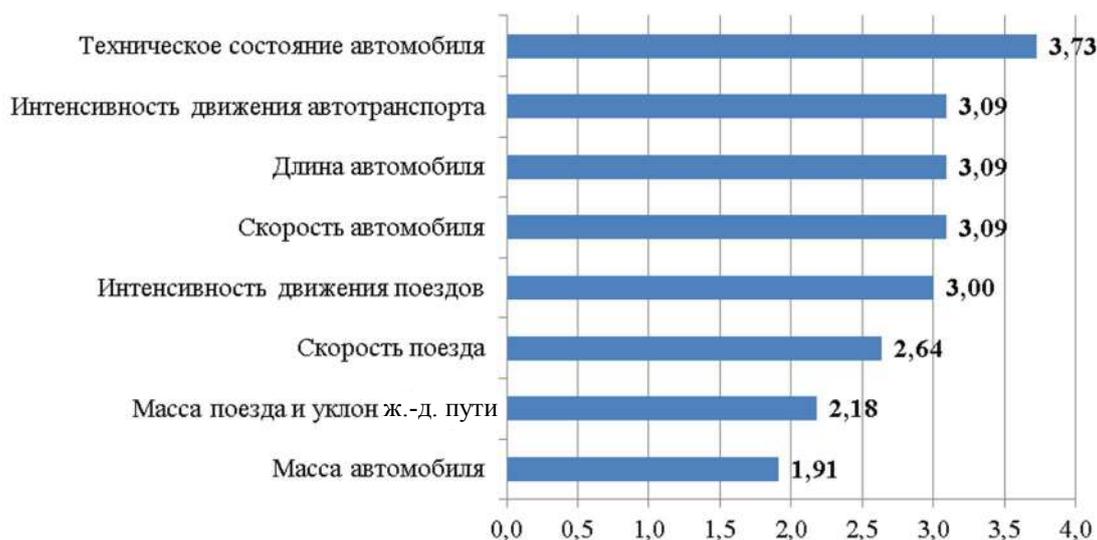


Рисунок 9 – Распределение по средней оценке экспертов факторов группы «параметры автотранспорта и подвижного состава»

Максимальную среднюю оценку имеют следующие факторы: несоблюдение ПДД (4,45 из 5), бесшабашность (4,36 из 5), психофизическое состояние водителя (4,26 из 5), видимость для водителей (4,27 из 5), состояние ПАШ (4,09 из 5).

Результаты анализа, проведенного методом экспертных оценок, подтверждают гипотезу о том, что главным фактором, влияющим на работу ЖДП, является несоблюдение ПДД со стороны водителей автотранспорта.

В результате исследования можно сделать следующие выводы.

1. Рассмотрены факторы, которые влияют на работу ЖДП. Все факторы распределены по четырем группам.

2. Построена блок-схема факторов, определяющих работу ЖДП, на основании обобщенной структурной схемы работы переезда как ОТП.

3. Рассчитаны коэффициенты конкордации Кендалла для исследуемых групп факторов. Результаты показали, что мнения экспертов согласуются.

4. Выполнено распределение факторов по средней оценке экспертов. Максимальную среднюю оценку экспертов имеет несоблюдение ПДД.

Полученные средние оценки факторов могут использоваться при разработке новых организационных и технических мероприятий по повышению безопасности на ЖДП.

Список литературы

1. Устройства железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Д. В. Шалягин, Н. А. Цыбуля, С. С. Косенко [и др.]. – Москва : Маршрут, 2006. – Ч. 1. – 587 с. – Текст : непосредственный.
2. Официальный сайт Госавтоинспекции. Показатели состояния безопасности дорожного движения // <http://stat.gibdd.ru/> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://stat.gibdd.ru> (дата обращения: 28.08.2021).
3. Соколов, М. М. Основы железнодорожной автоматики и телемеханики : учебное пособие / М. М. Соколов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – Ч. 1. – 79 с. – Текст : непосредственный.
4. Системы управления движением поездов на перегонах / В. М. Лисенков, П. Ф. Бестемьянов, В. Б. Леушин [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009. – Ч. 1. – 160 с. – Текст : непосредственный.
5. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира : учебное пособие / Г. Теег, С. В. Власенко, Э. Андерс [и др.]. – Москва : Интекст, 2010. – 488 с. – Текст : непосредственный.
6. Баранов, А. М. Повышение безопасности дорожного движения на нерегулируемых железнодорожных переездах / А. М. Баранов, А. В. Литвинов, А. Н. Зубарев. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии. – 2018. – № 6 (21). – С. 120–125.
7. Хорошев, В. В. Концепция полного мониторинга инфраструктуры переездов / В. В. Хорошев, Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 1 (74). – С. 47–52.
8. Повышение безопасности работы железнодорожных станций на основе совершенствования и развития станционной техники : учебное пособие / под ред. В. А. Кобзева. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 175 с. – Текст : непосредственный.
9. Лисенков, В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов : учебник / В. М. Лисенков. – Москва : Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, 1999. – 232 с. – Текст : непосредственный.
10. Сапожников, Вл. В. Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте : учебное пособие / Вл. В. Сапожников. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2011. – 287 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Shalyagin D. V., Tsybulya N. A., Kosenko S. S. and others. *Ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi* (Railway signaling, interlocking & communication devices). Moscow: Rail route Publ., 2006, vol. 1, 587 p.
2. *Ofitsialnyy sayt Gosavtoinspektsii. Pokazateli sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya* (The official website of the Main Directorate for Traffic Safety. Indicators of the state of road safety), Available at: <http://stat.gibdd.ru> (accessed 28 August 2021).
3. Sokolov M. M. *Osnovy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki : uchebnoye posobiye* (Fundamentals of railway signaling & interlocking: a tutorial). Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2020, vol. 1, 79 p.
4. Lisenkov V. M., Bestemyanov P. F., Leushin V. B. and others. *Sistemy upravleniya dvizheniyem poyezdov na peregonakh* (Control systems for the railway interlocking). Moscow: Training and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2009, vol. 1, 160 p.
5. Teeg G., Vlasenko S. V., Anders E. and others *Sistemy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznykh dorogakh mira: uchebnoye posobiye dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* (Railway Signaling & Interlocking). Moscow: Intext Publ., 2010, 496 p.

6. Baranov A. M., Litvinov A. V., Zubarev A. N. Improving the road safety at unregulated level crossings [Povysheniye bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na nereguliruyemykh zheleznodorozhnykh pereyezdakh]. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii – Modern materials, equipment and technologies*, 2018, no. 6 (21), pp. 120 – 125.

