

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 2(46)

2021

Транссиба



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 Тадеуш – 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» ТГТУ, 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 Anatolevich – 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 Alexander Leonidovich – 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. Fayzibaev 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., Николаев В. А. Динамика железнодорожного экипажа при действии на него параметрического возбуждения со стороны пути.....2
- Портной А. Ю., Селедцов К. П., Мельниченко О. В. Математическое моделирование механических напряжений, возникающих при неравномерном нагреве остова тягового электродвигателя НБ-514 и совершенствование его конструкции.....13
- Овчаренко С. М., Минаков В. А. Предпосылки совершенствования методики нормирования расхода топлива на маневровое и хозяйственное движение с использованием моделей машинного обучения.....24
- Несенюк Т. А., Соколов В. Н. Исследование влияния климатических факторов на штыревые изоляторы с RFID-индикаторами.....31
- Аржаников Б. А., Баева И. А., Тарасовский Т. С. Разработка методики расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора тиристорно-реакторного устройства регулирования напряжения под нагрузкой на тяговых подстанциях.....40
- Ворон О. А. Возможности использования криогенных технологий для инновационного изотермического подвижного состава.....53
- Смердин А. Н., Тарасенко А. В., Чертков И. Е., Голубков А. С. Разработка вероятностной модели прогнозирования отказов в работе системы токосяема вследствие гололедообразования на проводах контактной сети.....62
- Евсеев Д. Г., Куликов М. Ю., Шинкарук А. С. Повышение долговечности хребтовой балки пассажирского вагона.....71

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Савоськин А. Н., Лунин А. А., Чунин С. В. Разработка стенда для проведения испытаний на рельсошпальной решетке.....77

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

- Соколов М. М., Давыдов А. И. Минимизация времени поиска отказов в аппаратуре релейного конца станционной рельсовой цепи тональной частоты.....85
- Кравченко Е. А., Исаков А. Л., Лю Ц., Ли С. Проблемы стабилизации земляного полотна железных и автомобильных дорог в холодных регионах Китая.....94
- Мухамедова З. Г., Эргашева З. В., Асатов Э. А. К вопросу о развитии транспортной инфраструктуры Узбекистана.....105

Энергетические системы и комплексы

- Гусаров А. С. К вопросу определения выработки электроэнергии на тепловом потреблении в условиях работы автоматизированной системы теплофикации.....115

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Петров К. С., Петров В. В. Астигматическая модель сигнала магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе дискретного подхода.....125

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

УДК 629.4.015:625.1.03

В. А. Нехаев, В. А. Николаев

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

ДИНАМИКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЭКИПАЖА ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НЕГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СО СТОРОНЫ ПУТИ

Аннотация. Изложена методика исследования динамических свойств железнодорожного экипажа при действии на него гармонического параметрического возмущения, обусловленного изменяющейся жесткостью подрельсового основания. Для таких дифференциальных уравнений не существует регулярных методов их решения, более того, их точные решения в настоящее время не известны, поэтому используются приближенные методы. Рассматривается двухстепенная механическая система с гармоническим параметрическим возмущением, описываемая системой обыкновенных однородных дифференциальных уравнений. Один из жесткостных параметров является функцией времени и изменяется в пределах от 2000 до 3000 Н/м. Для вычисления границ динамической неустойчивости (параметрического резонанса) применяется метод обобщенных определителей Хилла, который не требует введения малых параметров. Определена область взаимодействия параметрически возбуждаемых и вынужденных колебаний.

Ключевые слова: механическая система, дифференциальные уравнения, параметрическое возмущение, зоны динамической неустойчивости, нормальная форма Коши, метод обобщенных определителей Хилла, критический коэффициент параметрического возмущения, аддитивное и мультипликативное воздействие.

Viktor A. Nekhaev, Viktor A. Nikolaev

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

THE DYNAMICS OF THE RAILWAY VEHICLE WHEN IT IS ACTIONED BY PARAMETRIC EXCITEMENT FROM THE SIDE OF THE TRACK

Abstract. The method of researching the dynamic properties of the railway crew in the action on it harmonic parametric perturbation, caused by the changing rigidity of the base of the rail, is set out. For such differential equations there are no regular methods of solving them, moreover, their exact solutions are not known at present, so they are used by approaching methods. A two-degree mechanical system with a harmonic parametric perturbation described by a system of ordinary homogeneous differential equations is considered. One of the hard-bone parameters is a function of time and varies from 2000 to 3000 N/m.

To calculate the boundaries of dynamic instability (parametric resonance) a method of generalized Hill definers is used, which does not require the introduction of small parameters. The area of interaction of parametrically excited and forced vibrations has been determined.

Keywords: mechanical system, differential equations, parametric perturbation, dynamic instability zones, normal Koshi shape, Hill generalized deterministic method, critical parametric perturbation factor, additive and multiplier impact.

Известно, что железнодорожный путь является неравножестким по его протяженности, что обусловлено наличием шпал. Следует высказать аналогичную мысль относительно разной эластичности контактной сети, здесь роль, подобную шпалам, играют струны. Параметрическое возбуждение колебаний возможно во многих системах, где движение передается через упругодеформируемые звенья, например, через спарник в колесах локомотива.

Следовательно, в этой области знаний нужно менять парадигму обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами на парадигму дифференциальных уравнений со случайными коэффициентами.

Рассмотрим эквивалентную двухстепенную механическую систему – железнодорожный экипаж, движущийся по пути, жесткость которого периодически изменяется с течением времени (рисунок 1).

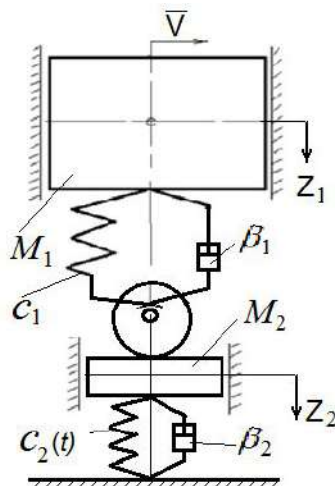


Рисунок 1– Расчётная схема
механической системы
с переменной жёсткостью пути

Динамика такой системы описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений с одним коэффициентом, изменяющимся во времени, например, периодическим образом:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{Z}_1 + b_{1,1}(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) + c_{1,1}(Z_1 - Z_2) = 0; \\ M_2 \ddot{Z}_2 - b_{1,1}(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) + b_{2,1}\dot{Z}_2 - c_{1,1}(Z_1 - Z_2) + c_{2,2}(t)Z_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

или в другом виде:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{Z}_1 + b_{1,1}(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) + c_{1,1}(Z_1 - Z_2) = 0; \\ M_2 \ddot{Z}_2 - b_{1,1}\dot{Z}_1 + (b_{1,1} + b_{2,1})\dot{Z}_2 - c_{1,1}Z_1 + [c_{1,1} + c_{2,2}(t)]Z_2 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В векторно-матричной форме система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

$$A\ddot{\vec{q}} + B\dot{\vec{q}} + C(t)\vec{q} = 0, \quad (3)$$

здесь

$$A = \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix} - \text{матрица инерционных коэффициентов};$$

$$B = \begin{pmatrix} b_{1,1} & -b_{1,2} \\ -b_{2,1} & b_{2,2} \end{pmatrix} - \text{матрица диссипативных коэффициентов};$$

$$C(t) = \begin{pmatrix} c_{1,1} & -c_{1,2} \\ -c_{2,1} & c_{2,2} - 2\mu c_0 \cos 2\Omega t \end{pmatrix} - \text{матрица жёсткостных коэффициентов};$$

$$\vec{q} = \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{pmatrix} - \text{вектор обобщённых координат.}$$

Несколько преобразуем последнее слагаемое в матрице жёсткостных коэффициентов:

$$C(t)\vec{q} = \left[\begin{pmatrix} c_{1,1} & -c_{1,2} \\ -c_{2,1} & c_{2,2} \end{pmatrix} - 2\mu \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & c_0 \end{pmatrix} \cos 2\Omega t \right] \vec{q}. \quad (4)$$

Перейдём к нормальной форме, т. е. к форме Коши, когда система разрешается относительно старших производных, следовательно, новый вектор обобщённых координат

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Тогда система дифференциальных уравнений примет вид;

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = G_0\vec{x} - 2\mu G_1\vec{x} \cos 2\Omega t, \quad (6)$$

здесь

$G_0 = \begin{pmatrix} O & E \\ -A^{-1}C_0 & -A^{-1}B \end{pmatrix}$ – матрица Коши четвёртого порядка;

$G_1 = \begin{pmatrix} O & O \\ -A^{-1}F & O \end{pmatrix}$ – матрица переменной части системы обыкновенных дифференциаль-

ных уравнений четвёртого порядка;

$F = \begin{pmatrix} O & O \\ O & c_0 \end{pmatrix}$ – матрица, характеризующая переменную жёсткость системы в уравнении (4);

$O = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ – нулевая матрица.

Определим собственные частоты механической системы в консервативном случае, полагая, что все жёсткости системы постоянны:

$$A^{-1}C_0 - \lambda^2 E = \begin{vmatrix} c_{1,1} - \lambda^2 & -c_{1,2} \\ -c_{2,1} & c_{2,2} - \lambda^2 \end{vmatrix} = 0, \quad (7)$$

откуда имеем:

$$\lambda^4 - (c_{1,1} + c_{2,2})\lambda^2 + c_{1,1}c_{2,2} - c_{1,2}c_{2,1} = 0. \quad (8)$$

И, положив $\rho = \lambda^2$, получаем квадратное уравнение:

$$\rho^2 - (c_{1,1} + c_{2,2})\rho + c_{1,1}c_{2,2} - c_{1,2}c_{2,1} = 0, \quad (9)$$

решаемое по известным правилам:

$$\lambda_{1,2,3,4} = \pm \sqrt{\frac{c_{1,1} + c_{2,2} \pm \sqrt{(c_{1,1} - c_{2,2})^2 + 4c_{1,2}c_{2,1}}}{2}}. \quad (10)$$

Для исходных данных $M_1 = 100$ кг, $M_2 = 10$ кг, $c_{1,1} = 1000$ Н/м, $c_{1,2} = -1000$ Н/м, $c_{2,1} = -1000$ Н/м, $c_{2,2} = 2500$ Н/м, $c_0 = 500$ Н/м, $b_{1,1} = 10$ Н·с/м, $b_{1,2} = -10$ Н·с/м, $b_{2,1} = -10$ Н·с/м, $b_{2,2} = 20$ Н·с/м критерий малости сил трения

$$\sqrt{\frac{\|(A^{-1}B)^2\|}{\|A^{-1}C_0\|}} = 0,017107 \ll 1 \quad (11)$$

выполнен.

Выражение (11) для одноступенной механической системы имеет хорошо известный вид: $2\eta/\omega_0 = 2\delta$. Вычисления по формуле (10) и нахождение собственных чисел с помощью стандартной функции *Mathcadeigenvals*($A^{-1}C_0$) дают, естественно, одинаковый результат: $k_{01}=2,429663$ и $k_{02}=15,940412$ рад/с (отрицательные значения корней были, естественно, отброшены; около этих значений будут находиться области параметрического резонанса). Заметим, что вычисления велись для консервативного случая, т. е. трение в системе отсутствовало.

В случае малой диссипации параметрических систем область динамической неустойчивости на плоскости μ, ω имеет ряд клиньев, заостряющихся в сторону малых μ . Клинья примыкают к оси частот вблизи значений ω , находящихся в некоторых соотношениях с собственными частотами соответствующей консервативной системы, т. е. с положительными корнями

$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ уравнения $\det(A_0 - \omega^2 B_0) = 0$. Именно эти частотные соотношения соответствуют параметрическим резонансам [4 – 10, 17, 24].

Параметрические резонансы, обычно возникающие вблизи частот,

$$\Omega = \frac{2\omega_k}{p} \left(\begin{matrix} k=1, 2, \dots, n \\ p=1, 2, \dots \end{matrix} \right) \quad (12)$$

называются простыми. Здесь заметим, в механических системах, для которых уравнение

$$A(t) \frac{d^2 \vec{q}}{dt^2} + B(t) \frac{d\vec{q}}{dt} + C(t) \vec{q} = 0 \quad (13)$$

распадается на независимые уравнения, описывающие изменение каждой обобщённой координаты в отдельности, возможны только простые резонансы.

Параметрические резонансы, развивающиеся вблизи частот, определяемых соотношениями

$$\Omega = \frac{|\omega_j \pm \omega_k|}{p} \left(\begin{matrix} j, k=1, 2, \dots, n; j \neq k \\ p=1, 2, \dots \end{matrix} \right), \quad (14)$$

называются комбинационными. Эти резонансы, обусловленные попарным взаимодействием форм колебаний, возможны только в системах, совершающих связанные колебания. В зависимости от знака в правой части формулы (14) различают комбинационные резонансы суммарного типа и комбинационные резонансы разностного типа. В зависимости от значения целых чисел p в соотношениях (12) и (14) различают главные (при $p = 1$) и побочные (при $p \geq 2$) резонансы. Число p называют порядком резонанса.

Итак, хорошо известно [1 – 4, 6 – 9, 12 – 14, 17 – 19], что уравнения (3) и (13) обладают экспоненциально возрастающими, периодическими и убывающими решениями, причём периодические решения возникают при условии, что система находится на границе зоны устойчивости.

Известно, что при выполнении условия Дирихле любое периодическое решение может быть разложено в ряды Фурье. Следовательно, один из способов отыскания границы области неустойчивости основывается на рядах Фурье. Второй же способ состоит в применении обобщённых определителей Хилла, в основе которого лежит представление одного из решений общего уравнения (6) в форме [4]:

$$\vec{x}_k(t) = e^{h_k t} \vec{\chi}_k(t) \quad (k=1, 2, \dots, 2n), \quad (15)$$

где $\chi(t)$ – T -периодические непрерывные функции; $h_k = (1/T) \ln \rho_k$ – характеристические показатели.

Пусть матрица-функция $G(t)$ разложена в ряд Фурье по времени:

$$G(t) = G_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (G_k \cos k\Omega t + H_k \sin k\Omega t) \quad (16)$$

с постоянными коэффициентами – матрицами G_k и H_k .

В нашем примере все матрицы $H_k = 0$ (см. формулу (6)). Метод малого параметра, который в данном случае приводит к простым выражениям первого приближения для границ главных областей неустойчивости, практически не позволяет проводить уточнения этих формул, ибо требует построения высших приближений, что весьма непросто. К тому же метод становится ненадёжным, если глубина модуляции параметров и (или) коэффициенты диссипации γ_k не малы. Наконец, применение метода малого параметра встречает затруднения при переходе к существенно неканоническим системам, а формулы высших приближений чрезвычайно громоздки и плохо алгоритмируются.

Воспользуемся методом обобщённых определителей Хилла, который не требует малости сил трения и малости коэффициентов параметрического возбуждения, а бесконечный определитель оказывается сходящимся при достаточно широких предположениях о свойствах матриц G_k и H_k и, следовательно, допускает редукцию к определителям конечного порядка. Решение уравнения (6) для главных зон динамической неустойчивости будем отыскивать в виде:

$$\vec{x}(t) = \vec{a} \cos \Omega t + \vec{b} \sin \Omega t. \quad (17)$$

Подставляя уравнение (17) в (6), после несложных преобразований получаем:

$$\det[K(\mu) - \lambda E] = 0, \quad (18)$$

где

$$K(\mu) = [A^{-1}(C_0 + \mu F)] \cdot [A^{-1}(C_0 - \mu F)]. \quad (19)$$

Умножая матрицы слева направо или справа налево, мы получим существенно разный результат, поэтому в формуле (19) стоят квадратные скобки, т. е. сначала выполняем действия внутри квадратных скобок, затем полученные результаты перемножаем слева направо.

Решение уравнения (18) для консервативного и диссипативного случаев осуществлялось поиском собственных чисел с помощью стандартной функции *Mathcdeigenvals*($K(\mu)$), результаты представлены на рисунке 2.