7. Khoroshev V. V., Efanov D. V., Osadchiy G. V. The concept of fully connected monitoring of level crossings [Kontseptsiya polnosvyaznogo monitoringa infrastruktury pereyezdov]. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2018, no. 1 (47), pp. 47 – 52.

8. Kobzev V. A. *Povysheniye bezopasnosti raboty zheleznodorozhnykh stantsiy na osnove sovershenstvovaniya i razvitiya stantsionnoy tekhniki* (Improving the safety of railway stations on the basis of improving and developing station technology). Moscow: Training and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2016, 175 p.

9. Lisenkov V. M. *Statisticheskaya teoriya bezopasnosti dvizheniya poyezdov* (Statistical theory of train traffic safety). Moscow: All-Russian Institute for Scientific and Technical Information Publ., 1999, 232 p.

10. Sapozhnikov V. V. *Avtomatika i telemekhanika na zheleznodorozhnom transporte* (Railway Signaling & Interlocking). Moscow: Training and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2011, 287 p.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Ахмедзянов Гаяз Гумарович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: 1zzzz1omsk@gmail.com

##### **Дремин Владимир Валентинович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: dremin-vladimir@yandex.ru

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ**

Ахмедзянов, Г. Г. Исследование факторов, влияющих на работу железнодорожного переезда / Г. Г. Ахмедзянов, В. В. Дремин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 130 – 138.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Akhmedzyanov Gayaz Gumarovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Automation and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: 1zzzz1omsk@gmail.com

##### **Dremin Vladimir Valentinovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Automation and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: dremin-vladimir@yandex.ru

#### **BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION**

Akhmedzyanov G. G., Dremin V. V. Analysis of the factors affecting the operation of a level crossing. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 3 (47), pp. 130 – 138 (In Russian).

УДК 620.9

**А. С. Краснов, К. К. Ким**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

## ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Аннотация.** В настоящее время в России наблюдается активное развитие промышленности, что требует большого количества энергетических ресурсов. В то же время существует несколько препятствий на пути обеспечения всех потребителей необходимым объемом и, главное, качеством энергии. Прежде всего это вызвано техническим состоянием оборудования как потребителей, так и производителей энергии и отсутствием программ реализации мероприятий, направленных на повышение энергетической эффективности. В настоящее время полноценная оценка энергоэффективности производства многих предприятий затруднительна по причине отсутствия единого физико-математического аппарата и универсальной критериальной оценки энергетической эффективности предприятий. Это приводит к тому, что правильная оценка показателей энергетической эффективности и потенциала энергосбережения в полной мере невозможна. Большинство существующих методик оценки показателей энергетической эффективности носят ограниченный характер и позволяют произвести оценку только одного или нескольких показателей, не предусматривают увязку всех показателей в единое целое. Кроме того, отсутствует критерий оценки энергетической эффективности, единый для всех составляющих систем теплоснабжения. Перспективными направлениями современных исследований в области систем теплоснабжения становятся совершенствование способов оценки энергетической эффективности систем теплоснабжения посредством использования научно обоснованного критерия энергетической эффективности системы теплоснабжения промышленных предприятий и создание унифицированных методики и алгоритма оценки показателей энергетической эффективности систем теплоснабжения различного состава и устройства. Отдельное внимание уделяется оценке достоверности исходных данных. Выполнение этой оценки возможно с помощью корреляционного метода. На практике широко применяется корреляционно-регрессионный анализ для прогнозирования потребления тепловой энергии. Этот подход можно использовать и при оценке достоверности исходных данных с использованием шкалы Чеддока. В ходе исследований применены методы конструктивных и поверочных расчетов, экспериментальные и аналитические исследования, метод корреляционного анализа, статистические методы исследования. В результате исследований разработана единая, обобщенная методика оценки показателей энергетической эффективности системы теплоснабжения предприятия. Создан алгоритм, позволяющий дать комплексную оценку энергетической эффективности системы теплоснабжения промышленного предприятия и оценить потенциал энергосбережения.

**Ключевые слова:** энергосбережение, система теплоснабжения, показатель энергоэффективности.

**Anton S. Krasnov, Konstantin K. Kim**

Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, the Russian Federation

## ASSESSMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL HEAT SUPPLY SYSTEMS

**Abstract.** Currently in Russia there is an active development of industry, which requires a large amount of energy resources. At the same time, there are several obstacles in the way of providing all consumers with the required volume and, most importantly, the quality of energy. First of all, this is due to the technical condition of the equipment of both consumers and energy producers and the absence of programs for the implementation of measures aimed at increasing energy efficiency. Today, a full-fledged assessment of the energy efficiency of the production of many enterprises is difficult due to the lack of a single physical and mathematical apparatus and a universal criterial assessment of the energy efficiency of enterprises. This leads to the fact that a correct assessment of energy efficiency indicators and energy saving potential is not fully possible. Most of the existing methods for assessing energy efficiency indicators are limited and allow assessing only one or several indicators, do not provide for linking all indicators into a single whole. In addition, there is no criterion for assessing energy efficiency that is uniform for all components of heat supply systems. A promising direction of modern research in the field of heat supply systems is the improvement of methods for assessing the energy efficiency of heat supply systems through the use of a physically and mathematically substantiated criterion for the energy efficiency of the heat supply system of industrial enterprises and the creation of unified methods and an algorithm for assessing the indicators of the energy efficiency of heat supply systems of various compositions and devices. Special

*attention is paid to assessing the reliability of the initial data. This assessment is possible using the correlation method. In practice, correlation and regression analysis is widely used to predict the consumption of heat energy. This approach can also be used when assessing the reliability of the initial data using the Chaddock scale. In the course of the research, methods of constructive and verification calculations, experimental and analytical research, the method of correlation analysis, and statistical research methods were used. As a result of the research, a unified, generalized methodology for assessing the indicators of the energy efficiency of the heat supply system of the enterprise has been developed. We created the algorithm given a comprehensive assessment of the energy efficiency of the heat supply system of an industrial enterprise and to assess the potential for energy saving.*

**Keywords:** energy saving, heating system, energy efficiency indicators.

Анализ ориентировочного потенциала энергосбережения в области производства и преобразования энергетических ресурсов показал, что его наибольшее значение приходится на генерацию и преобразование тепловой энергии [1].