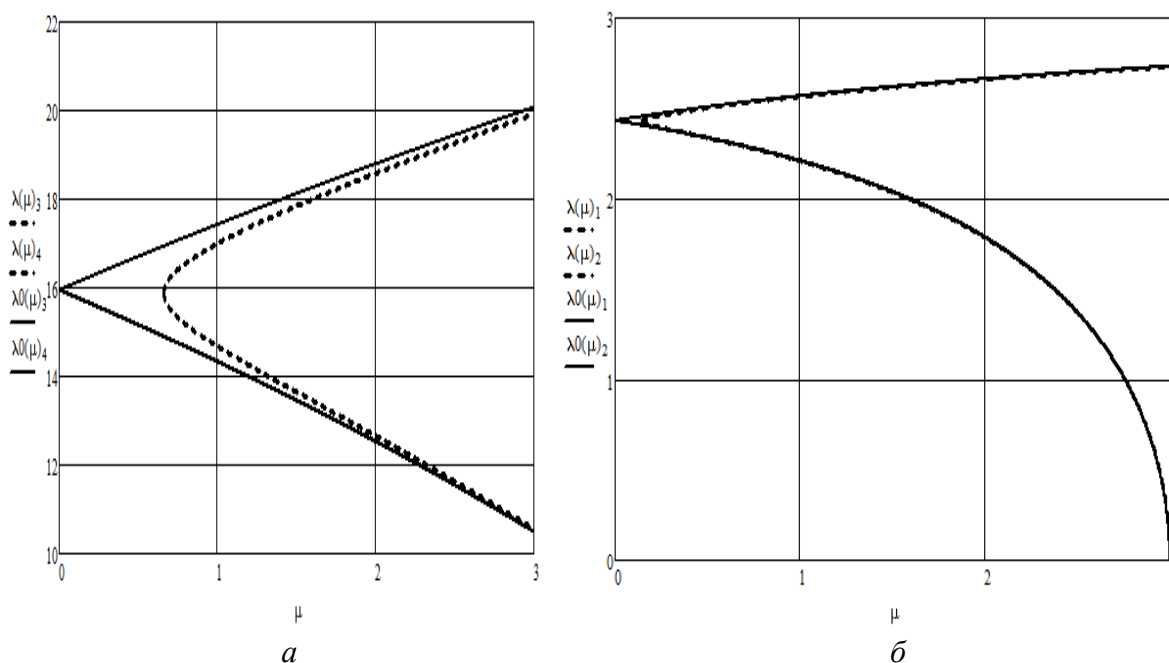


Рисунок 2 – Главные области динамической неустойчивости системы:
а – для колесной пары (второй массы); б – для кузова (первой массы); сплошная линия – в случае консервативной системы, пунктирная линия – в случае диссипативной системы

Из рисунка 2 следует, что трение создаёт порог для коэффициента параметрического возбуждения. В данном случае он равен 0,135 и 0,664 для первой и второй масс соответственно.

Если вести речь о железнодорожном транспорте (хотя мы рассматриваем методологические аспекты исследования параметрических систем), то максимальный коэффициент параметрического возбуждения находится в пределах 0,04 – 0,06. Следовательно, в чистом виде параметрические колебания возникнуть не могут, в противном случае амплитуда колебаний второй массы экспоненциально возрастала бы. Поэтому опасность параметрического резонанса значительно выше обычного резонанса, при котором амплитуда обязательно ограничена диссипативными силами. Ничего подобного при параметрическом резонансе не наблюдается.

Таким образом, серьёзной опасности для выбранной механической системы параметрическое воздействие может быть и не представляет, но есть одно замечание. Оно касается зоны, расположенной между сплошной и штриховой кривыми, так как В. В. Болотиным установлена возможность взаимодействия параметрически возбуждаемых и вынужденных колебаний [4, 10]. Это возможно тогда, когда длина геометрической неровности железнодорожного пути приблизительно в два раза больше междупального расстояния, т. е. $l_n \approx 1,08 - 1,1$. Параметрическое возбуждение может как увеличивать, так и уменьшать амплитуду вынужденных колебаний, всё зависит от фазового соотношения между ними.

Частота параметрического возбуждения связана со скоростью движения экипажа V и с междупальным расстоянием $l_{\text{шп}}$ так:

$$\Omega = \frac{\pi V}{3,6 l_{\text{шп}}}. \quad (20)$$

График для скоростей движения экипажа, построенный на основании формулы (20), показан на рисунке 3. Ещё раз подчеркнём, что мы не рассматриваем конкретный железнодорожный экипаж, а используем произвольную механическую систему с двумя степенями свободы и при параметрическом изменении жёсткости крепления системы к основанию. Разговор может идти о железнодорожном транспорте, расчётная схема которого в принципе подобна исследуемой механической системе. Заметим, что рассматриваемая механическая система обладает достаточной диссипацией, поэтому возбудить чистые параметрические колебания в ней практически невозможно, так как критический коэффициент параметрического возбуждения составляет порядка 0,664. С этой точки зрения возбудить простой параметрический резонанс первой массы значительно проще, ибо критический коэффициент параметрического воздействия равен 0,135 (это в пять раз меньше, чем для второй массы).

Железнодорожникам известно, что собственная частота подпрыгивания колёсной пары практически любого подвижного состава лежит в пределах от 15 до 30 Гц (от 94,25 до 188,5 рад/с). Следовательно, чтобы говорить о зоне параметрического резонанса конкретного железнодорожного подвижного состава, нужно ординаты графика, представленного на рисунке 3, a , умножить на 4,7 – 9,1. Тогда эти резонансные скорости, находящиеся в диапазоне от 50 до 100 км/ч, попадают в зону эксплуатационных скоростей. Это означает, что в области, ограниченной сплошной и пунктирной кривыми, мультипликативное возмущение может взаимодействовать с возмущающей силой, действующей на железнодорожный подвижной состав.

Если продолжить говорить о железнодорожном подвижном составе, например, о кузове гружёного вагона, то собственная частота подпрыгивания кузова составляет порядка 2 – 3 Гц, но нам эти величины следует перевести в радианы в секунду, т. е. нужно умножить на 2π . В результате получим 12,56 – 18,85, а расчёты были выполнены для частоты первой массы, равной 2,43. Следовательно, чтобы оценить критические скорости движения системы, нужно ординаты графика на рисунке 3, b умножить на 6,28. Тогда получим, что зона резонансных скоростей располагается в диапазоне 8 – 10 км/ч. Другими словами, опасаться каких-то параметрических колебаний кузова вагона не приходится, ибо найденный диапазон скоростей не попадает в область эксплуатационных скоростей.

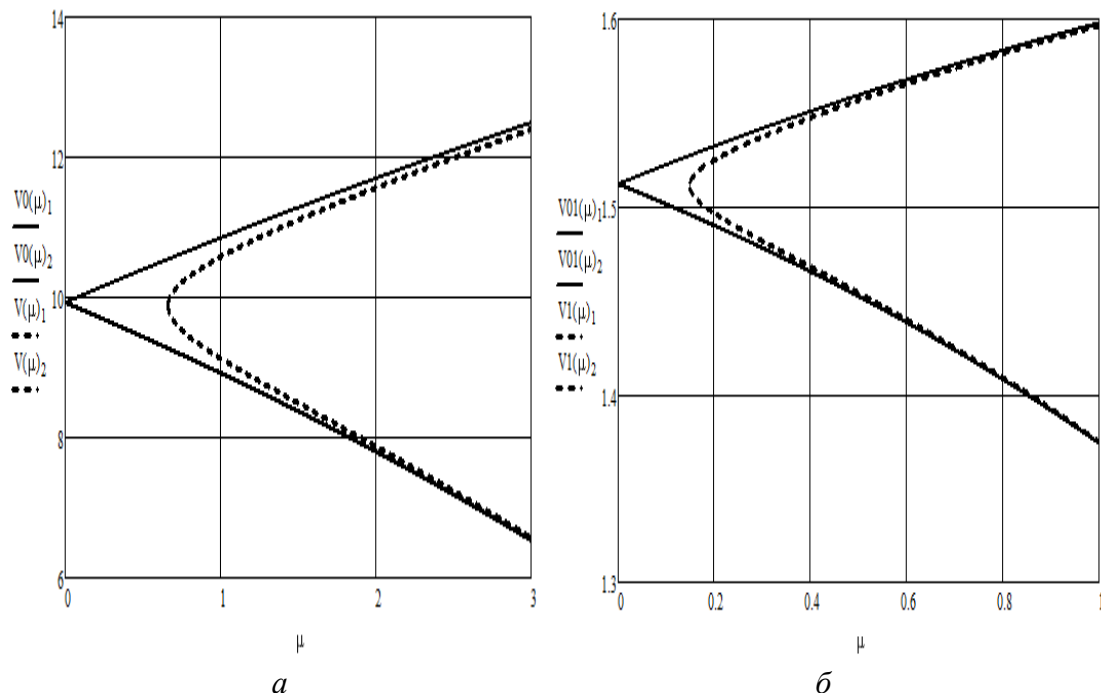


Рисунок 3 – Экспертные оценки критической скорости движения условного двухстепенного одноосного железнодорожного экипажа, км/ч: *а* – для второй массы (например, колёсная пара); *б* – для первой массы (например, кузов)

Выше было указано на возможность существования комбинационных резонансов суммарного или разностного типа. Методика отыскания границ указанных резонансов чрезвычайно сложна. В источнике [24] установлено, что в канонических системах, которые удовлетворяют условию

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = JH(t)\vec{x}, \quad (21)$$

где $H(t)$ – симметричная матрица-функция; J – матрица вида

$$J = \begin{pmatrix} 0 & E_n \\ -E_n & 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

(E_n – единичная матрица размерности n), возможны только резонансы суммарного типа. Уравнения (21) в компонентах имеют ту же структуру, что и канонические уравнения Гамильтона в аналитической механике. Системы уравнений, приводимые к виду (21), а также соответствующие механические системы называются каноническими.

Чтобы отыскать условия существования комбинационных резонансов, воспользуемся мультипликаторами, которые находятся с помощью матрицы монодромии. Для этого численно методом Рунге – Кутты необходимо проинтегрировать систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -2n_{1,1}x_2 + 2n_{1,2}x_4 - c_{1,1}x_1 + c_{1,2}x_3; \\ \dot{x}_3 = x_4; \\ \dot{x}_4 = 2n_{2,1}x_2 - 2n_{2,2}x_4 + c_{2,1}x_1 - (c_{2,2} - 2\mu c_0 \cos 2\Omega t)x_3 \end{cases} \quad (23)$$

при следующих начальных условиях:

$$X(0) = E. \quad (24)$$

Итак, необходимо решить четыре раза дифференциальные уравнения (23) и по результатам составить матрицу монодромии

$$R = X(T) \quad (25)$$

для случая комбинационного резонанса разностного типа, когда частота параметрического возмущения

$$\frac{|k_{01} - k_{02}|}{2}(1 - \alpha) = 5,422079. \quad (26)$$

Поведение мультипликаторов в зависимости от коэффициента параметрического возбуждения представлено на рисунке 4.

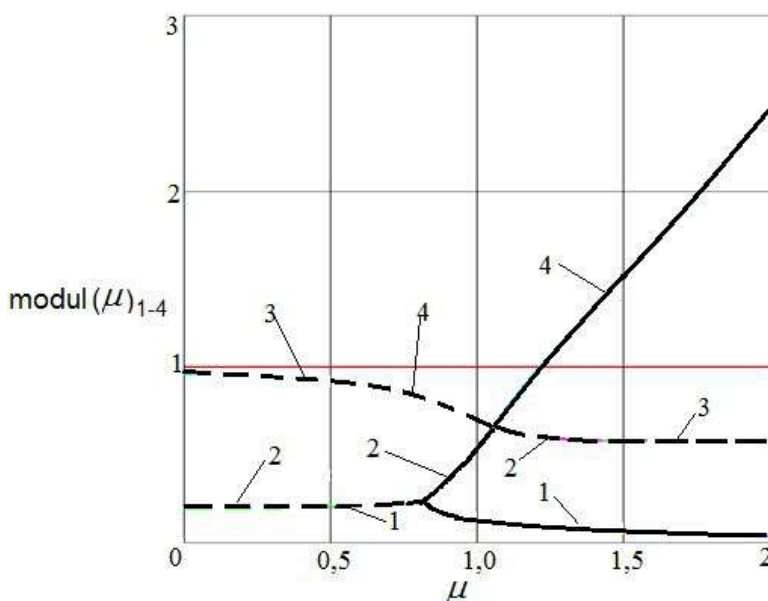


Рисунок 4 – Поведение мультипликаторов параметрической системы

Из рисунка 4 очевидно, что только модуль одного из четырёх мультипликаторов превышает единицу, следовательно, в рассматриваемой системе вполне вероятно возникновение и развитие комбинационного резонанса разностного типа, если коэффициент параметрического возбуждения будет больше $\mu \geq 1,209$ (зафиксированная в экспериментах величина коэффициента параметрического возбуждения находится в пределах 0,04 – 0,06). Найти границы этой области неустойчивости с использованием матрицы монодромии чрезвычайно трудоёмко. Нужно искать метод определения границ, который был бы эффективным и достаточно простым.

Обратимся к выводам, которые можно получить в результате проведенного исследования.

1. Главный вывод заключается в том, что в чистом виде параметрические колебания (если считать железнодорожный путь неравноупругим) на подвижном составе возникнуть не могут, так как последний сильно демпфирован.

2. Экспертная оценка критических скоростей движения подвижного состава показывает, что они находятся в пределах 8 – 10 км/ч и 50 – 100 км/ч (попадает в зону эксплуатационных скоростей движения поездов), т. е. наиболее опасным параметрическое воздействие является для колесной пары экипажа.

3. Наиболее широкой зоной является область динамической неустойчивости той массы, на которую непосредственно воздействует неравноупругость (в нашем случае это нижняя

масса экипажа, т. е. колесная пара). Следует подчеркнуть, что предыдущая парадигма динамики подвижного состава указывала на два конкретных значения скорости движения экипажа, на которых возможны резонансные явления, и определялись они собственными частотами подпрыгивания, например, кузова и колесной пары.

4. Зона значений коэффициента параметрического возмущения, находящаяся между сплошной и штриховой кривыми (см. рисунок 2), – это область взаимодействия параметрически возбуждаемых и вынужденных колебаний. Она нуждается в подробном аналитическом исследовании согласно работам [10, 24 – 27].

5. Установлено, что в рассматриваемой механической системе, в некотором смысле уподобленной железнодорожному подвижному составу, вероятно возбуждение разностных комбинационных резонансов, если коэффициент параметрического возбуждения превысит его критическое значение, равное 1,209.

6. В статье уделено внимание только мультипликационному аспекту действия параметрического возбуждения, но существует и второй аддитивный аспект, заключающийся в том, что на узлы подвижного состава будут действовать переносные ускорения (а это не такие уж малые величины), являющиеся инерционным внешним воздействием.

7. Переход на парадигму дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами обосновывается тем, что еще отсутствуют корректные оценки используемых ныне дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

8. Уравнения (1) – (3) являются автономными, т. е. внешние возмущения в механической системе отсутствуют, однако в действительности существуют геометрические неровности на поверхности катания рельсов и колесных пар (например, неравномерный прокат колес по кругу катания).

Если учесть это обстоятельство, то при наличии параметрического возмущения в системе решение задачи о вынужденных колебаниях существенным образом усложняется, ибо всё зависит от вида внешнего возмущения – детерминированное оно или случайное. В последнем случае применение метода моментов позволит свести задачу к системе детерминистических дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами относительно первого и второго порядков переменных состояния.

Для детерминистических уравнений, как известно, существуют хорошо апробированные и надежные методы построения аналитических и численных решений [4 – 9, 24 – 27].

Список литературы

1. Смирнов, В. И. Курс высшей математики / В. И. Смирнов. – Москва : Наука, 1974. – Т. II. – 656 с. – Текст : непосредственный.
2. Мак-Лахлан, Н. В. Теория и приложения функций Матъе / Н. В. Мак-Лахлан. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 1953. – 476 с. – Текст : непосредственный.
3. Бондаренко, Г. В. Уравнение Хилла и его применение в области технических колебаний / Г. В. Бондаренко. – Москва-Ленинград : АН СССР, 1936. – 58 с. – Текст : непосредственный.
4. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – Москва : Гостехиздат, 1956. – 600 с. – Текст : непосредственный.
5. Болотин, В. В. Случайные колебания упругих систем / В. В. Болотин. – Москва : Наука, 1979. – 417 с. – Текст : непосредственный.
6. Якубович, В. А. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения / В. А. Якубович, В. М. Старжинский. – Москва : Наука, 1972. – 720 с. – Текст : непосредственный.
7. Якубович, В. А. Параметрический резонанс в линейных системах / В. А. Якубович, В. М. Старжинский. – Москва : Наука, 1987. – 328 с. – Текст : непосредственный.
8. Хасьминский, Р. З. Устойчивость систем дифференциальных уравнений при случайных возмущениях их параметров / Р. З. Хасьминский. – Москва : Наука, 1969. – 367 с. – Текст : непосредственный.