В настоящее время большинство существующих методик оценки показателей энергетической эффективности систем теплоснабжения, приведенных в работах [2 – 5], носят ограниченный характер, так как позволяют произвести оценку только одного или нескольких показателей (например, удельного расхода условного топлива на выработку и отпуск тепловой энергии, потерь тепловой энергии при транспортировке по тепловым сетям и др.), не предусматривают увязку всех показателей в единое целое. Кроме того, в настоящее время отсутствует критерий оценки энергетической эффективности, единый для всех составляющих систем теплоснабжения. Это подтверждают результаты экспериментальных и теоретических исследований, представленных в работах [6 – 11], в которых рассмотрены способы расчетов основных показателей и критериев энергетической эффективности и приведены общие рекомендации по организации и оптимизации работ для оценки энергетической эффективности систем теплоснабжения. Следует отметить, что в данных работах отсутствует единый классификатор показателей энергетической эффективности, который мог бы позволить оценить наиболее перспективные направления модернизации предприятия по отдельным элементам системы теплоснабжения.

Перспективным направлением современных исследований в области повышения эффективности систем теплоснабжения становится совершенствование способов ее оценки посредством использования научно обоснованного критерия энергетической эффективности системы теплоснабжения промышленных предприятий, под которым понимается коэффициент энергетической эффективности, который вычисляется на основе показателей энергетической эффективности, и создание унифицированных методики и алгоритма оценки этих показателей различного состава и устройства. В основе последних лежат результаты энергетического обследования системы теплоснабжения промышленного предприятия. Это обследование можно разделить на несколько основных этапов:

- сбор и обработка исходных данных;
- анализ основных показателей, характеризующих работу предприятия;
- проведение контрольных испытаний;
- построение топливно-энергетических балансов предприятия;
- разработка энергосберегающих мероприятий.

Целью первого этапа является получение статистических данных о динамике потребления энергетических ресурсов, определения приоритетных направлений, имеющих наибольший потенциал энергосбережения, данных о техническом состоянии основного и вспомогательного оборудования, графиков их работы.

Отдельное внимание рекомендуется уделить оценке достоверности и корректности исходных данных. Выполнить эту оценку можно с помощью корреляционного метода. В работе [12] описано использование корреляционно-регрессионного анализа для прогнозирования потребления тепловой энергии. В таблице 1 показаны уровни достоверности, построенные на основании шкалы Чеддока, позволяющие классифицировать полученные исходные данные. Исходные данные, попадающие во II и III уровни, требуют уточнения с помощью инструментального обследования.

Методика расчета коэффициента парной корреляции подробно описана в работах [12, 13]. Коэффициент корреляции  $r$  в рассматриваемом случае может быть рассчитан по следующим формулам:

$$r = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x S_y}; \quad (1)$$

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[ n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} \quad (2)$$

где  $S_x$  и  $S_y$  – среднеквадратичное отклонение соответственно для каждого рассматриваемого массива чисел;  $x_i$  и  $y_i$  – текущие значения единиц обеих совокупностей;  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – их средние величины;  $n$  – число измерений (элементов) в каждой совокупности.

Таблица 1 – Уровни достоверности и корректности исходных данных

Уровень	Описание уровня	Значение коэффициента парной корреляции
Уровень I	Полностью пригодны для выполнения дальнейших расчетов	0,5 – 0,99
Уровень II	Частично пригодны для выполнения дальнейших расчетов по причине частичной некорректности или частичного отсутствия	0,3 – 0,5
Уровень III	Не пригодны для выполнения дальнейших расчетов по причине полной некорректности или полного отсутствия исходных данных	$\leq 0,3$

Использование формулы (2) не предусматривает необходимость вычисления отклонения текущих (индивидуальных) значений от средней величины, что позволяет исключить ошибку в расчетах при округлении средних величин.

Перечень корреляционных взаимосвязей и факторных признаков может изменяться в зависимости от типа состава системы теплоснабжения.

Второй этап подразумевает первоначальную оценку основных показателей энергетической эффективности, к которым можно отнести:

удельные расходы энергетических ресурсов на выработку и отпуск с коллекторов тепловой энергии;

степень загрузки системы теплоснабжения и ее отдельных элементов по отношению к установленной мощности;

затраты тепловой энергии на собственные нужды, необходимые для обеспечения производства тепловой энергии;

потери тепловой энергии при транспортировке по тепловым сетям.

Перечисленные выше показатели являются ключевыми, так как в совокупности характеризуют затраты и рациональные и (или) нерациональные потери энергоресурсов. Целью повышения энергетической эффективности является улучшение этих показателей при соблюдении требований, предъявляемых к качеству отпускаемой потребителям тепловой энергии.

В рамках второго этапа проводится предварительный (оценочный) анализ перечисленных выше показателей, так как их уточнение возможно только с помощью проведения контрольно-балансовых испытаний и сформированного топливно-энергетического баланса, который содержит в себе основную техническую информацию, характеризующую работу предприятия. Структурные составляющие топливно-энергетического баланса системы теплоснабжения и их взаимосвязи приведены на рисунке 1.

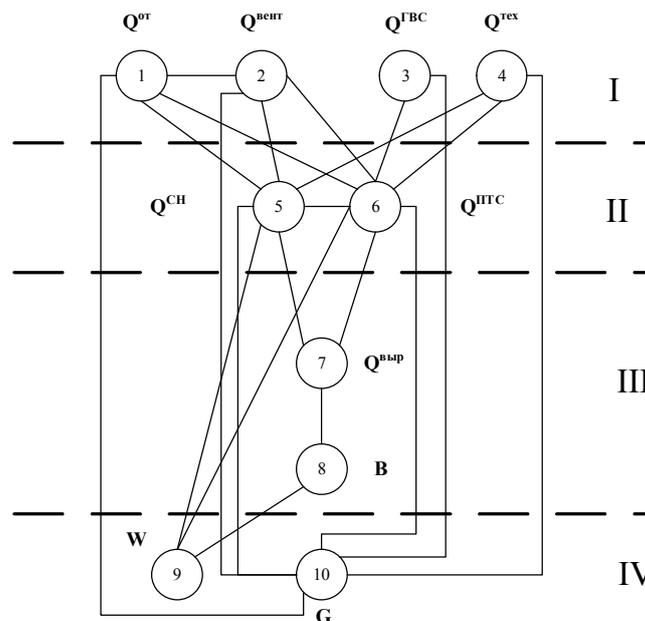


Рисунок 1 – Структурные составляющие топливно-энергетического баланса системы теплоснабжения: I – потребители тепловой энергии; II – потери и затраты тепловой энергии; III – производство тепловой энергии и затраты топлива; IV – затраты электроэнергии и воды; 1 – 4 – полезный отпуск тепловой энергии на нужды отопления, вентиляции, горячего водоснабжения (ГВС) и технологические нужды соответственно; 5 – затраты тепловой энергии на собственные нужды источника тепловой энергии; 6 – потери тепловой энергии при транспортировке по тепловым сетям; 7 – выработка тепловой энергии; 8 – затраты топлива; 9 – затраты электроэнергии; 10 – затраты воды

Следующий этап включает в себя проведение контрольных и контрольно-балансовых испытаний и является одним из важных этапов при оценке энергетической эффективности объекта. Результаты испытаний непосредственно оказывают существенное влияние на составление топливно-энергетического баланса предприятия, поскольку характеризуют работу оборудования не при заводских настройках или при условиях, в которых происходила наладка, а при фактических, эксплуатационных.

Основными целями проведения контрольных измерений при оценке энергетической эффективности системы теплоснабжения являются следующие:

- уточнение фактических данных об энергопотреблении различных элементов системы и оборудования;

- определение технического состояния оборудования и имеющихся резервов;

- подтверждение достоверности информации, полученной на этапе предварительного обследования, определения фактических показателей энергоэффективности;

- выявление причин непроизводительного расхода топливно-энергетических ресурсов;

- определение потерь энергоносителей и причин их возникновения.

На основании составленных топливно-энергетических балансов дается критериальная оценка энергетической эффективности системы теплоснабжения, описание которой приведено ниже.

Одним из препятствий комплексной оценки показателей энергетической эффективности систем теплоснабжения является отсутствие единого физико-математического аппарата системы оценки критерия энергетической эффективности. Так, например, эффективность теплогенерирующих объектов оценивается исходя из двух показателей: удельного расхода условного топлива на выработку тепловой энергии или на отпуск тепловой энергии с коллекторов и коэффициента использования установленной мощности (степени загрузки); эффективность работы тепловых сетей оценивается по величине тепловых потерь при транспортировке теплоносителя; эффективность систем отопления – исходя из количества тепловой энергии на 1 м<sup>2</sup> отапливаемой площади и т. д. Возможно использование в качестве основного единого

критерия количество тонн или килограммов условного топлива, но по причине того, что данный показатель при пересчете тепловой и электрической энергии будет принимать весьма малые значения по отношению, например, к удельному расходу условного топлива на отпуск тепловой энергии с коллекторов, такой подход неудобен.

В связи с этим предлагается использование понятия «критерий энергетической эффективности», принимающего значения в диапазоне от 0 до 1. Значение «0» соответствует минимально возможным показателям эффективности работы элементов системы теплоснабжения, ниже которых их эксплуатация является либо необоснованной и (или) недопустимой по причине нарушения правил технической эксплуатации, либо КПД эксплуатируемых установок становится ниже 50 %, а значение «1» – показателям работы, максимально возможным в условиях работы конкретного предприятия и рассматриваемого оборудования.

Критерий энергетической эффективности определяется на основании показателей энергетической эффективности системы теплоснабжения. При этом используются следующие термины и обозначения:

$X_i^0$  – минимальное значение показателя энергетической эффективности (принимается в соответствии с данными таблицы 2, где приведены составляющие критерия энергетической эффективности основных ключевых элементов системы теплоснабжения, а также обоснование их весовых значений);

$X_i$  – максимальное значение показателя энергетической эффективности (принимается в соответствии с данными таблицы 2);

$Y_i$  – фактическое значение показателя энергетической эффективности (принимается на основании результатов расчетов).

Весовые значения, показанные в таблице 2, приняты как среднеэксплуатационные и могут изменяться в зависимости от технического состояния, уровня автоматизации и других аспектов, влияющих на работу системы теплоснабжения, а также в зависимости от целевых показателей конкретного предприятия.

Каждому из показателей энергетической эффективности приписываются следующие весовые коэффициенты  $C$ :

$$\begin{array}{lcl} X_i^0 & => & C_i^0 = 0 \\ Y_i & => & C_{Y_i} \\ X_i & => & C_i = 1 \end{array}$$

Весовой коэффициент, соответствующий фактическому значению показателя энергетической эффективности, рассчитывается по формуле:

$$C_{Y_i} = \frac{Y_i - X_i^0}{X_i - X_i^0}. \quad (3)$$

Коэффициент энергетической эффективности определяется как средневзвешенное значение весовых коэффициентов показателей энергетической эффективности:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n C_{Y_i}}{n}. \quad (4)$$

Ниже дано обоснование используемого диапазона значений весовых коэффициентов, входящих в состав критериальной оценки, соответствующих значениям показателей энергетической эффективности на примере отечественных и зарубежных котлоагрегатов.

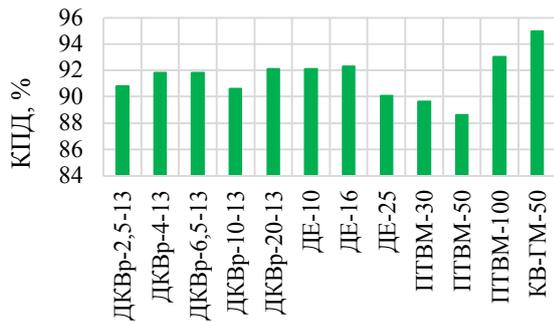
# Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

Таблица 2 – Обоснование значений коэффициентов энергетической эффективности системы теплоснабжения промышленного предприятия