9. Шмидт, Г. Параметрические колебания / Г. Шмидт. – Москва : Мир, 1978. – 336 с. – Текст : непосредственный.
10. Болотин, В. В. Об одной механической модели, описывающей взаимодействие параметрических и вынужденных колебаний / В. В. Болотин. – Текст : непосредственный // Труды МЭИ. – 1959. – Вып. 32. – С. 54–66.
11. Витт, А. А. Колебания упругого маятника как пример двух параметрически связанных линейных систем / А. А. Витт, Г. С. Горелик. – Текст : непосредственный // Журнал технической физики. – 1933. – Т. 3. – № 2-3. – С. 294–307.
12. Арнольд, В. И. Устойчивые колебания с гармонической по пространству и периодической по времени потенциальной энергией / В. И. Арнольд. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и механика. – 1979. – Т. 43. – № 2. – С. 360–363.
13. Ивович, В. А. Автопараметрические колебания виброизолированной системы с нелинейными характеристиками / В. А. Ивович. – Текст : непосредственный // Прикладная механика. – 1966. – Т. 2. – Вып. 12. – С. 76–81.
14. Андронов, А. А. Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. – Москва : Физматгиз, 1959. – 989 с. – Текст : непосредственный.
15. Квакернаак, Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван. – Москва : Мир, 1977. – 650 с. – Текст : непосредственный.
16. Соколов, М. М. Динамическая нагруженность вагона / М. М. Соколов, В. Д. Хусидов, Ю. Г. Минкин. – Москва : Транспорт, 1981. – 207 с. – Текст : непосредственный.
17. Магнус, К. Колебания: введение в исследование колебательных систем / К. Магнус. – Москва : Мир, 1982. – 304 с. – Текст : непосредственный.
18. Каннингхэм, В. Введение в теорию нелинейных систем: пер. с англ. / В. Каннингхэм. – Москва-Ленинград : Госэнергоиздат, 1962. – 456 с. – Текст : непосредственный.
19. Булгаков, Б. В. Колебания / Б. В. Булгаков. – Москва : ГИТТЛ, 1954. – 892 с. – Текст : непосредственный.
20. Гребеников, Е. А. Метод усреднения в прикладных задачах / Е. А. Гребеников. – Москва : Наука, 1986. – 256 с. – Текст : непосредственный.
21. Моисеев, Н. Н. Асимптотические методы нелинейной механики / Н. Н. Моисеев. – Москва : Наука, 1969. – 380 с. – Текст : непосредственный.
22. Пахомов, М. П. Воздействие электровоза на путь в зоне стыка / М. П. Пахомов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1957. – № 4. – С. 30–34.
23. 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.
24. Вибрации в технике: справочник. В 6 томах. Т. 1. Колебания линейных систем / пред. ред. сов. В. Н. Челомей. – Москва : Машиностроение, 1978. – 352 с. – Текст : непосредственный.
25. Болотин, В. В. Случайные колебания упругих систем / В. В. Болотин. – Москва : Наука, 1979. – 336 с. – Текст : непосредственный.
26. Диментберг, М. Ф. Нелинейные стохастические задачи механических колебаний / М. Ф. Диментберг. – Москва : Наука, 1980. – 368 с. – Текст : непосредственный.
27. Диментберг, М. Ф. Случайные процессы в динамических системах с переменными параметрами / М. Ф. Диментберг. – Москва : Наука, 1989. – 176 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Smirnov V. I. *Kurs vysshei matematiki* (Higher Mathematics course). Moscow: Nauka Publ., 1974, vol. 2, 656 p.
2. Mak-Lakhlan N. V. *Teoriia i prilozheniia funktsii Mat'e* (Theory and applications of Mathieu functions). Moscow: Foreign literature Publ., 1953, 476 p.
3. Bondarenko G. V. *Uravnenie Khilla i ego primenenie v oblasti tekhnicheskikh kolebanii* (Hill equation and its application in the field of technical oscillations). Moscow-Leningrad: USSR Academy Of Sciences Publ., 1936, 58 p.
4. Bolotin V. V. *Dinamicheskaia ustoichivost' uprugikh sistem* (Dynamic stability of elastic systems). Moscow: Gostekhizdat Publ., 1956, 600 p.

5. Bolotin V. V. *Sluchainye kolebaniia uprugikh sistem* (Random oscillations of elastic systems). Moscow: Nauka Publ., 1979, 417 p.
6. Iakubovich V. A., Starzhinskii V. M. *Lineinye differentsial'nye uravneniia s periodicheskimi koeffitsientami i ikh prilozheniia* (Linear differential equations with periodic coefficients and their applications). Moscow: Nauka Publ., 1972, 720 p.
7. Iakubovich V. A., Starzhinskii V. M. *Parametricheskii rezonans v lineinykh sistemakh* (Parametric resonance in linear systems). Moscow: Nauka Publ., 1987, 328 p.
8. Khas'minskii R. Z. *Ustoichivost' sistem differentsial'nykh uravnenii pri sluchainykh vozmushcheniiakh ikh parametrov* (Stability of systems of differential equations under random perturbations of their parameters). Moscow: Nauka Publ., 1969, 367 p.
9. Shmidt G. *Parametricheskie kolebaniia* (Parametric oscillations). Moscow: Mir Publ., 1978, 336 p.
10. Bolotin V. V. On a mechanical model describing the interaction of parametric and forced oscillations [Ob odnoi mekhanicheskoi modeli, opisuyaiushchei vzaimodeistvie parametricheskikh i vynuzhdennykh kolebani]. *Trudy MEI – Proceedings of the MEI*, 1959, no. 32, pp. 54–66.
11. Vitt A. A., Gorelik G. S. Oscillations of an elastic pendulum as an example of two parametrically coupled linear systems [Kolebaniia uprugogo maiatnika kak primer dvukh parametricheski svyazannykh lineinykh sistem]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Journal of Technical Physics*, 1933, vol. 3, no. 2-3, pp. 294–307.
12. Arnol'd V. I. Stable oscillations with harmonic in space and periodic in time potential energy [Ustoichivye kolebaniia s garmonicheskoi po prostranstvu i periodicheskoi po vremeni potentsial'noi energiei]. *Prikladnaia matematika i mekhanika – Applied Mathematics and Mechanics*, 1979, vol. 43, no. 2, pp. 360–363.
13. Ivovich V. A. Autoparametric oscillations of a vibration-insulated system with nonlinear characteristics [Avtoparametricheskie kolebaniia vibroizolirovannoi sistemy s nelineinymi kharakteristikami]. *Prikladnaia mekhanika – Applied mechanics*, 1966, vol. 2, no. 12, pp. 76–81.
14. Andronov A. A. *Teoriia kolebani* (Oscillation theory). Moscow: Fizmatgiz Publ., 1959, 989 p.
15. Kvakernaak Kh., Sivan R. *Lineinye optimal'nye sistemy upravleniia* (Linear optimal control systems). Moscow: Mir Publ., 1977, 650 p.
16. Sokolov M. M., Khusidov V. D., Minkin Iu. G. *Dinamicheskaiia nagruzhennost' vagona* (Dynamic loading of the car). Moscow: Transport Publ., 1981, 207 p.
17. Magnus K. *Kolebaniia: vvedenie v issledovanie kolebatel'nykh sistem* (Oscillations: an introduction to the study of oscillatory systems). Moscow: Mir Publ., 1982, 304 p.
18. Kanningkhem V. *Vvedenie v teoriuu nelineinykh sistem: perevod s angliiskogo iazyka* (Introduction to the theory of nonlinear systems: translated from English). Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1962, 456 p.
19. Bulgakov B. V. *Kolebaniia* (Oscillations). Moscow: GITTL Publ., 1954, 892 p.
20. Grebenikov E. A. *Metod usredneniia v prikladnykh zadachakh* (Averaging method in applied problems). Moscow: Nauka Publ., 1986, 256 p.
21. Moiseev N. N. *Asimptoticheskie metody nelineinoi mekhaniki* (Asymptotic methods of nonlinear mechanics). Moscow: Nauka Publ., 1969, 380 p.
22. 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.
23. Pakhomov M. P. Experimental studies of electric locomotives' vibrations and their impact on the track [Eksperimental'nye issledovaniia kolebani elektrovovozov i ikh vozdeistviia na put']. *Nauchnye trudy MIITa – Scientific works of MIIT*, 1958, no. 108, pp. 44–64.
24. *Vibratsii v tekhnike: spravochnik. V 6 tomakh. T. 1. Kolebaniia lineinykh sistem, predsedatel' redaktsionnogo soveta V. N. Chelomei* (Vibrations in technology: a reference book. In 6 volumes. Vol. 1. Oscillations of linear systems, Chairman of the Editorial Board V. N. Chelomey). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978, 352 p.
25. Bolotin V. V. *Sluchainye kolebaniia uprugikh sistem* (Random oscillations of elastic systems). Moscow: Nauka Publ., 1979, 336 p.
26. Dimentberg M. F. *Nelineinye stokhasticheskie zadachi mekhanicheskikh kolebani* (Nonlinear stochastic problems of mechanical vibrations). Moscow: Nauka Publ., 1980, 368 p.

27. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Николаев Виктор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

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

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Нехаев, В. А. Динамика железнодорожного экипажа при действии на него параметрического возбуждения со стороны пути / В. А. Нехаев, В. А. Николаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 2 – 13.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nekhaev Viktor Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., 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

Nikolaev Viktor Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nekhaev V. A., Nikolaev V. A. The dynamics of the railway vehicle when it is actioned by parametric excitement from the side of the track. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 2 (46), pp. 2 – 13 (In Russian).

УДК 629.423.31

А. Ю. Портной, К. П. Селедцов, О. В. Мельниченко

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ НАГРЕВЕ ОСТОВА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НБ-514 И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

Аннотация. Целью данной работы является исследование причин возникновения трещин в остовах тяговых двигателей электропоездов. Приведен анализ статистики выявления трещин в остовах тяговых электродвигателей НБ-514 на Восточном полигоне, показывающий, что каждый третий остов в эксплуатации имеет трещины. Использован способ математического моделирования на ЭВМ с применением метода конечных элементов. Отмечено, что проведение измерений в зоне возникновения трещин тензометрическим методом практически невозможно из-за геометрии остова. Рассмотрены результаты математического моделирования механических напряжений, возникающих в остовах тягового электродвигателя НБ-514 при его неравномерном нагреве до температур, характерных для часового режима работы тягового электродвигателя. Показано, что механические напряжения, возникающие только из-за разности температур окружающего воздуха и обмоток главных и дополнительных полюсов тягового электродвигателя, могут достигать 100 МПа. Предложены варианты изменения конструкции вентиляционных окон остова для уменьшения величины температурных напряжений

при неизменной площади вентиляционных отверстий. При коррекции формы вентиляционных окон остова тягового электродвигателя указанные напряжения могут быть снижены до 76 МПа. Сделан вывод о том, что одной из основных причин образования трещин в остовах тяговых электродвигателей являются циклически повторяющиеся температурные напряжения, что особенно важно для электровозов, работающих на горно-перевальных участках в режиме подталкивания. Отмечено, что появление механических напряжений в остове тягового электродвигателя также зависит от вибраций, возникающих от пути и работы зубчатой передачи, а также от переменной части магнитного поля электродвигателя, которые в настоящее время детально не исследованы.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, механические напряжения, температурные напряжения, нагрев электродвигателя, математическое моделирование, тяговый электроподвижной состав.

Aleksandr Y. Portnoy, Konstantin P. Seledtsov, Oleg V. Melnichenko

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

MATHEMATICAL SIMULATION OF MECHANICAL STRESSES ARISING AT UNEVEN HEATING OF THE TRACTION ELECTRIC MOTOR NB-514 AND IMPROVEMENT OF ITS DESIGN

Abstract. The purpose of this work is to determine the causes of cracks in the frame of traction motors of electric locomotives. An analysis of the statistics of detecting cracks in the frame of NB-514 traction motors at the Eastern testing area is presented, showing that every third frame in operation has cracks. The method of mathematical modeling on a computer with the use of FEM was used. It is noted that carrying out measurements in the crack initiation zone by the tensometric method is practically impossible due to the geometry of the frame. The results of mathematical modeling of mechanical stresses arising in the frame of the NB-514 traction motor during its uneven heating to temperatures characteristic of the hourly mode of operation of the traction motor are considered. It is shown that mechanical stresses arising only due to the temperature difference between the ambient air and the windings of the main and additional poles of the traction motor can reach 100 MPa. Variants of changing the design of the ventilation windows of the frame are proposed to reduce the magnitude of temperature stresses with a constant area of the ventilation openings. When correcting the shape of the ventilation windows of the traction motor frame, these voltages can be reduced to 76 MPa. It was concluded that one of the main reasons for the formation of cracks in the frame of traction motors are cyclically repeating temperature stresses, which is especially important for electric locomotives operating on mountain pass sections in the pushing mode. It is noted that the appearance of mechanical stresses in the backbone of the traction motor also depends on vibrations arising from the path and operation of the gear train, as well as on the variable part of the magnetic field of the motor, which are not currently studied in detail.

Keywords: traction motor, mechanical stresses, temperature stresses, heating of electric motor, math modeling, traction electric rolling stock.

Одной из приоритетных задач в сфере железнодорожного транспорта является повышение надежности и безопасности перевозочного процесса [1]. В связи с этим особое внимание следует уделять техническому состоянию наиболее важных узлов подвижного состава, необходимо своевременно выявлять причины ухудшения их состояния.

В настоящее время тяговыми электродвигателями НБ-514 оборудованы все электровозы серий ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К. Всего их насчитывается более 1600 единиц. Тяговые электродвигатели относятся к наиболее нагруженному оборудованию электровозов с точки зрения комплексного воздействия на них тепловых, электрических, механических и климатических факторов. Поэтому несмотря на постоянно проводимые мероприятия технологического характера при изготовлении и ремонте локомотивов уровень повреждаемости тяговых электродвигателей в эксплуатации остается довольно высоким [2]. При этом в исследованиях тепловых моделей тяговых электродвигателей внимание ученых уделяется тепловым процессам в обмотках двигателей, а температурные напряжения, возникающие в остове, не рассматриваются [3 – 11].

Следует отметить, что появление механических напряжений в остове зависит также от вибраций, возникающих от пути и работы зубчатой передачи, а также от переменной части магнитного поля электродвигателя, которые в настоящее время также детально учеными не

исследованы. Оценка влияния этих факторов является целью дальнейших исследований. В данной работе они не рассматриваются.

Актуальность данной статьи обусловлена образованием трещин в остовах тяговых электродвигателей. На основе производственных данных группы компаний «ЛокоТех», представленных на рисунке 1, можно сделать вывод о том, что каждый третий остов ТЭД в эксплуатации имеет трещины, показанные на рисунке 2, *а*. Причём образование трещин у разных остовов происходит в одном и том же месте (рисунок 2, *б*). Данные трещины возникают вблизи вентиляционных окон с коллекторной стороны двигателя. Наличие таких трещин может привести к ускоренному выходу из строя двигателя, что в свою очередь потребует постановки электровоза на неплановый ремонт, который связан со значительными затратами. Следует отметить, что проведение измерений в зоне возникновения трещин тензометрическим методом практически невозможно из-за геометрии остова.