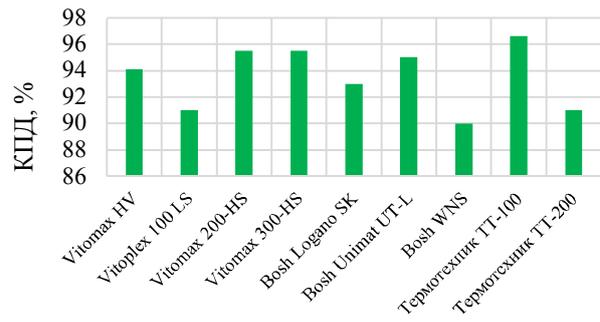
Элемент системы	Оцениваемый показатель	Обозначение показателя	Значения показателя	Весовые значения коэф. К	Обоснование диапазона весового значения энергетической эффективности
Котельные агрегаты	Удельный расход условного топлива при работе на газообразном топливе	$b^{газ}_{у.т.}$ , кг у.т./Гкал	476,20	0	Максимальное значение принимается исходя из условия средних значений максимально возможного заводского КПД котлоагрегата в зависимости от потребляемого вида топлива, а также с учетом значений, приведенных в нормативной документации Минимальное значение соответствует КПД котлоагрегата в размере 30 % в соответствии с ГОСТ Р 54442-2011
			153,5	1	
	Удельный расход условного топлива при работе на жидком топливе	$b^{ж.т.}_{у.т.}$ , кг у.т./Гкал	476,20	0	
			154,78	1	
Удельный расход условного топлива при работе на твердом топливе	$b^{тверд.топл.}_{у.т.}$ , кг у.т./Гкал	476,20	0		
		163,64	1		
Источники тепловой энергии (котельные)	Затраты на собственные нужды источника теплоснабжения по отношению к выработке тепловой энергии	$N_{с.н.}$ , %	50	0	Расчетно-нормативные значения принимаются на основании нормативной документации в соответствии с условиями эксплуатации. Фактические значения затрат могут быть приняты на основании проведенных контрольных испытаний или расчетным способом
			0,1	1	
	Степень загрузки источника теплоснабжения	$N_{загр.}$ , %	1	0	
			100	1	
Кoeffициент использования установленной тепловой мощности	$N_{усп}$	0,1	0		
		1	1		
Тепловые сети	Кoeffициент соответствия расчетно-нормативным значениям потерь	$N_{т.с}$	0,01	0	Расчетно-нормативные значения принимаются на основании нормативной документации в соответствии с условиями эксплуатации. Фактические значения потерь могут быть приняты на основании проведенных контрольных испытаний или расчетным способом
			1	1	
Потребители тепловой энергии	Кoeffициент эффективности системы отопления	$\epsilon_{с.о}$	0,3	0	Значения коэффциента эффективности: $\epsilon_{с.о} \geq 0,95$ – система отопления эффективна, функционирует хорошо; $0,85 \leq \epsilon_{с.о} \leq 0,95$ – система отопления малоэффективна, функционирует удовлетворительно; $\epsilon_{с.о} < 0,8$ – система отопления неэффективна, функционирует неудовлетворительно; $\epsilon_{с.о} < 0,4$ – необходимо назначение внеочередного энергетического обследования и ревизии технического состояния оборудования
			1	1	
	Кoeffициент эффективности системы вентиляции	$SFP$ , %	0	0	
			60	1	
	Система ГВС	$N_{ГВС}$	0,1	0	
			1	1	
Фактический КПД теплопотребляющего оборудования	$\eta_{оборуд.}$ , %	10	0		
		98	1		
Кoeffициент использования теплопотребляющего оборудования	$N^{обор.}_{исп.}$	0,01	0		
		1	1		

На рисунках 2 – 4 показаны значения КПД котлоагрегатов по данным заводов-изготовителей при работе на газообразном, жидком и твердом топливе.

# Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования



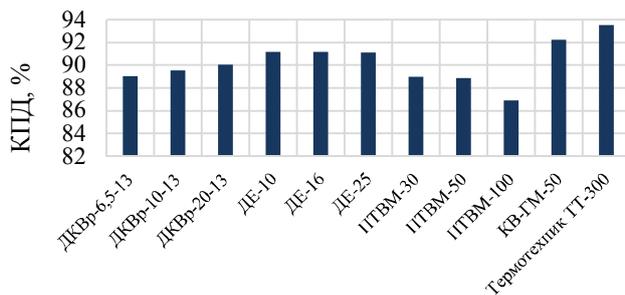
Среднее значение – 91,4 %;  
максимальное значение – 95,0 %;  
минимальное значение – 88,6 %



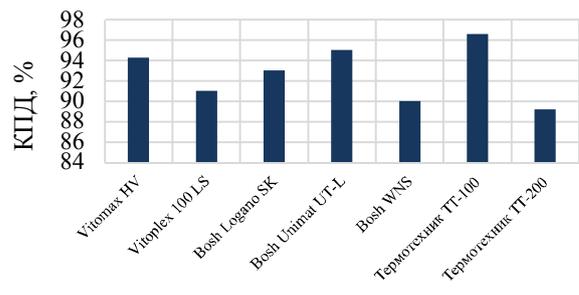
Среднее значение – 93,1 %;  
максимальное значение – 96,6 %;  
минимальное значение – 89,0 %

Рисунок 2 – Максимальные значения КПД котлоагрегатов при работе на газообразном топливе:  
а – водотрубные котлоагрегаты; б – жаротрубные котлоагрегаты

На основании данных, приведенных выше, целесообразно использовать в качестве показателя энергетической эффективности котлоагрегатов, работающих на газообразном топливе, удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии с весовым коэффициентом «1» – значение, равное 153,5 кг у.т./Гкал. Эта величина соответствует средневзвешенному КПД современных жаротрубных котлоагрегатов.



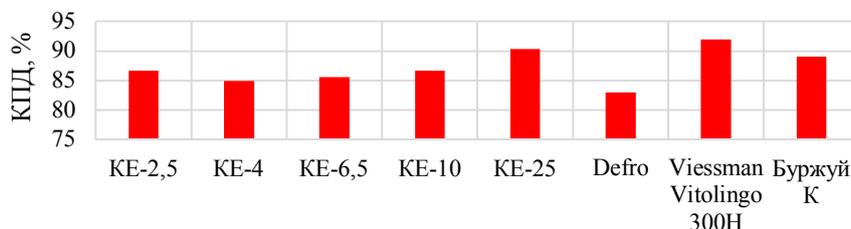
Среднее значение – 90,2 %;  
максимальное значение – 93,5 %;  
минимальное значение – 86,9 %



Среднее значение – 92,3 %;  
максимальное значение – 96,6 %;  
минимальное значение – 89,0 %

Рисунок 3 – Максимальные значения КПД котлоагрегатов при работе на жидком топливе:  
а – водотрубные котлоагрегаты; б – жаротрубные котлоагрегаты

Для котлоагрегатов, работающих на жидком топливе, показатель энергетической эффективности с весовым коэффициентом «1» имеет значение, соответствующее средневзвешенному КПД современных жаротрубных котлоагрегатов и равное 154,78 кг у.т./Гкал.