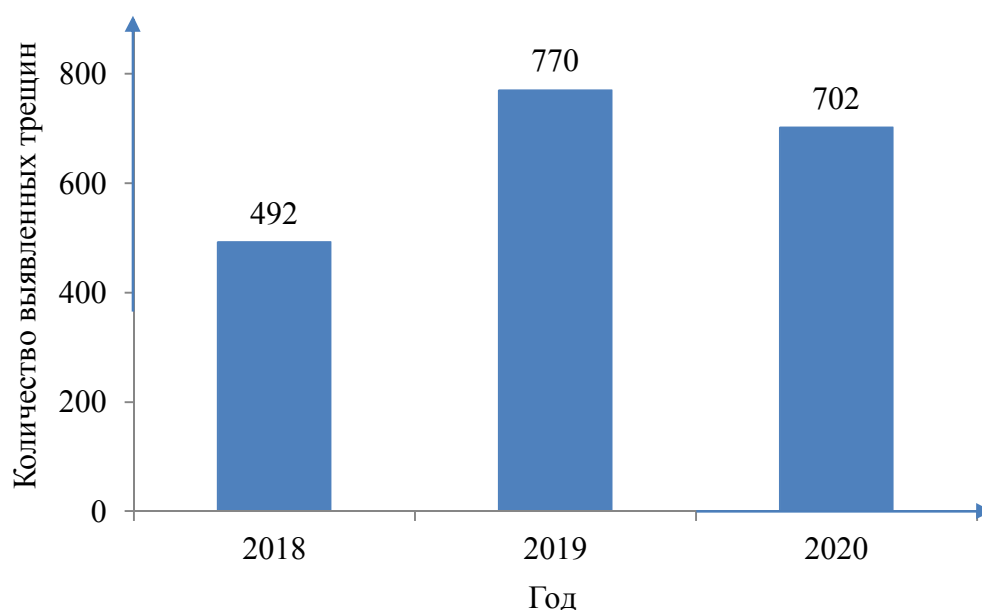


Рисунок 1 – Статистика выявления трещин в остовах тяговых двигателей электровозов ВЛ85 и 2,3,4ЭС5К на Восточном полигоне

Целью данной работы является определение причин возникновения трещин в остовах тяговых двигателей электровозов.

Изучение возникающих напряжений разделяется на две задачи – изучение температурного распределения в остове двигателя, возникающего при его нагреве, и изучение механических напряжений, возникающих вследствие тепловых деформаций.

Решение данных задач аналитическими методами является трудоемким процессом ввиду большого количества факторов, которые могут влиять на возникновение трещин в остове. Для решения таких задач эффективнее всего использовать способ математического моделирования на ЭВМ с применением метода конечных элементов.

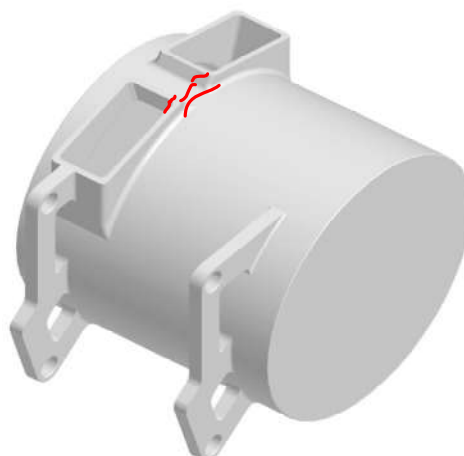
Метод конечных элементов может быть обобщен практически на неограниченный класс задач благодаря тому, что позволяет использовать элементы различных форм для получения сеточных разбиений любых нерегулярных областей. Нагрузки и граничные условия могут иметь произвольный вид. Метод применим ко всем классам проблем распределения полей, которые включают в себя анализ конструкций, перенос тепла, течение жидкости и электромагнетизм [12 – 14].

При использовании метода конечных элементов модель остова разбивается на конечные элементы, достаточно точно описывающие геометрию конструкции. Криволинейная область аппроксимируется с помощью прямолинейных элементов. Размеры элементов могут быть

уменьшены в тех областях, где ожидаемый результат может существенно меняться, и увеличены там, где ожидаемый результат почти постоянен. При использовании полученных значений температуры в узловых точках она может быть аппроксимирована внутри всего конечного элемента. Таким образом, может быть рассчитана температура в любой точке расчетного контура, что дает полное представление о температурном поле.



а



б

Рисунок 2 – Трещины в остова тягового электродвигателя НБ-514: *а* – фотографии возникающих трещин; *б* – схема расположения трещин на упрощенной модели

Для выявления причин возникновения трещин создана упрощенная 3D-модель остова тягового электродвигателя НБ-514 (рисунок 3). С помощью программного комплекса Femap были проведены тепловой расчет остова и прочностный расчет, при котором нагрузкой на остов служили рассчитанные ранее значения температуры. Для проведения расчета материалу модели были заданы свойства стали 25Л. Точки закрепления остова принимаются стандартные для опорно-осевого подвешивания тягового электродвигателя НБ-514 [15].

Для проведения теплового расчета была задана температурная модель нагрева остова, представленная на рисунке 4. В зоне расположения обмотки возбуждения двигателя температура задана 180 и 40 °С в зоне вентиляционных окон, что имитирует температуру окружающего воздуха. Температура 180 °С выбрана как характерная для часового режима работы тягового электродвигателя. Примененная температурная модель является подходящей для решаемой задачи, в которой анализируются механические напряжения, возникающие в зоне между вентиляционными окнами двигателя вдали от обмоток полюсов. Естественно, при анализе механических напряжений, возникающих вблизи обмоток, требуется более сложная модель, учитывающая форму сердечников, обмоток и т. д.

Результаты теплового расчета представлены на рисунке 5.

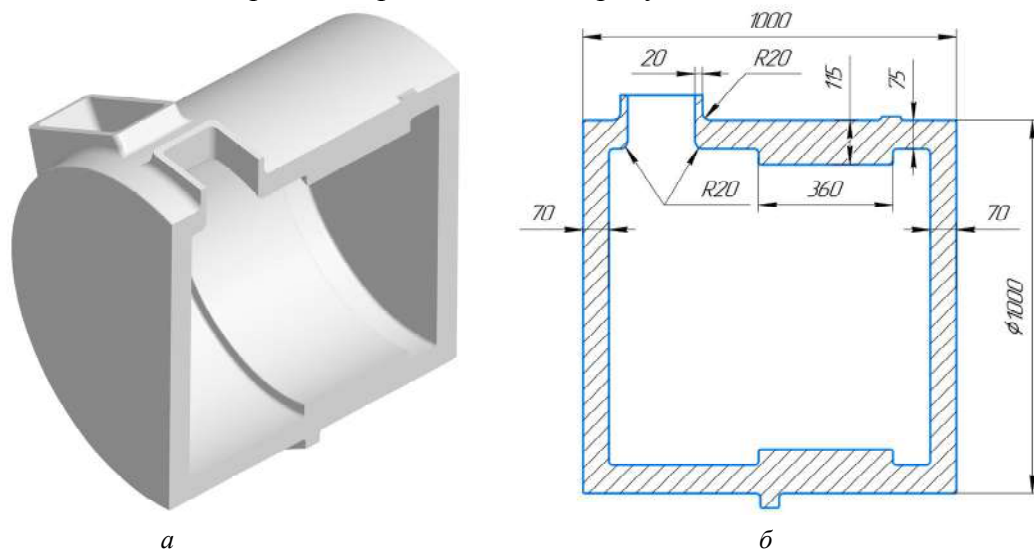


Рисунок 3 – Упрощенная модель остова тягового электродвигателя НБ-514

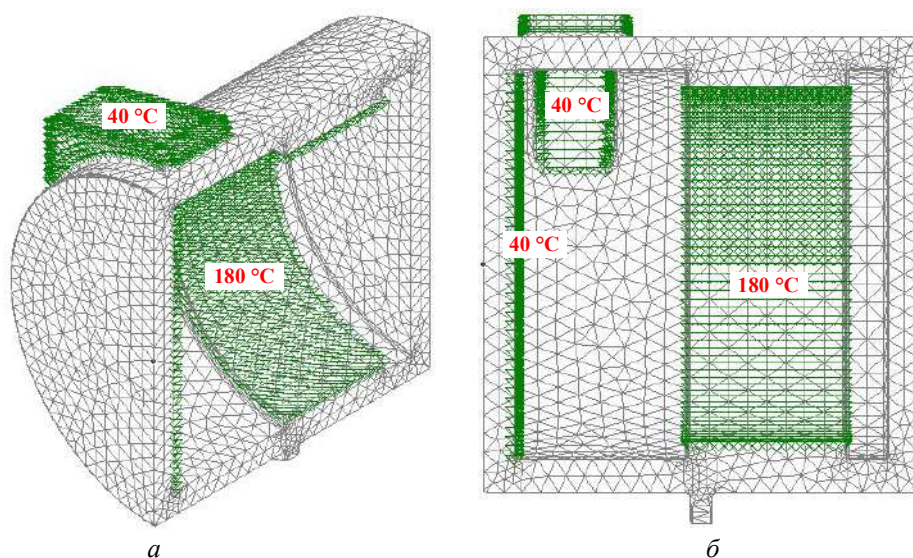


Рисунок 4 – Заданная температура нагрева остова тягового электродвигателя НБ-514

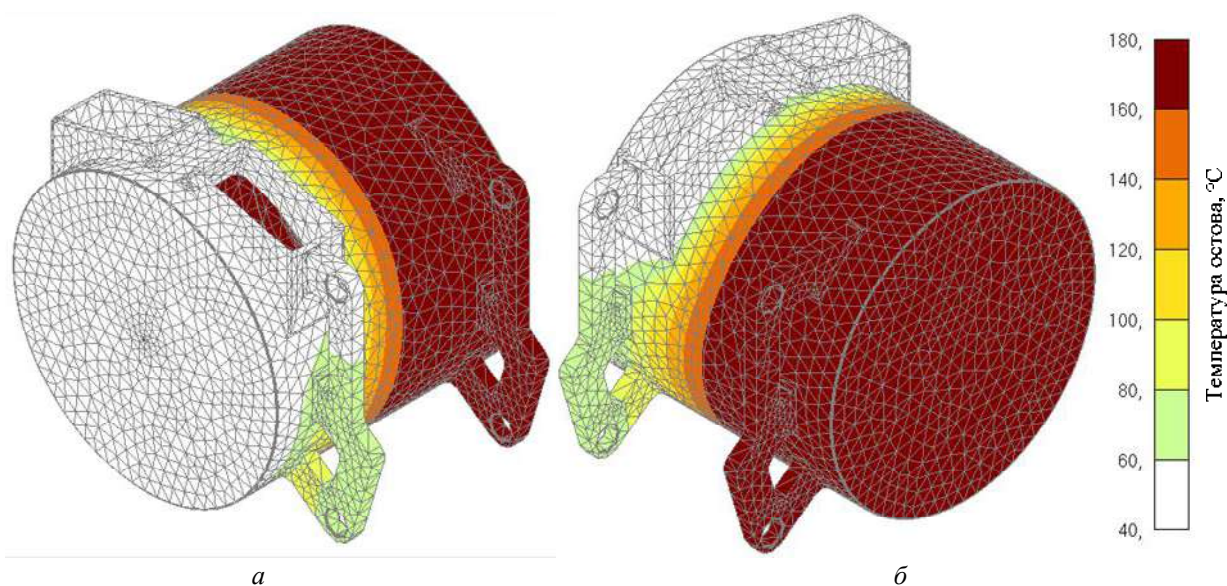


Рисунок 5 – Результаты теплового расчета остова тягового электродвигателя НБ-514

Для проведения прочностного расчета в качестве нагрузки были заданы результаты теплового расчета, полученные при нагреве остова. Анализируя полученные результаты прочностного расчета, представленные на рисунке 6, можно увидеть, что наиболее нагруженные участки модели соответствуют местам возникновения трещин в остовах тяговых двигателей при их эксплуатации (см. рисунок 1, а).

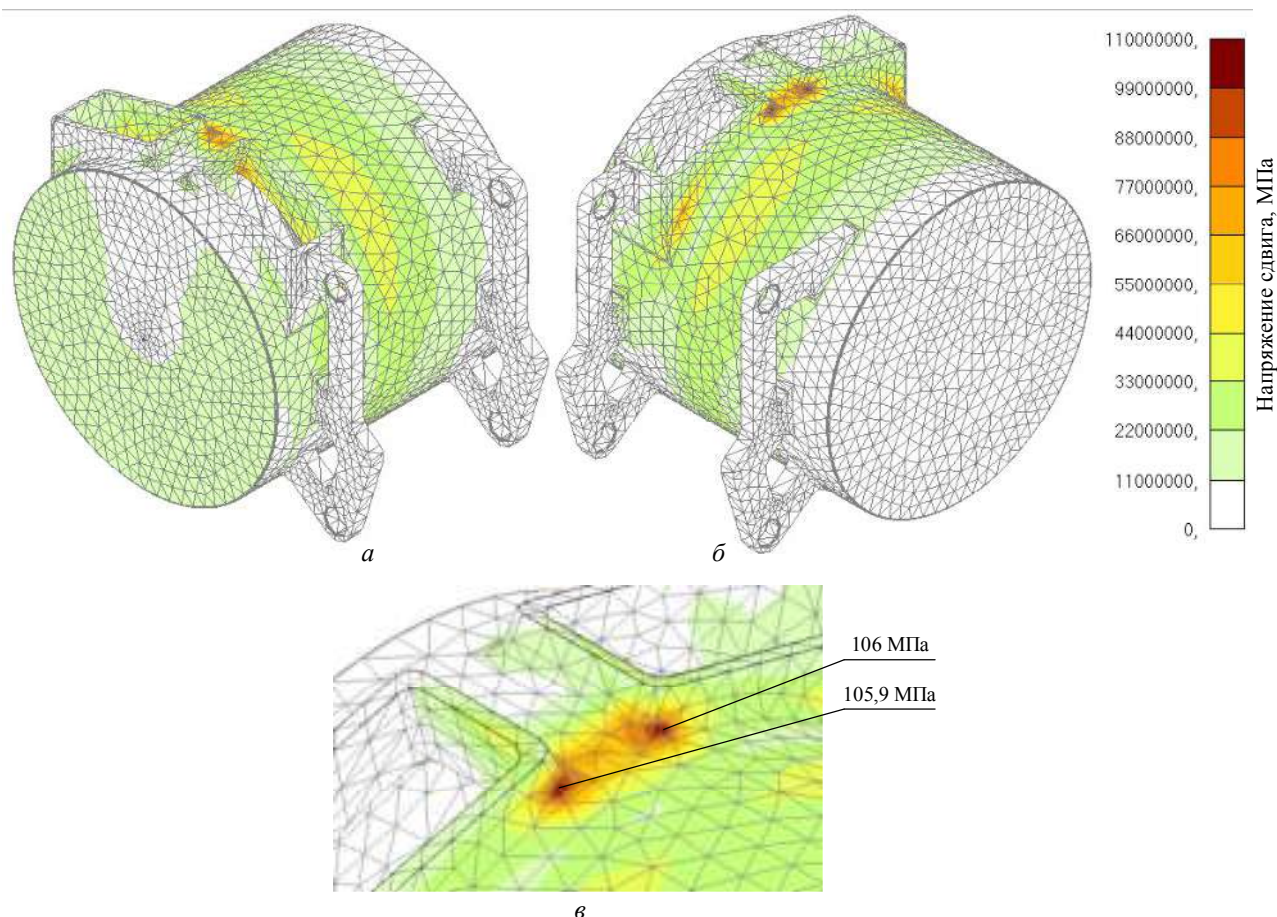


Рисунок 6 – Результаты прочностного расчета остова тягового электродвигателя НБ-514

Следовательно, одной из основных причин образования трещин в остовах тяговых электродвигателей являются циклически повторяющиеся температурные напряжения, возникающие, например, в часовом режиме электровоза тягового электродвигателя как в режиме тяги, так и в режиме рекуперативного торможения. Особое значение подобные напряжения имеют для электровозов, постоянно работающих на горно-перевальных участках, например, в качестве электровозов подталкивания.

Для уменьшения величины температурных напряжений авторами было предложено несколько вариантов изменения конструкции вентиляционных окон остова (рисунок 7). При этом площадь вентиляционных отверстий остается неизменной. Результаты прочностного расчета для каждого варианта остова тягового электродвигателя представлены на рисунках 8 – 10.

Из рисунков 8 – 10 видно, что изменение геометрии вентиляционных окон остова снижает величину максимальных напряжений в зоне окон на 30 %. При этом точки максимальных напряжений уходят с наружной поверхности остова вовнутрь.

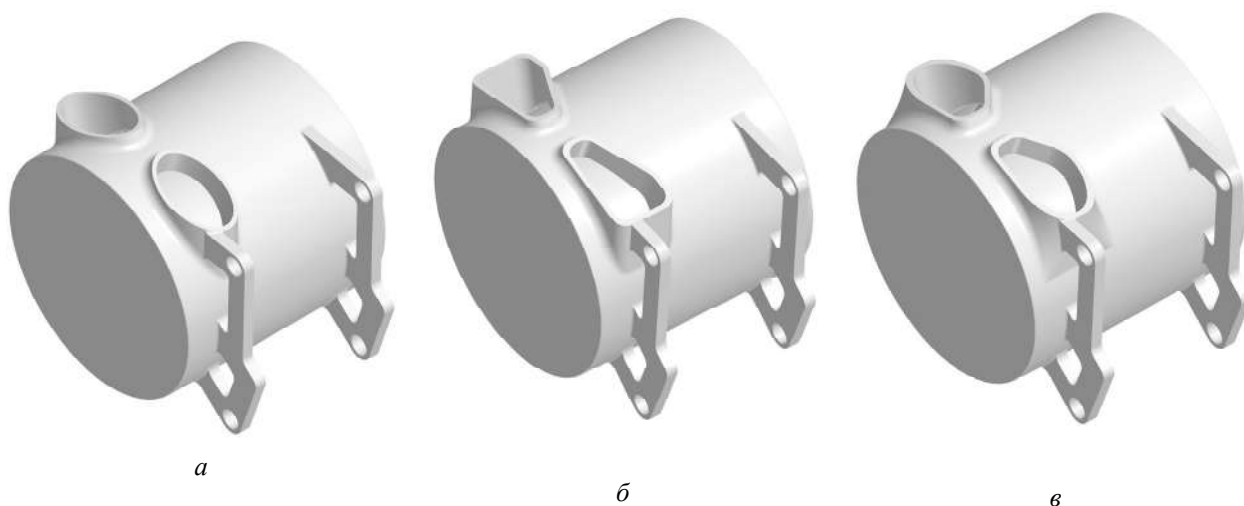


Рисунок 7 – Предлагаемые изменения в конструкции остова тягового электродвигателя НБ-514:
а – остов с овальными окнами; *б* – остов с окнами в виде усеченной трапеции;
в – остов с окнами комбинированного исполнения

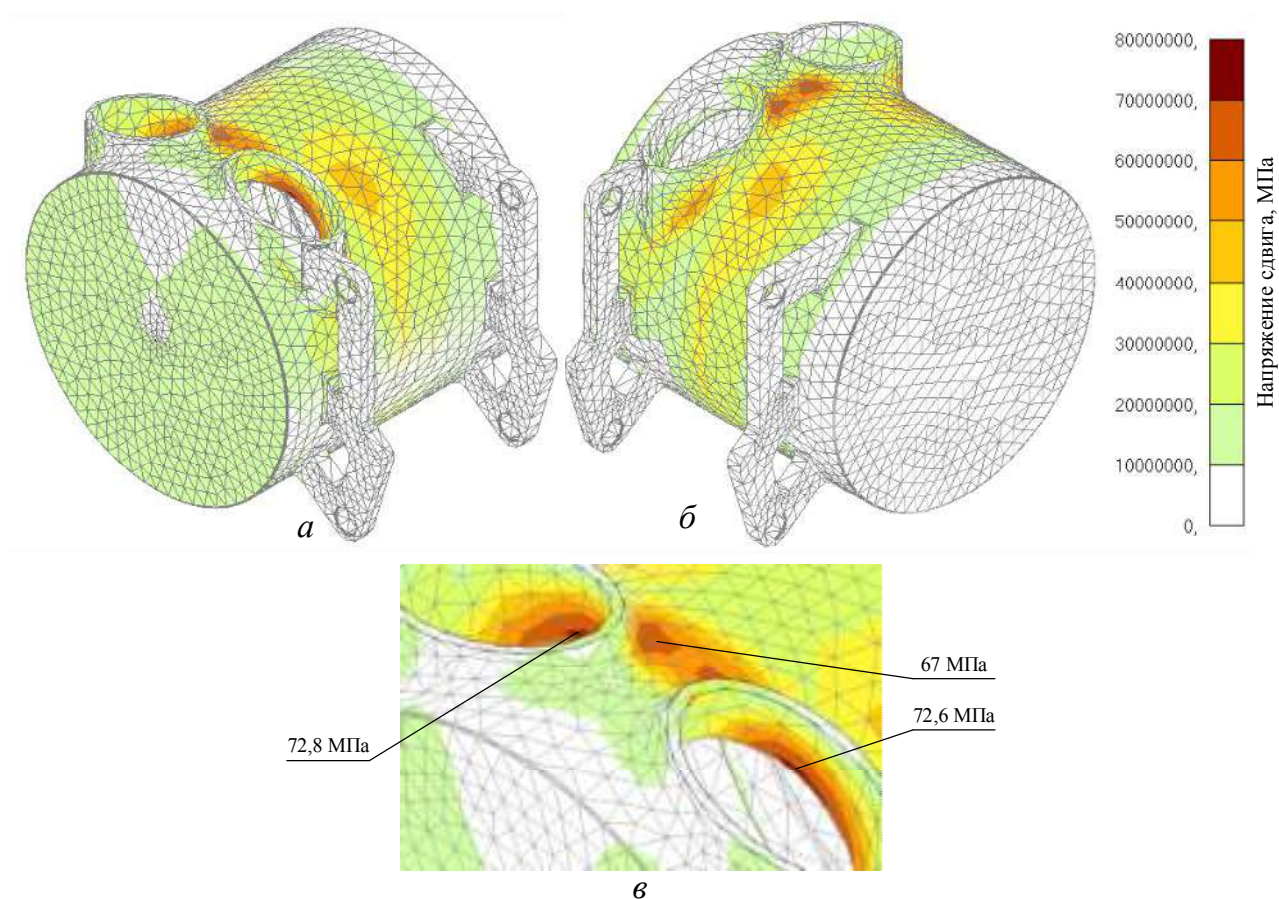


Рисунок 8 – Результаты прочностного расчета остова с овальными окнами

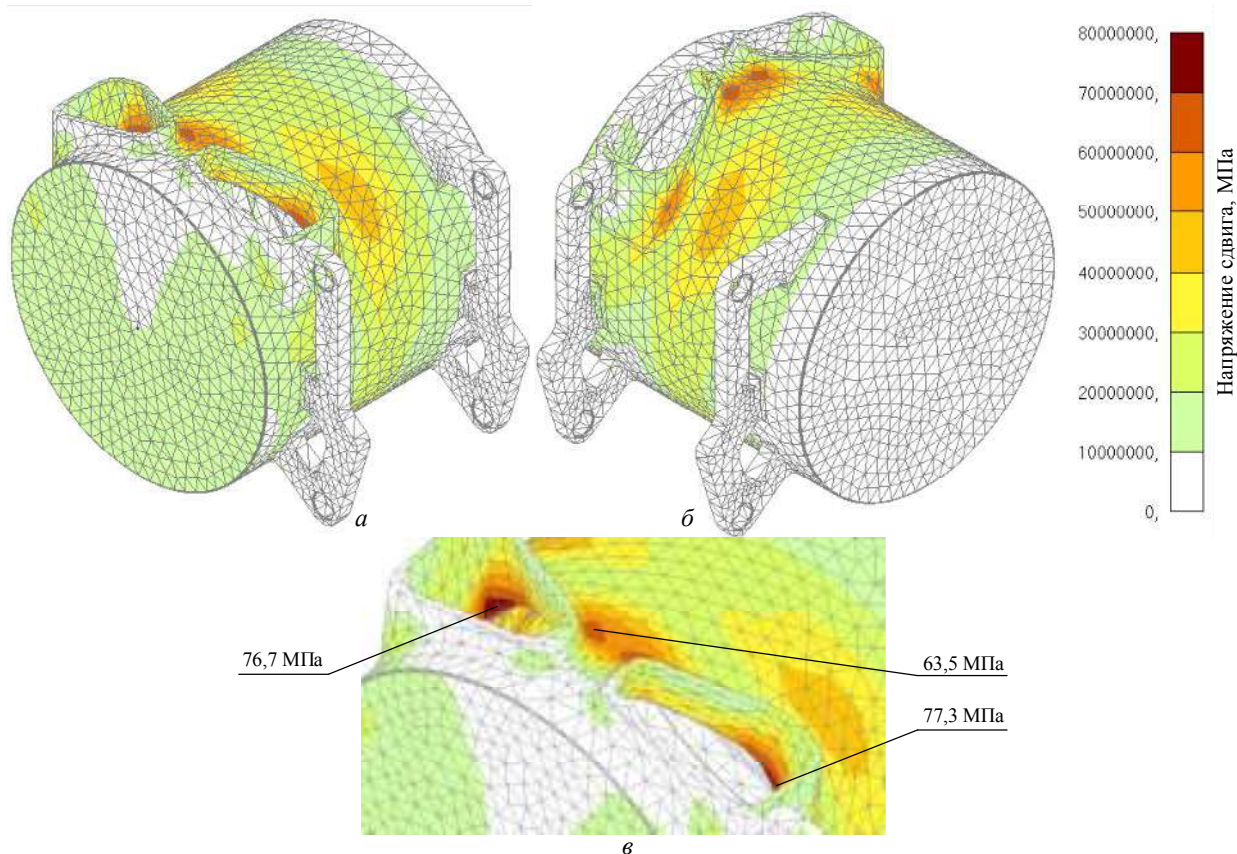


Рисунок 9 – Результаты прочностного расчета остова с окнами в виде усеченной трапеции

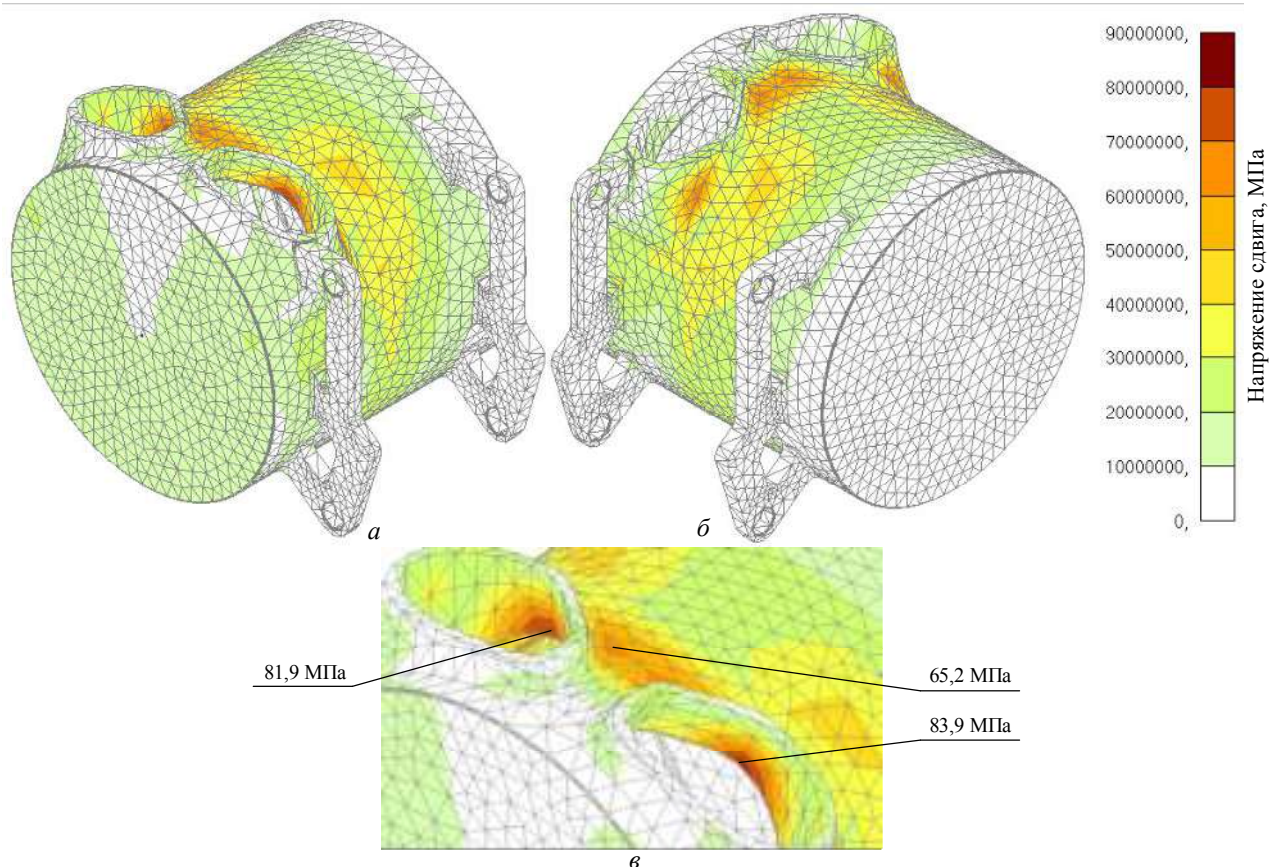


Рисунок 10 – Результаты прочностного расчета остова с окнами комбинированного исполнения

В данной статье были рассмотрены механические напряжения, возникающие при работе тягового электродвигателя НБ-514 и обусловленные его неравномерным нагревом в рабочем состоянии. Показано, что напряжения в остовах тягового электродвигателя электропоезда могут составлять до 100 МПа, а области их возникновения совпадают с областями часто наблюдаемых трещин в эксплуатации. Получено, что напряжения могут быть снижены со 106 МПа до 76 МПа путем изменения формы вентиляционных окон остова без дополнительного улучшения системы охлаждения.

В дальнейшем авторами статьи планируется продолжение работы с учетом внешних механических вибраций от пути и тяговой передачи, а также внутренних вибраций от переменной части магнитного поля электродвигателя; рассмотрение влияния данных факторов на малоцикловую и многоцикловую усталость остовов тяговых электродвигателей.

Список литературы

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга» // rzd-expo.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL : http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (дата обращения: 07.06.2021).
2. Щербатов, В. В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса / В. В. Щербатов, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 156–159.
3. Дворкин, П. В. Анализ теплового состояния тяговых электродвигателей по данным микропроцессорной системы управления тепловоза / П. В. Дворкин, Д. Н. Курилкин. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 401–409.
4. Матющенко, А. В. Анализ теплового состояния тягового вентильного двигателя с постоянными магнитами для шахтного электропоезда / А. В. Матющенко. – Текст : непосредственный // Электротехника и Электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 15–18.
5. Носков, В. И. Тепловая модель тягового двигателя тепловоза / В. И. Носков. – Текст : непосредственный // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 62 (968). – С. 142–147.
6. Минаев, Б. Н. Расчет температурного поля электромашины / Б. Н. Минаев, Н. А. Платов. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2009. – Т. 7. – № 1 (25). – С. 42–49.
7. Шрайбер, М. А. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя постоянного тока / М. А. Шрайбер. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2014. – № 4 (13). – С. 36–38.
8. Дурандин, М. Г. Расчет электрических полей в якорной изоляции тяговых электродвигателей локомотивов с учетом теплового фактора / М. Г. Дурандин, И. А. Кузьминых. – Текст : непосредственный // Вестник УрГУПС. – 2010. – № 4 (8). – С. 30–37.
9. Хомченко, Д. Н. Исследования влияния повышенной плотности тока в щетках на процесс нагрева тягового двигателя электропоезда / Д. Н. Хомченко, Г. В. Ковалев. – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2019. – № 1 (73). – С. 46–52.
10. Chin Y. K., Staton D. A. Transient thermal analysis using both lumped-circuit approach and finite element method of a permanent magnet traction motor // *IEEE Africon. 7th Africon Conference in Africa (IEEE Cat. No.04CH37590)*, Gaborone, 2004, vol. 2, pp. 1027 – 1035. DOI: 10.1109/africon.2004.1406847.
11. Nategh S., Zhan H., Wallmark O., Boglietti A., Nassen T., Bazant M. Transient Thermal Modeling and Analysis of Railway Traction Motors // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66, no. 1, pp. 79–89. DOI: 10.1109/TIE.2018.2821619.
12. Рычков, С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. – Москва : ДМК Пресс, 2013. – 784 с. – Текст : непосредственный.

13. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы : пер. с англ. – Москва : Мир, 1984. – 428 с. – Текст : непосредственный.
14. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – Москва : Мир, 1986. – 318 с. – Текст : непосредственный.
15. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К) : Руководство по эксплуатации. – Новочеркасск : Новочеркасский электровозостроительный завод, 2007. – Т. 1. – 635 с.; Т. 2. – 640 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Strategiya nauchno-tehnologicheskogo razvitiya holdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2025 goda. «Belaya kniga»* (The strategy of scientific and technological development of the holding «Russian Railways» for the period up to 2020 and to the perspective up to 2025. «White paper»), Available at: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (accessed 07 June 2021).
2. Shcherbatov V. V., Rapoport O. L., Tsukublin. A. B. Modeling the thermal state of a traction motor for resource prediction [Modelirovaniye teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya prognozirovaniya resursa]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 156–159.
3. Dvorkin P. V., Kurilkin D. N. The analysis of traction motor thermal condition according to the data of the microprocessor-based locomotive control system [Analiz teplovogo sostoyaniya tyagovykh elektrodvigatelyey po dannym mikroprotsessornoy sistemy upravleniya teplovoza]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 401 – 409, DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-401-409.
4. Matyushchenko A. V. Analysis of thermal state of traction brushless permanent magnet motor for mine electric locomotive [Analiz teplovogo sostoyaniya tyagovogo ventilnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami dlya shakhtnogo elektrovoza]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 6, pp. 15–18, DOI: 10.20998/2074-272X.2016.6.03.
5. Noskov V. I. Thermal model traction engine locomotive [Teplovaya model tyagovogo dvigatelya teplovoza]. *Vestnik NTU «KhPI» – Herald of the National Technical University «KhPI»*, 2012, no. 62 (968), pp. 142–147.
6. Minayev B. N., Platov. N. A. Calculation of Temperature Field of Electric Machine [Raschet temperaturnogo polya elektromashiny]. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, 2009, vol. 7, no. 1 (25), pp. 42–49.
7. Shrayber M. A. Modeling the thermal state of a DC traction motor [Modelirovaniye teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya postoyannogo toka]. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research results*, 2014, no. 4 (13), pp. 36–38.
8. Durandin M. G., Kuzminykh I. A. The calculation of electric field in anchor isolation of locomotives traction electric motors with the regard for thermal factor [Raschet elektricheskikh poley v yakornoy izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelyey lokomotivov s uchetom teplovogo faktora]. *Vestnik UrGUPSa – Herald of the Ural State University of Railway Transport*, 2010, no. 4 (8), pp. 30–37.
9. Khomchenko D. N., Kovalev G. V. Study of the effect of increased current density in the brushes on the heating process of the electric locomotive traction motor [Issledovaniya vliyaniya povyshennoy plotnosti toka v shchetkakh na protsess nagreva tyagovogo dvigatelya elektrovoza]. *Vestnik RGUPSa – Herald of Rostov State Transport University*, 2019, no. 1 (73), pp. 46–52.
10. Chin Y. K., Staton D. A. Transient thermal analysis using both lumped-circuit approach and finite element method of a permanent magnet traction motor // *IEEE Africon. 7th Africon Conference in Africa (IEEE Cat. No.04CH37590)*, Gaborone, 2004, vol. 2, pp. 1027–1035. DOI: 10.1109/africon.2004.1406847.
11. Nategh S., Zhan H., Wallmark O., Boglietti A., Nassen T., Bazant M. Transient Thermal Modeling and Analysis of Railway Traction Motors // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66, no. 1, pp. 79–89. DOI: 10.1109/TIE.2018.2821619.

12. Rychkov S. P. *Modelirovaniye konstruksiy v srede Femap with NX Nastran* (Structural Modeling in Femap with NX Nastran). Moscow: DMK Press Publ., 2013, 784 p.
13. Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy: per. s angl.* (Finite element method. Fundamentals: transl. from English). Moscow: Mir Publ., 1984, 428 p.
14. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnyye elementy i approksimatsiya: per. s angl.* (Finite elements and approximation: transl. from English). Moscow: Mir Publ., 1986, 318 p.
15. *Jelektrovoz magistral'nyj 2JeS5K (3JeS5K). Rukovodstvo po jekspluatacii* (Main-line electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operator's manual). Novocherkassk, 2007, vol. 1, 635 p.; vol. 2, 640 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Портной Александр Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Доктор физико-математических наук, доцент кафедры «Физика, механика и приборостроение».

Тел.: +7 (914) 903-64-19.

E-mail: portnoyalex@yandex.ru

Селедцов Константин Павлович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроподвижной состав».

Тел.: +7 (983) 409-43-93.

E-mail: kostyans7kss@gmail.com

Мельниченко Олег Валерьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав».

Тел.: +7 (3952) 63-83-99, доб. 0666.

E-mail: olegmelnval@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Портной, А. Ю. Математическое моделирование механических напряжений, возникающих при неравномерном нагреве остова тягового электродвигателя НБ-514 и совершенствование его конструкции / А. Ю. Портной, К. П. Селедцов, О. В. Мельниченко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 13 – 23.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Portnoy Aleksandr Yuryevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate professor of the department «Physics, Mechanics and Instrument Engineering».

Phone: +7 (914) 903-64-19.

E-mail: portnoyalex@yandex.ru

Seledtsov Konstantin Pavlovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

Postgraduate student of the department «Electric Rolling Stock».

Phone: +7 (983) 409-43-93.

E-mail: kostyans7kss@gmail.com

Melnichenko Oleg Valeryevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

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

Phone: +7 (3952) 63-83-99, ext. 0666.

E-mail: olegmelnval@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Portnoy A. Y., Seledtsov K. P., Melnichenko O. V. Mathematical simulation of mechanical stresses arising at uneven heating of the traction electric motor NB-514 and improvement of its design. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 2 (46), pp. 13 – 23 (In Russian).

С. М. Овчаренко, В. А. Минаков

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

ПРЕДПОСЫЛКИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИКИ НОРМИРОВАНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА НА МАНЕВРОВОЕ И ХОЗЯЙСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. Мероприятия по нормированию расхода дизельного топлива на работу маневровых локомотивов являются неотъемлемой частью эффективности использования тягового подвижного состава. Ввиду наличия проблем при формировании нормы расхода топлива, таких как показатели работы маневрового тепловоза, загрузки и технического состояния дизель-генераторной установки (ДГУ), условий эксплуатации локомотивов, требуется совершенствование существующей методики определения нормы расхода топлива. В статье представлены результаты исследований режимов работы маневровых тепловозов, приведены параметры разброса значений времени работы ДГУ в режиме нагрузки для маневровых тепловозов серий ТЭМ2 и ТЭМ18ДМ. Предложена математическая модель, основанная на базисах моделей машинного обучения, учитывающая степень загрузки ДГУ и технико-экономические характеристики серии тепловоза. Задачей предложенной модели является определение расхода топлива локомотивом итерационным методом расчета, где входными параметрами модели служат показатели работы локомотива. Установлено, что методика формирования нормы расхода топлива на выполнение маневровых работ должна учитывать степень загрузки дизель-генераторной установки и технико-экономические характеристики серии тепловоза. По результатам реализации предложенной модели по установлению удельных норм расхода топлива для исследуемых локомотивов по итогам их эксплуатации получены усредненные показатели удельного расхода топлива локомотивами по позициям контроллера машиниста. Предложенная методика позволяет учесть фактическую степень загрузки ДГУ и установить корректную норму расхода топлива за определенный период работы локомотива, что представляет практическую значимость работы. Представленные результаты исследования являются началом работы по разработке интеллектуальной системы по нормированию расхода дизельного топлива на работу маневровых локомотивов.

Ключевые слова: удельный расход топлива, локомотив, нормирование топлива, дизель-генераторная установка, машинное обучение.

Sergey M. Ovcharenko, Vitalii A. Minakov

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

PREREQUISITES FOR IMPROVING THE METHODOLOGY FOR RATIONING FUEL CONSUMPTION FOR MANEUVERING AND ECONOMIC TRAFFIC USING MACHINE LEARNING MODELS

Abstract. Measures to normalize the consumption of diesel fuel for the operation of shunting locomotives are an integral part of the efficiency of the use of traction rolling stock. Due to the presence of problems in the formation of the fuel consumption rate, such as the performance of the shunting locomotive, the loading and technical condition of the diesel generator set, the operating conditions of locomotives, it is necessary to improve the existing fuel consumption rate determining methodology. The article presents the results of studies of the operating modes of shunting locomotives, the parameters of the spread of the values of the operating time of the diesel generator set in the load mode for shunting locomotives of the TEM2 and TEM18DM series are given. A mathematical model based on the bases of machine learning models is proposed, taking into account the degree of loading of the diesel generator set and the technical and economic characteristics of the locomotive series. The task of the proposed model is to determine the fuel consumption of a locomotive by an iterative calculation method, where the input parameters of the model are the performance indicators of the locomotive. It is established that the method of forming the fuel consumption rate for performing shunting operations should take into account the degree of loading of the diesel generator set and the technical and economic characteristics of the locomotive series. According to the results of the implementation of the proposed model for establishing specific fuel consumption rates for the studied locomotives based on the results of their operation, the average indicators of specific fuel consumption by locomotives by the positions of the driver's controller are obtained. The proposed method allows us to take into account the actual degree of loading of the diesel generator set and establish the correct fuel consumption rate for a certain period of operation of the locomotive, which represents the practical significance of the work. The presented research results are the beginning of work on the development of an intelligent system for diesel fuel rate rationing for the operation of shunting locomotives.

Keywords: specific fuel consumption, locomotive, fuel rationing, diesel-generator, machine learning.

Задача повышения эффективности использования тягового подвижного состава не теряет своей актуальности практически с момента начала его эксплуатации. Компания ОАО «РЖД», предприятия промышленного железнодорожного транспорта заинтересованы в снижении расхода дизельного топлива, в том числе и на маневровое и хозяйственное движение. Решение задачи может быть достигнуто как за счет внедрения энергоэффективных технологий, позволяющих повысить топливную экономичность дизеля (внедрение систем прогрева, ЭСУФТ и т. д.), совершенствования организации движения маневровых тепловозов (уменьшения простоев в ожидании работы), использования в качестве топлива газа, так и за счет совершенствования системы нормирования расхода топлива [1, 2].

Основной проблемой при формировании нормы расхода топлива является индивидуальность каждой поездки маневрового тепловоза с точки зрения реализованной загрузки. В настоящее время большая часть тепловозов оборудована бортовыми системами контроля параметров работы. Эта информация должна быть использована для формирования обоснованной нормы расхода топлива. В большинстве локомотивных депо применяется методика, основанная на установлении часового расхода топлива для каждой станции и серии тепловоза (килограмм в час). Этот показатель рассчитывается как среднее значение за установленный период, например за 10 дней. Усреднение приводит к значительным отклонениям между расчетной нормой и фактическим расходом топлива как в сторону превышения, так и в сторону уменьшения [3, 4]. Исследования, проведенные в ряде локомотивных депо ОАО «РЖД» и предприятий промышленного железнодорожного транспорта, позволили установить значительный разброс реализованных параметров работы тепловозов за поездку. В качестве примера на рисунках 1 и 2 приведены результаты распределения времени работы ДГУ тепловозов серии ТЭМ2 по позициям контроллера машиниста на одной станции.

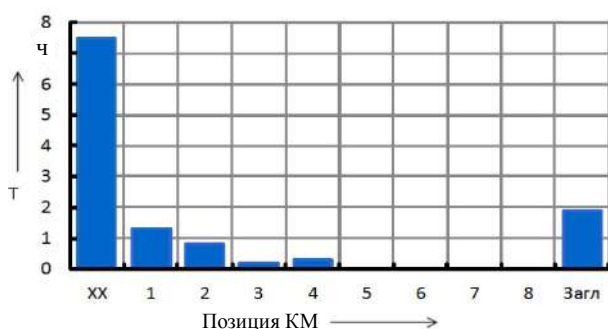


Рисунок 1 – Распределение времени работы по позициям КМ локомотива ТЭМ2

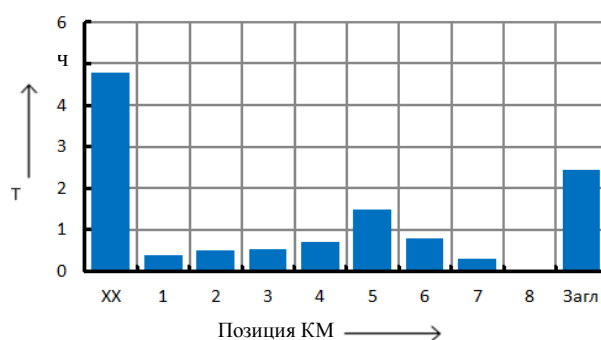


Рисунок 2 – Распределение времени работы по позициям КМ локомотива ТЭМ2

Случайный характер реализации времени работы локомотива по позициям контроллера машиниста (КМ), а следовательно, и реализации мощности приводит к значительному разбросу израсходованного топлива за поездку. Это должно быть учтено в методике расчета нормы расхода топлива на маневровые работы.

В результате математического анализа исследований режимов работы тепловозов [5] получены параметры разброса значений времени работы ДГУ в режиме нагрузки для тепловозов серий ТЭМ2 и ТЭМ18ДМ (рисунки 3, 4). Даже предварительный анализ полученной информации позволяет сделать вывод о том, что время работы тепловоза под нагрузкой в зависимости от качества организации движения может различаться в несколько раз.

Такой разброс времени работы под нагрузкой с учетом вариаций реализации режимов работы ДГУ тепловоза приводит к значительным разбросам выработанной энергии, параметру, который и определяет необходимые затраты топлива. Так, на рисунках 5 и 6 приведены результаты исследования разброса количества выработанной энергии ДГУ тепловозов серий ТЭМ2 и ТЭМ18ДМ за поездку.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Множество случайных факторов, определяющих в конечном итоге загрузку тепловоза, не позволяют предварительно установить норму расхода топлива. Эта задача должна решаться только после окончания поездки и обработки результатов контроля параметров работы тепловоза.

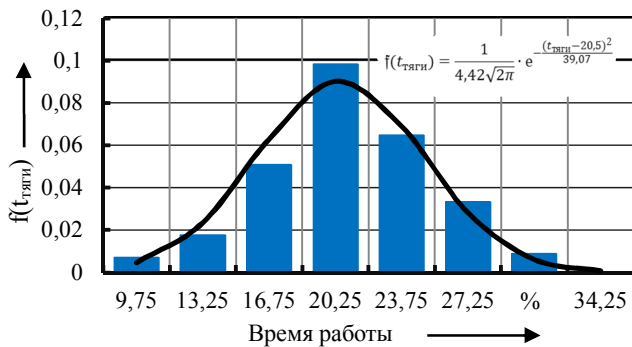


Рисунок 3 – Распределение доли времени работы ДГУ ТЭМ18ДМ в режиме нагрузки

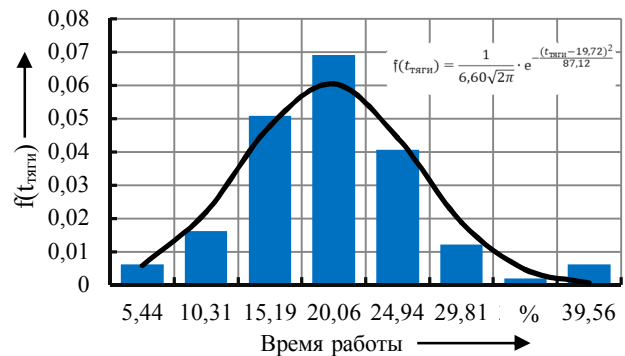


Рисунок 4 – Распределение доли времени работы ДГУ ТЭМ2 в режиме нагрузки

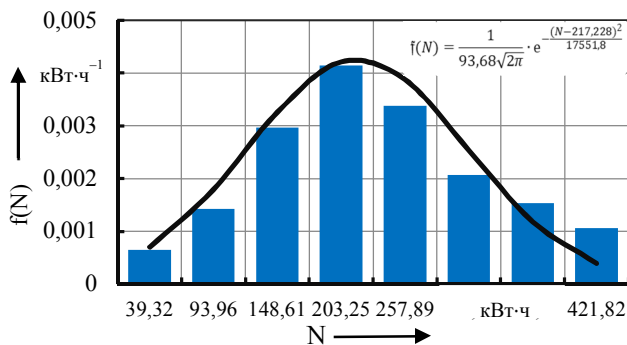


Рисунок 5 – Распределение выработанной энергии тепловозом ТЭМ18ДМ

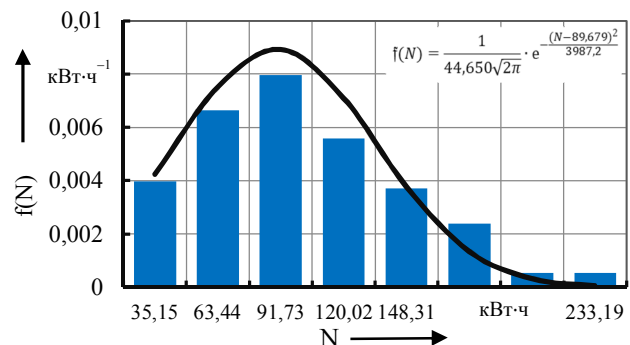


Рисунок 6 – Распределение выработанной энергии тепловозом ТЭМ2

Норма (или право) расхода топлива за поездку для маневровой работы зависит от нескольких основных факторов:

$$B_{nor} = f(T_n, T_x, T_z, N, P), \quad (1)$$

где T_n – время работы в режиме нагрузки, ч;

T_x – время работы в режиме холостого хода, ч;

T_z – время простоя с заглушенным дизелем, ч;

N – выработанная энергия, кВт·ч;

P – параметр, характеризующий техническое состояние и оказывающий влияние на расходные характеристики ДГУ [2].