Среднее значение – 87,3 %;  
максимальное значение – 92,0 %;  
минимальное значение – 83,0 %

Рисунок 4 – Максимальные значения КПД котлоагрегатов при работе на твердом топливе

Котлоагрегаты, работающие на твердом топливе, характеризуются показателем энергетической эффективности с весовым коэффициентом «1», значение которого составляет 163,64 кг у.т./Гкал.

Обоснование выбранного диапазона значений весовых коэффициентов (см. таблицу 2) для прочих составляющих приводится далее.

## Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

Затраты тепловой энергии на собственные нужды источника теплоснабжения варьируются в диапазоне 0,1 – 50 %. Значение весового коэффициента «1» соответствует затратам тепловой энергии в размере 0,1 % от выработки тепловой энергии, что эквивалентно минимальному нормативному значению утечек и затрат тепловой энергии на собственные нужды источника. Значение весового коэффициента «0» характеризует затраты на собственные нужды, равные 50 %, что свидетельствует о перерасходе топлива примерно на 50 % по сравнению с нормативным.

Степень загрузки источника тепловой энергии варьируется в диапазоне от 1 до 100 % в зависимости от тепловой нагрузки источника и может носить сезонный характер при наличии у потребителей тепловой нагрузки на отопление и вентиляцию.

Коэффициент использования установленной мощности зависит от степени загрузки котельных агрегатов и их количества. За максимальное значение принимается 100 %-ное использование всех установленных котельных агрегатов при 100 %-ной загрузке. За минимальное значение принята 10 %-ная суммарная загрузка котлоагрегатов.

Роль показателя, характеризующего эффективность систем транспортировки тепловой энергии, играет коэффициент соответствия расчетно-нормативным значениям потерь. Расчетно-нормативные значения принимаются на основании нормативной документации в соответствии с условиями эксплуатации для трубопроводов со сроком службы не более 15 лет. Фактические значения потерь могут быть найдены на основании проведенных контрольных испытаний или расчетным способом. В качестве минимального весового значения берется значение коэффициента соответствия, равное 0,01, что свидетельствует о превышении нормативных потерь в тепловых сетях в два раза.

Основными показателями, по которым устанавливается показатель энергетической эффективности потребителей тепловой энергии, являются затраты тепловой энергии на нужды отопления, вентиляции и ГВС [14] и затраты тепловой энергии на производство продукции.

КПД теплопотребляющего оборудования и коэффициент его использования можно рассматривать как показатель, характеризующий затраты тепловой энергии на производство продукции. Показателем эффективности работы системы ГВС является коэффициент  $\eta_{\text{ГВС}}$ , равный отношению фактического потребления тепловой энергии к расчетно-нормативному.

На основании анализа составляющих критерия энергетической эффективности системы теплоснабжения определяются приоритетные направления, позволяющие повысить эффективность как отдельных элементов, так и всей системы теплоснабжения в целом.

Для оценки работоспособности предлагаемых коэффициентов были выполнены расчеты системы теплоснабжения промышленного предприятия с рассмотрением источника и системы транспортировки тепловой энергии. На рисунке 5 показаны результаты оценки энергетической эффективности системы теплоснабжения.

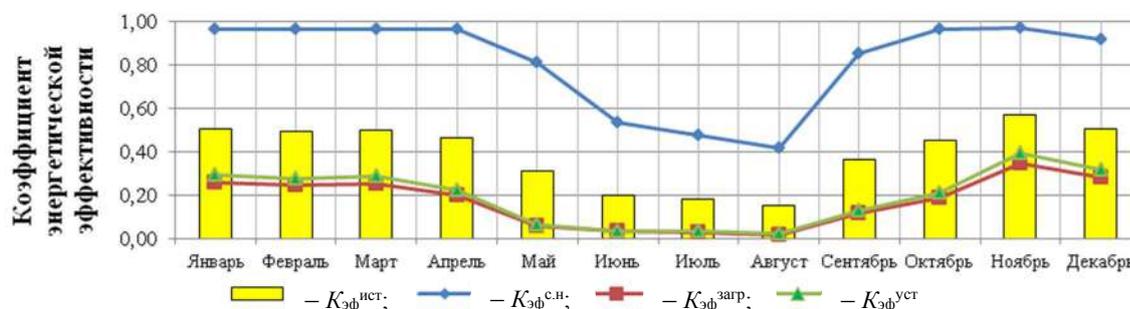


Рисунок 5 – Коэффициенты энергетической эффективности источника теплоснабжения и системы транспортировки тепловой энергии  $K_{\text{эф}}^{\text{ист}}$  – коэффициент энергетической эффективности источника теплоснабжения;  $K_{\text{эф}}^{\text{с.н}}$  – коэффициент энергетической эффективности затрат тепловой энергии на собственные нужды;  $K_{\text{эф}}^{\text{загр}}$  – коэффициент энергетической эффективности загрузки оборудования источника теплоснабжения;  $K_{\text{эф}}^{\text{уст}}$  – коэффициент энергетической эффективности использования установленной мощности

# Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

Коэффициенты энергетической эффективности, приведенные на рисунке 5, получены на основании базовых и прогнозируемых топливно-энергетических балансов предприятия с учетом реализации энергосберегающих мероприятий.

С учетом полученных результатов предложены способы повышения энергетической эффективности системы теплоснабжения, один из которых предполагает замену котлоагрегата, что иллюстрируется данными таблицы 3.

Таблица 3 – Энергетическая эффективность источника теплоснабжения до и после замены котлоагрегата