Следует заметить, что опыт машиниста несомненно влияет на эффективность использования тепловоза в плане оптимизации расхода топлива за поездку, но специфика маневровой работы, когда количество переключений позиций контроллера машиниста за 12 ч работы достигает 2500, этот фактор становится не значимым, т. е. его влияние не вызывает существенного изменения конечного результата расчета.

Важными факторами реализации любой методики нормирования расхода топлива являются автоматизация, невысокая трудоемкость и оперативность. Существующие технологии уже предполагают передачу контролируемых параметров работы тепловоза в онлайн-режиме. При совершенствовании методики нормирования расхода топлива необходимо учитывать основные факторы и формирование обоснованной нормы расхода топлива за поездку для маневрового или хозяйственного движения. На основании реализации функциональных зависимостей выполнено апробирование результатов исследований в локомотивных депо промышленного железнодорожного транспорта, в результате получена высокая эффективность методики расчета нормы расхода топлива за поездку для маневровой работы. Однако для реализации более точной методики расчета необходимо использование более высокого уровня математического аппарата.

Разработана методика формирования нормы расхода топлива на выполнение маневровых работ, учитывающая степень загрузки ДГУ и технико-экономические характеристики серии тепловоза, на реализации моделей машинного обучения.

Применение модели машинного обучения [6 – 8] для оценки параметров расхода топлива заключается в определении расхода топлива локомотивом итерационным методом. Процесс итерации – нахождение по приближенному значению величины последующих приближений, что является более точным. Этот процесс можно представить в виде граф-модели (рисунок 7).

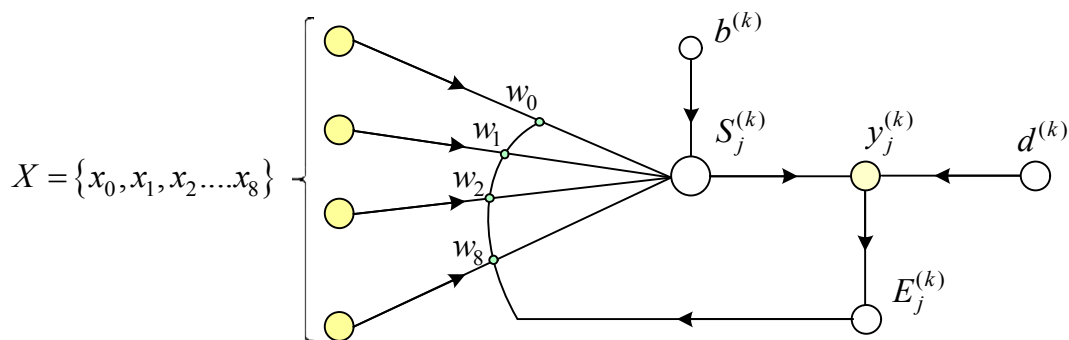


Рисунок 7 – Граф-модель настройки весов

Входными параметрами модели служат показатели работы локомотива: вырабатываемая энергия ДГУ N_i , время работы локомотива в режиме нагрузки T_i и время работы локомотива в режиме холостого хода на соответствующей позиции контроллера машиниста, норма расхода топлива локомотивом n_i на i -й позиции контроллера машиниста. Принято $X = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_8\}$, где $x_i = n_i N_i T_i$ на каждой i -й позиции КМ в процессе эксплуатации локомотива.

Процесс итерации применяется для настройки удельного расхода топлива локомотивом на каждой позиции контроллера машиниста к общему расходу топлива локомотивом за смену. Удельный расход топлива локомотивом $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_8\}$ устанавливается на каждой j -й итерации $w_j = w_j + (y x_j) \eta$, где η – шаг настройки. Количество потребляемого топлива за

смену рассчитывается так: $y = \sum_{i=1}^n (S_i) + b$, где $S_i = x_i w_i$, b – смещение показателя. Фактическое

количество потребленного топлива $B^{(k)}$ принимается по результатам опытной поездки локомотива. Величина ошибки устанавливается по разнице расчетного и опытного показателей: $E_j^{(k)} = (B^{(k)} - y^{(k)})/2$, где k – итерация процесса. Обучение выполняется по достижении требуемой ошибки [8 – 10].

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Выполнены предварительные расчеты описанной методики нормирования расхода топлива на маневровое и хозяйственное движение по результатам исследований, приведенным на рисунках 8 и 9.

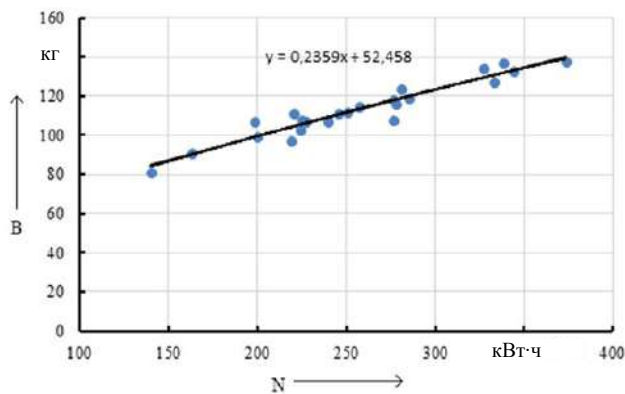


Рисунок 8 – Зависимость расхода топлива от выработанной энергии тепловозом ТЭМ18ДМ

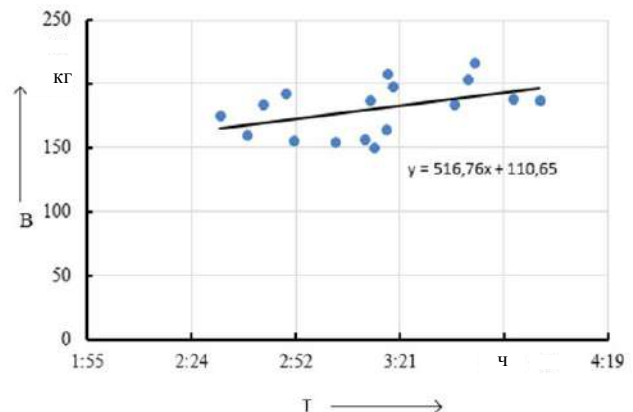


Рисунок 9 – Зависимость расхода топлива от времени работы под нагрузкой тепловоза ТЭМ18ДМ

По результатам обучения по установлению удельных норм расхода топлива для локомотива ТЭМ18ДМ по итогам его эксплуатации получены усредненные показатели. При анализе расчетных данных установлено, что в среднем удельный расход топлива локомотивом по позициям КМ составляет +9,1 % к табличным показателям (таблица).

Результаты расчета удельного расхода топлива локомотивом ТЭМ18ДМ по позициям КМ

Позиция КМ	Табличные показатели, г/кВт·ч	Расчетные показатели, г/кВт·ч	Разница показателей, г/кВт·ч	Изменение показателей, %
0	405	459,33	+ 54,33	13,41
1	262	269,8	+ 7,8	2,98
2	222	230,54	+ 8,54	3,85
3	211	217,64	+ 6,64	3,15
4	207	208,19	+ 1,19	0,57
5	204	204,25	+ 0,25	0,12
6	200	200,95	+ 0,95	0,47
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0

Для обоснования адекватности предложенной модели выполнен расчет расхода топлива локомотивами серии ТЭМ18ДМ по данным времени их работы t и установленным нормам удельного расхода топлива локомотивом W по i позициям КМ: $B_{пз} = \sum_{i=1}^8 (N_i w_i t_i)$. Результаты

расчета удельного расхода топлива локомотивом ТЭМ18ДМ показали хорошую сходимость с фактическим расходом топлива. Следует отметить, что при реализации модели принято допущение о том, что затрачиваемая на работу вспомогательного оборудования мощность составляет 10 % от всей выработанной энергии ДГУ локомотива.

Предложенная методика позволяет учесть фактическую степень загрузки локомотива и установить корректную норму расхода топлива за поездку.

Для достижения более качественных показателей возможно использование искусственной нейронной сети, при этом важно иметь достаточный объем данных для ее обучения. Обучающая выборка должна быть сформирована по результатам поездок локомотива серии ТЭМ18ДМ на различных полигонах эксплуатации с разной степенью загрузки и при разных температурных условиях. Представленные результаты исследования являются началом работы по разработке интеллектуальной системы по нормированию дизельного топлива на маневровую работу локомотивов.

Список литературы

1. О внесении изменений в Методику планирования и нормирования расхода дизельного топлива на техническое обслуживание и ремонт тягового подвижного состава : Распоряжение ОАО «РЖД» № 639р от 02.04.2012 // base.garant.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://base.garant.ru/70510360/> (дата обращения: 25.06.2021).
2. Методика нормирования, планирования и анализа использования дизельного топлива (электроэнергии) в хозяйственном виде движения для локомотивов по данным бортовых приборов учета или скоростемерных лент : Распоряжение ОАО «РЖД» № 3075р от 25.12.2015. – Москва : ОАО «РЖД», 2015. – Текст : непосредственный.
3. Овчаренко, С. М. Исследование параметров эксплуатации маневровых тепловозов / С. М. Овчаренко, П. С. Корнеев. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2010. – № 4. – С. 48–51.
4. Овчаренко, С. М. Моделирование расходных характеристик с учетом технического состояния дизель-генераторной установки тепловоза / С. М. Овчаренко, П. С. Корнеев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2011. – № 4 (8). – С. 26–30.
5. Фадеева, Л. Н. Теория вероятностей и математическая статистика / Л. Н. Фадеева. – Москва : Эксмо, 2010. – 469 с. – Текст : непосредственный.
6. Diene O., Bhaya A. Conjugate gradient and steepest descent constant modulus algorithms applied to a blind adaptive array, *Signal Processing*, Elsevier BV, Amsterdam, 2010, no. 90, pp. 2835 – 2841.
7. Шарден, Б. Крупномасштабное машинное обучение вместе с Python / Б. Шарден, Л. Массарон, А. Боскети. – Москва : ДМК Пресс, 2018. – 358 с. – Текст : непосредственный.
8. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – Москва : Финансы и статистика, 2004. – 344 с. – Текст : непосредственный.
9. Haykin, S. Neural networks, a comprehensive foundations, *N. Y. Macmillan College Publishing Company*, 1994, 823 p.
10. Нишант, Ш. Машинное обучение и TensorFlow / Ш. Нишант. – Санкт-Петербург : Питер, 2019. – 336 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *O vnesenii izmenenii v Metodiku planirovaniia i normirovaniia raskhoda dizel'nogo topliva na tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont tiagovogo podvizhnogo sostava: Rasporiazhenie ОАО «RZhD» № 639r ot 02.04.2012* (Order of JSC «Russian Railways» on amendments to the Methodology for planning and rationing diesel fuel consumption for maintenance and repair of traction rolling stock No. 639r dated 02.04.2012), Available at: <https://base.garant.ru/70510360/> (accessed 25 June 2021).
2. *Metodika normirovaniia, planirovaniia i analiza ispol'zovaniia dizel'nogo topliva (elektroenergii) v khoziaistvennom vide dvizheniia dlia lokomotivov po dannym bortovykh priborov ucheta ili skorostemernykh lent: Rasporiazhenie ОАО «RZhD» № 3075r ot 25.12.2015* (Methodology for rationing, planning and analyzing the use of diesel fuel (electricity) in the economic form of traffic for locomotives according to on-Board metering devices or speed measuring tapes, ОАО «RZhD» decree No. 3075r dated 25.12.2015), Moscow, ОАО «RZhD», 2015.

3. Ovcharenko S. M., Korneev P. S. Research of operation parameters of shunting locomotives [Issledovanie parametrov ekspluatsatsii manevrovyyh teplovozov]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2010, no. 4, pp. 48–51.

4. Ovcharenko S. M., Korneev P. S. Modeling of consumption characteristics taking into account the technical condition of a diesel generator set of a locomotive [Modelirovanie raskhodnyh harakteristik s uchetom tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-generatornoj ustanovki teplovoza]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 4 (8), pp. 26–30.

5. Fadeeva L. N. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* (Probability theory and mathematical statistics). Moscow: Eksmo Publ., 2010, 469 p.

6. Diene O., Bhaya A. Conjugate gradient and steepest descent constant modulus algorithms applied to a blind adaptive array, *Signal Processing*, Elsevier BV, Amsterdam, 2010, no. 90, pp. 2835–2841.

7. Sharden B. *Krupnomasshtabnoe mashinnoe obuchenie vmeste s Python* (Large-scale machine learning with Python). Moscow: DMC Press Publ., 2018, 358 p.

8. Osovskiy S. *Nejronnye seti dlya obrabotki informatsii* (Neural networks for information processing). Moscow: Finansy i statistika Publ., 2004, 344 p.

9. Haykin, S. Neural networks, a comprehensive foundations, N. Y. Macmillan College Publishing Company, 1994, 823 p.

10. Nishant Sh. *Mashinnoe obuchenie i TensorFlow* (Machine learning and TensorFlow). Saint-Petersburg: Piter Publ., 2019, 336 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Овчаренко Сергей Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, ректор, заведующий кафедрой «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (9609) 83-75-89.

E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

Минаков Виталий Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: vitalya_13@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Овчаренко, С. М. Предпосылки совершенствования методики нормирования расхода топлива на маневровое и хозяйственное движение с использованием моделей машинного обучения / С. М. Овчаренко, В. А. Минаков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 24 – 30.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ovcharenko Sergey Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation. Postgraduate student at the department «Locomotives» OSTU.

Doctor of Sciences in Engineering, docent, rector, head of the department of «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (9609) 83-75-89.

E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

Minakov Vitaliy Anatolevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: vitalya_13@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ovcharenko S. M., Minakov V. A. Prerequisites for improving the methodology for rationing fuel consumption for maneuvering and economic traffic using machine learning models. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 24 – 30 (In Russian).

Т. А. Несенюк, В. Н. Соколов

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург,
Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ШТЫРЕВЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ С RFID-ИНДИКАТОРАМИ

Аннотация. Работа относится к применению нового метода бесконтактного RFID-контроля состояния изоляторов для воздушных линий электропередач, включая линии устройства сигнализации, централизации, блокировки и продольного электроснабжения. Значительное количество аварийных ситуаций происходит из-за пробоя изоляторов и несовершенства методов контроля. Предлагается применить бесконтактную систему RFID-контроля изоляторов воздушной линии электропередачи, которая состоит из считывателя с приемопередающим устройством и антенной, стандартных изоляторов с RFID-индикаторами и специального программного обеспечения. В данной статье описаны исследования штыревых изоляторов с закрепленными RFID-индикаторами. Целью исследований являлось влияние климатических факторов на компоненты и сборочные конструкции штыревых изоляторов с RFID-индикаторами и работа системы RFID-контроля в целом. В качестве образцов исследования были выбраны радиочастотная метка, полиэтиленовый колпачок с алюминиевым покрытием с встроенной меткой, штыревой фарфоровый изолятор с RFID-индикатором в сборке. Климатические испытания проводились в испытательном центре технических средств железнодорожного транспорта Уральского государственного университета путей сообщения (ИЦ ТСЖТ УрГУПС). Имитировались температурные изменения от -60 до $+50$ °C при влажности воздуха до 93 %. Представлены и проанализированы результаты по адгезионным свойствам и электропроводности токопроводящего покрытия на полиэтиленовой поверхности и устойчивости функционирования RFID-меток. Даны предложения по совершенствованию компонентов и сборочной конструкции. Во-первых, применить на верхушке штыря винтовую резьбу вместо специальной накатки, что снизит механические нагрузки при монтаже конструкции отдельных компонентов и позволит снизить погрешность установочных размеров для улучшения приема-передачи сигналов между считывателем и меткой. Во-вторых, путем пескоструйной обработки поверхности полиэтиленового колпачка можно улучшить адгезию поверхности с токопроводящим покрытием, что увеличит электропроводность конструкции. В итоге проведенной работы доказано, что разработанная система RFID-контроля изоляторов функционирует в заданных ГОСТом климатических условиях, что позволяет рекомендовать ее применение в линиях устройств с напряжением 6 – 10 и 35 кВ.