Период (месяц):	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<i>Энергетическая эффективность системы теплоснабжения до замены котлоагрегата</i>												
Коэффициент энергетической эффективности затрат тепловой энергии на собственные нужды $K_{эф}^{с.н}$	0,97	0,97	0,96	0,96	0,81	0,53	0,48	0,42	0,85	0,96	0,97	0,92
Коэффициент энергетической эффективности степени загрузки источника $K_{эф}^{загр}$	0,26	0,24	0,25	0,20	0,06	0,03	0,03	0,02	0,11	0,18	0,35	0,28
Коэффициент энергетической эффективности коэффициента использования установленной мощности $K_{эф}^{уст}$	0,29	0,28	0,28	0,22	0,06	0,03	0,03	0,02	0,13	0,21	0,39	0,32
Коэффициент энергетической эффективности источника теплоснабжения $K_{эф}^{ист}$	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,46</b>	<b>0,31</b>	<b>0,20</b>	<b>0,18</b>	<b>0,15</b>	<b>0,36</b>	<b>0,45</b>	<b>0,57</b>	<b>0,50</b>
<i>Энергетическая эффективность системы теплоснабжения после замены котлоагрегата</i>												
Коэффициент энергетической эффективности затрат тепловой энергии на собственные нужды $K_{эф}^{с.н}$	0,97	0,97	0,96	0,97	0,71	0,69	0,72	0,66	0,93	0,96	0,97	0,92
Коэффициент энергетической эффективности степени загрузки источника $K_{эф}^{загр}$	0,68	0,65	0,67	0,52	0,30	0,11	0,12	0,10	0,82	0,49	0,92	0,74
Коэффициент энергетической эффективности коэффициента использования установленной мощности $K_{эф}^{уст}$	0,68	0,65	0,67	0,52	0,30	0,11	0,12	0,10	0,82	0,49	0,92	0,74
$K_{эф}^{ист}$	<b>0,78</b>	<b>0,75</b>	<b>0,76</b>	<b>0,67</b>	<b>0,43</b>	<b>0,30</b>	<b>0,32</b>	<b>0,28</b>	<b>0,86</b>	<b>0,65</b>	<b>0,94</b>	<b>0,80</b>

Можно видеть, что технический эффект заключается в существенном снижении потребления основного вида топлива котельной – природного газа, при этом срок окупаемости рассматриваемых мероприятий составит порядка пяти – шести лет.

При разработке комплекса организационно-технических энергосберегающих мер необходимо правильно оценивать очередность применения тех или иных мероприятий не только с точки зрения окупаемости инвестиций, но и исходя из технологического процесса предприятия. Следует учитывать и перспективы развития предприятия. Речь идет о том, что многие современные энергосберегающие технологии имеют большой срок окупаемости, и вызвано это не столько малым энергосберегающим эффектом, сколько малой известностью и малым спросом данных технологий и, как следствие, высокой стоимостью их покупки и дальнейшего обслуживания. При правильном выборе и эксплуатации оборудования такого рода предприятие может серьезно снизить себестоимость производимой продукции и повысить свою конкурентоспособность на рынке.

Очередность реализации энергосберегающих мероприятий может быть определена путем ранжирования коэффициента первоочередности  $\Pi$ , начиная от минимальных значений. Указанный коэффициент может быть вычислен по формуле:

$$\Pi = \frac{C_{p_{ок}}}{\Delta k_{эф}}, \quad (5)$$

где  $C_{p_{ок}}$  – окупаемость мероприятия, лет;  $\Delta k_{эф}$  – разница значений критерия энергетической эффективности до и после (прогнозируемое значение) реализации энергосберегающего мероприятия.

Основой для получения коэффициента  $\Pi$  служат топливно-энергетические балансы, построенные без учета и с учетом реализации конкретного мероприятия. На основе данных балансов дается оценка технического эффекта, получаемого от реализации того или иного энергосберегающего мероприятия. Рассмотрение суммарного эффекта целесообразно после изучения отдельных структурных элементов энергосберегающих мероприятий.

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты.

1. На основании проведенного анализа обобщены существующие методики и порядки расчетов основных показателей работы систем теплоснабжения, на основании которых разработана методика оценки энергетической эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий.

2. Предложен критерий энергетической эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий, позволяющий дать оценку существующему состоянию системы теплоснабжения в целом и поэлементно, а также определить очередность реализации энергосберегающих мероприятий. Указанный критерий позволяет не только оценить энергетическую эффективность системы, но и упрощает формирование технико-экономического обоснования перспективной программы энергосбережения.

### Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р). – Текст : электронный. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 22.11.2021).

2. Об утверждении порядка определения нормативов удельного расхода топлива при производстве электрической и тепловой энергии (вместе с «Порядком определения нормативов удельного расхода топлива при производстве электрической и тепловой энергии»). Приказ Минэнерго России от 30.12.2008 № 323 (ред. от 30.11.2015). – Текст: электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902148460> (дата обращения: 22.11.2021).

3. Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя (с изменениями на 10 августа 2012 г.). Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 30 декабря 2008 г. № 325. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902148459> (дата обращения: 22.11.2021).

4. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. – Москва : Минрегион России, 2012. – Текст: непосредственный.

5. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Москва : Минстрой России, 2016. – Текст : непосредственный.

6. Середкин, А. А. Методика и критерий оценки энергоэффективности систем теплоснабжения / А. А. Середкин. Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2017. – Т. 23. – № 1. – С. 27–35.

7. Практическое пособие по выбору и разработке энергосберегающих проектов : в семи разделах, под общей ред. О. Л. Данилова, П. А. Костюченко. – Москва : ЗАО «Технопромстрой», 2006. – 688 с. – Текст : непосредственный.

8. Данилов, Н. И. Основы энергосбережения / Н. И. Данилов, Я. М. Щелоков. – Екатеринбург : Уральский гос. техн. ун-т, 2005. – 564 с. – Текст : непосредственный.

9. Фокин, В. М. Основы энергосбережения в вопросах теплообмена / В. М. Фокин. – Москва : Машиностроение-1, 2005. – 192 с. – Текст : непосредственный.
10. Фрейдкина, Е. М. Методы и критерии оценки эффективности энергосбережения / Е. М. Фрейдкина. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский гос. технолог. ун-т растительных полимеров, 2013. – 52 с. – Текст : непосредственный.
11. Федоров, М. П. Возможности формирования энергобаланса северо-запада России на основе местных ресурсов / М. П. Федоров, М. В. Кривошеев. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – 4-1(183). – С. 31–40.
12. Финиченко, А. Ю. Прогнозирование расхода тепловой энергии на технологические операции предприятиями железнодорожного транспорта / А. Ю. Финиченко – Текст : непосредственный // Повышение энергоэффективности объектов энергетики и систем теплоснабжения : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 13–18.
13. Бараз, В. Р. Корреляционно-регрессионный анализ связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel / В. Р. Бараз. – Екатеринбург : Уральский гос. техн. ун-т, 2005. – 102 с. – Текст : непосредственный.
14. Стрижак, П. А. Энергоэффективность системы теплоснабжения зданий при различных методах регулирования теплопотребления / П. А. Стрижак, М. Н. Морозов. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – № 3 (202). – С. 88–96.

## References

1. *Energeticheskaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda (Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 9 iyunya 2020 g. № 1523-r)* [Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035. (Order of the Government of the Russian Federation dated June 9, 2020 No. 1523-r)], Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed 22 November 2021).
2. *Ob utverzhdenii poryadka opredeleniya normativov udel'nogo raskhoda topliva pri proizvodstve elektricheskoy i teplovoj energii (vmeste s "Poryadkom opredeleniya normativov udel'nogo raskhoda topliva pri proizvodstve elektricheskoy i teplovoj energii")*. (Prikaz Minenergo Rossii ot 30.12.2008 N 323 (red. ot 30.11.2015)) [On approval of the procedure for determining the standards for specific fuel consumption in the production of electrical and thermal energy (together with the "Procedure for determining the standards for specific fuel consumption in the production of electrical and thermal energy"). (Order of the Ministry of Energy of Russia of 12/30/2008 N 323 (as revised on 11/30/2015)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902148460> (accessed 22 November 2021).
3. *Ob utverzhdenii poryadka opredeleniya normativov tekhnologicheskikh poter' pri peredache teplovoj energii, teplonosatelya (s izmeneniyami na 10 avgusta 2012 goda)*. (Prikaz Ministerstva Energetiki Rossijskoj Federacii ot 30 dekabrya 2008 goda N 325) [On approval of the procedure for determining the standards for technological losses during the transfer of heat energy, heat carrier. (as amended on August 10, 2012). Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of December 30, 2008 N 325], Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902148459> (accessed 22 November 2021).
4. *SP 50.13330.2012. Teplovaya zashchita zdaniy* (Thermal protection of buildings. SP 50.13330.2012). Moscow, Ministry of Regional Development of Russia, 2012.
5. *SP 60.13330.2016. Otoplenie, ventilyaciya i kondicionirovanie vozduha* (Heating, ventilation and air conditioning. SP 60.13330.2016). Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2016.
6. Seredkin A. A. Procedure and criterion for energy efficiency assessment of heat supply systems [Metodika i kriterij ocenki energoeffektivnosti sistem teplosnabzheniya]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU – Petersburg State Polytechnical University Journal: Natural and Engineering Sciences*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 27–35.
7. Danilov O. L., Kostychenko P.A. *Prakticheskoe posobie po vyboru i razrabotke energosberegayushchih projektov: v semi razdelah* (A practical guide for the selection and development of energy-saving projects: in seven sections). Moscow: Tekhnopromstroj Publ., 2006, 688 p.

8. Danilov N. I., Scholokov J. M. *Osnovy energosberezheniya (Basics of energy saving)*. Ekaterinburg: Ural State Technical University Publ., 2005, 564 p.
9. Fokin V. M. *Osnovy energosberezheniya v voprosah teploobmena (Basics of energy saving in heat exchange)*. Moscow: Mashinostroyeniye-1 Publ., 2005, 192 p.
10. Freydkina E. M. *Metody i kriterii ocenki effektivnosti energosberezheniya [Methods and criteria for evaluating the efficiency of energy saving: training manual]*. Saint Petersburg: St. Petersburg State Technological University Of Plant Polymers Publ., 2013, 52 p.
11. Fedorov M. P., Krivosheev M.V. The prospects of energy balance formation in north-west of Russian Federation using the local resources [Vozmozhnosti formirovaniya energobalansa severo-zapada Rossii na osnove mestnyh resursov]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU – Petersburg State Polytechnical University Journal: Natural and Engineering Sciences*, 2013, no. 4-1(183), pp. 31 – 40.
12. Finichenko A. Yu. Forecasting of heat consumption for technological operations by railway transport enterprises [Prognozirovanie raskhoda teplovoj energii na tekhnologicheskie operacii predpriyatiyami zheleznodorozhnogo transporta]. *Povyshenie energoeffektivnosti ob"ektov energetiki i sistem teplosnabzheniya : materialy vs Rossijskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Improving the energy efficiency of energy facilities and heat supply systems : materials of the All-Russian scientific and technical conference with international participation)*. – Omsk, 2017, pp. 13 – 18.
13. Baraz B. R. *Korrelyacionno-regressionnyj analiz svyazi pokazatelej kommercheskoj deyatel'nosti s ispol'zovaniem programmy Excel [Correlation and regression analysis of the relationship between business performance indicators using Excel]*. Ekaterinburg: Ural State Technical University Publ., 2005, 102 p.
14. Strizhak P. A., Morozov M. N. Energy efficiency of buildings heating system using various methods of heat consumption regulation [Energoeffektivnost' sistemy teplosnabzheniya zdaniy pri razlichnyh metodah regulirovaniya teplopotrebleniya]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU – Petersburg State Polytechnical University Journal: Natural and Engineering Sciences*, 2014, no. 3 (202), pp. 88 – 96.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Краснов Антон Сергеевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).  
Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.  
Старший преподаватель кафедры «Электротехника и теплоэнергетика», ПГУПС.  
Тел.: +7 (812) 457-85-37.  
E-mail: anton.s.krasnov@gmail.com

### Ким Константин Константинович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).  
Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика», ПГУПС.  
Тел.: +7 (812) 457-81-42.  
E-mail: toe@pgups.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Краснов, А. С. Оценка энергоэффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий / А. С. Краснов, К. К. Ким. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 139 – 150.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Krasnov Anton Sergeevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).  
9, Moscow av., St. Petersburg, 190031, the Russian Federation.  
Senior lecturer of the department «Electrical and heat power engineering», PGUPS.  
Phone: +7 (812) 457-85-37.  
E-mail: anton.s.krasnov@gmail.com

### Kim Konstantin Konstantinovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).  
9, Moscow av., St. Petersburg, 190031, the Russian Federation.  
Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Electrical and heat power engineering», PGUPS.  
Phone: +7 (812) 457-81-42.  
E-mail: toe@pgups.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Krasnov A. S., Kim K. K. Assessment of the energy efficiency of industrial heat supply systems. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 3 (47), pp. 139 – 150 (In Russian).

## Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования;
- электрические станции и электроэнергетические системы;
- энергетические системы и комплексы;
- автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru).

### Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

#### В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

#### Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

#### Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подписи к рисункам и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.0.100–2018;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

*Научное издание*

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 3 (47) 2021

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором) 03 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в официальном каталоге «Подписные издания» АО «Почта России» – ПП914.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;

тел.: +7 (3812) 31-05-54;

e-mail: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

Подписано в печать 27.01.2022.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 31.01.2022.