Ключевые слова: штыревой изолятор с RFID-индикатором, климатические испытания, RFID-метка, токопроводящее покрытие, контроль, RFID-система, штыревой изолятор, пробой изоляторов, линии СЦБ и ПЭ, сети с изолированной нейтралью.

Tatiana A. Nesenjuk, Viktor N. Sokolov

Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, the Russian Federation

STUDY OF THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS FOR PIN INSULATORS WITH RFID INDICATORS

Abstract. The work relates to the application of a new method of noncontact RFID monitoring of the condition of insulators for overhead power lines, including signaling, centralizing, blocking, and longitudinal power supply lines. A significant number of accidents occur due to the breakdown of insulators and imperfection of control methods. It is proposed to use a non-contact RFID control system for overhead power line insulators, which consists of a reader with a transceiver and an antenna, standard insulators with RFID indicators and special software. The aim of the research is the influence of climatic factors on the components and assembly structures of pin insulators with RFID indicators and the operation of the RFID control system in general. The selected study samples are a radio frequency tag, an aluminum-coated plastic cap with an integrated tag, and a pin-shaped porcelain insulator with an RFID indicator in the assembly. The climatic tests were carried out in the testing center of technical means of railway transport of the Ural State University of Railway Transport (IC TSZHT USUPS). Temperature changes were simulated from -60 to $+50$ °C with air humidity up to 93%. The results on the adhesive properties and electrical conductivity of a conductive coating on a polyethylene surface and the stability of the functioning of RFID tags are presented and analyzed. Suggestions for improving the components and assembly design are given. Firstly, to use a screw thread on the top of the pin instead of a special

knurling, which will reduce mechanical stress during installation of the structure of individual components and will reduce the error in the installation dimensions to improve the reception and transmission of signals between the reader and the tag. Secondly, sandblasting of the surface of the polyethylene cap can improve the adhesion of the surface to the conductive coating, which will increase the electrical conductivity of the structure. The result of this work proves that the developed RFID control system of insulators functions in the climatic conditions specified by GOST, which allows to recommend its implementation in the lines to use in lines of devices with a voltage of 6-10 and 35 kV.

Keywords: *pin insulator with RFID indicator, climate tests, RFID tag, conductive coating, control, RFID system, pin insulator, insulator breakdown, SCB and PE lines, networks with isolated neutral.*

Данные исследования относятся к применению нового метода RFID-контроля изоляторов воздушных линий электропередач (ВЛ), включая линии устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), а также продольного электроснабжения (ПЭ). Значительное количество всех аварийных ситуаций происходит из-за пробоя изоляторов и несовершенства применяемых методов контроля [1 – 7]. Под воздействием внешних факторов происходит снижение диэлектрических свойств изоляторов, увеличение тока утечки, включающего поверхностный ток и сквозной ток проводимости, что со временем приводит к пробоям или перекрытию изоляторов, вызывающих аномальные и аварийные режимы работы в системе электроснабжения. Скрытость дефектов, которые нельзя обнаружить ни визуально, ни электрическими испытаниями, наиболее опасна в эксплуатации [2, 4, 7]. Особенно сложно выявить пробой изолятора в линиях с изолированной или компенсированной нейтралью, где ток однофазного замыкания на землю не превышает 5 А [1 – 2].

Несенюк Т. А. предложен и опробован RFID-контроль диэлектрического состояния фарфоровых штыревых изоляторов [5 – 9]. Суть метода состоит в индивидуальной маркировке и контроле каждого изолятора с применением RFID-системы. На изолятор крепится RFID-индикатор с меткой-наклейкой, имеющий индивидуальный код. RFID-индикатор указывает на нормальное или дефектное состояние изолятора, которое определяется прохождением через изолятор тока. Если ток не превышает допустимых значений уставки, то RFID-индикатор откликается на зондирующие сигналы считывателя, если же через изолятор прошел ток, превышающий ток уставки, RFID-индикатор перегорает и не отвечает на сигналы считывателя. Наличие или отсутствие ответных сигналов RFID-индикаторов фиксируется на экране считывателя. Так, например, отсутствие сигнала от RFID-индикатора может служить основанием для принятия решения по очистке загрязненного дефектного изолятора или по его замене.

Основными требованиями применения RFID-системы являются ее надежная работа в заданных климатических и эксплуатационных условиях, передача информации о состоянии изоляторов с RFID-индикатором при движении на транспортном средстве, например, вагон-лаборатории контактной сети, и обходе воздушной линии (ВЛ) оперативной бригадой. При разработке RFID-системы особое внимание уделялось электропроводности токопроводящего покрытия, ее совместимости с алюминиевой антенной RFID-метки и адгезии поверхностей модернизированного колпачка.

Данные требования предусматривали решение ряда научно-технических задач. Во-первых, решались вопросы выбора токопроводящего покрытия для полиэтиленового колпачка штыревого изолятора и нахождения способа его нанесения на поверхность полиэтилена. Данные изыскания описаны в статье [8]. Известно, что полиэтилен обладает очень низкой адгезией, что затрудняет нанесение покрытий. В результате нами предложено использование алюминиевого покрытия колпачка, наносимого способом вакуумной металлизации на полиэтиленовую поверхность [10]. Алюминий в целом отвечает основным поставленным требованиям по коррозионно-контактной совместимости с материалом метки (алюминий), но потребовались дополнительные исследования по механической стойкости покрытия и климатическим испытаниям.

Вторая задача – исследование образцов меток, применяемых в качестве индикатора, с учетом скорости приема и передачи сигнала и диаграмм направленности меток и разработки считывающего устройства с усиливающей антенной. В настоящее время ведутся исследования

совместно с дорожной электротехнической лабораторией Трансэнерго Свердловской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

В данной статье описывается третья задача – определение влияния климатических факторов на компоненты штыревого изолятора и сборную конструкцию штыревого изолятора с RFID-индикатором. Исследование проводилось для оценки функционирования образцов при воздействии повышенных и пониженных температур, влажности воздуха. Климатические испытания проводились в испытательном центре технических средств железнодорожного транспорта Уральского государственного университета путей сообщения в соответствии с ГОСТ 28224–89 [11]. Образцами испытаний были компоненты конструкции, в которую входили радиочастотная метка-наклейка, полиэтиленовый колпачок с алюминиевым покрытием с встроенной меткой и без нее, а также штыревой фарфоровый изолятор с RFID-индикатором. Схема устройства штыревого изолятора показана на рисунке 1, а его общий вид – на рисунке 2.

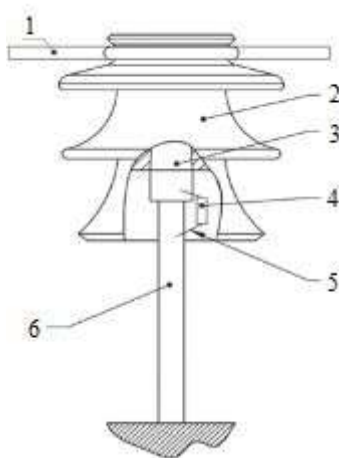


Рисунок 1 – Схема устройства штыревого изолятора с RFID-меткой: 1 – провод ВЛ; 2 – штыревой изолятор; 3 – полиэтиленовый колпачок с токопроводящим покрытием; 4 – чип, 5 – метка-наклейка; 6 – стальной штырь



Рисунок 2 – Сборная конструкция штыревого изолятора с колпачком и RFID-меткой

Определение характеристик и параметров при изменении климатических условий проводилось в камере искусственного климата THV710. Исходные характеристики образцов фиксировались после предварительной сушки при температуре 55 °С и влажности не более 20 % в течение 24 ч и выдержки при нормальных атмосферных условиях в течение 6 ч. Далее имитировались температурные изменения от –60 до +50 °С при влажности воздуха до 93 %. Продолжительность и цикличность испытаний представлена графиками на рисунке 3.

Продолжительность одного цикла испытаний составляет 24 ч. Всего выполнено 10 циклов. На рисунке 3, а изображен график одного цикла, где показаны временные характеристики с задаваемыми параметрами температуры и влажности. Контрольные измерения проводились в начале и в конце климатических испытаний в точках 1 и 14 (рисунок 3, б). Были проведены исследования с разной периодичностью во время максимально задаваемых температур 50 °С на циклах 1, 4, 5, 8 и 10 в точках 2, 5, 6, 7, 9, 12 (см. рисунок 3, б). Снятие результатов при низких температурах –60 ° осуществляли на циклах 1, 3, 8, 10 в точках 3, 4, 10, 11 и 13. Всего во время климатических испытаний было проведено 14 измерений. Объектами испытаний были как отдельные компоненты, так и сборные конструкции: RFID-метки-наклейки, полиэтиленовые колпачки с токопроводящим покрытием и RFID-метками-наклейками, стальной штырь с вбитыми полиэтиленовыми колпачками, изоляторы ШФ с RFID-индикатором и сборная конструкция, состоящая из стального штыря на уголке с насаженным полиэтиленовым

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

колпачком с токопроводящим покрытием и прикрепленной RFID-меткой. Наименование образцов приведено в таблице 1.

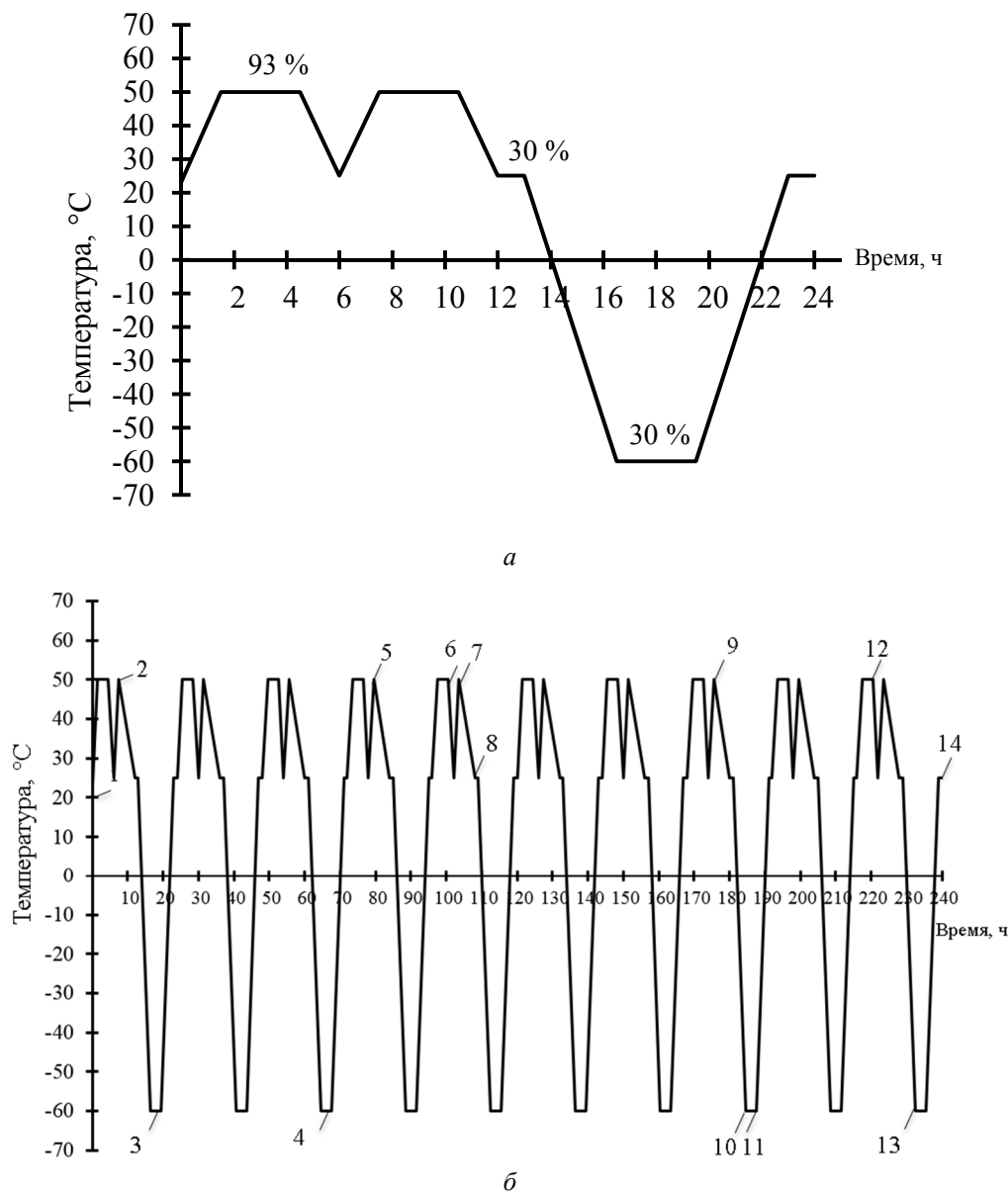


Рисунок 3 – Продолжительность и цикличность испытаний изолятора ШФ с индикатором:
а – продолжительность одного цикла (% – влажность);
б – суммарные циклы с указанием номеров контрольных измерений

Образцы RFID-меток-наклеек VAR2, VAR3, VAR7 закодированы 21-значным кодом, для удобства в таблице 1 показаны последние четыре знака.

Прием сигнала меток проводили переносным считывателем Atid AT 570, РСИ (рабочая частота 866,9 МГц, выходная мощность 26 дБм). Климатические режимы съема данных контрольных измерений и суммарное время в камере приведены на рисунке 3, б и в таблице 2.

В ходе испытаний отклики меток принимались из герметичной закрытой металлической камеры, имеющей смотровое окно. Испытания под номерами 8 и 14 проводились при открытой камере, так как температура и влажность соответствовали заданным режимам испытаний.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Объекты климатических испытаний

Образцы 1. RFID-метка						
Образец	1.1			1.2		
Тип метки	VAR3			VAR7		
Код метки	2575			9576		
Итого 2 шт.						
Образцы 2. Полиэтиленовый колпачок с токопроводящим покрытием и RFID-меткой						
Образец	2.1.			2.2.		
Тип метки	VAR3			VAR2		
Посл. цифры номера метки	AD76			CD7B		
Итого 2 шт.						
Образцы 3. Сборная конструкция, состоящая из стального штыря с полиэтиленовыми колпачками						
Образец	3.1.1	3.1.2	3.2.1	3.2.2	3.3.1	3.3.2
Тип метки	VAR3	Без метки	VAR3	Без метки	VAR3	Без метки
Код метки	4D73	Без метки	2175	Без метки	2975	Без метки
Итого 3 шт						
Образцы 4. Изолятор типа ШФ с RFID-индикатором (3 шт.) и сборная конструкция, состоящая из стального штыря на уголке с насаженным полиэтиленовым колпачком с токопроводящим покрытием и прикрепленной RFID-меткой (1 шт.)						
Образец	4.1	4.2	4.3	4.4		
Тип изолятора	ШФ-10	ШФ-20	ШС-10	Без изолятора		
Тип метки	VAR3	VAR3	VAR3	VAR2		
Код метки	2D75	B176	A976	DD7B		
Итого 4 шт.						

Таблица 2 – Позиции контрольных измерений климатических испытаний меток

Номер позиции	Наименование позиций контрольных измерений	Температура, °C	Влажность, %	Суммарное время выдержки в камере, ч
1	После предварительной выдержки	+21	30	–
2	Выдержка высокой температуры	+50	93	10
3	Выдержка низкой температуры	–60	30	19
4	Выдержка низкой температуры	–60	30	68
5	Выдержка высокой температуры	+50	93	79
6	Выдержка высокой температуры	+50	93	106
7	Выдержка высокой температуры	+50	93	108
8	Промежуточные измерения в открытой климатической камере	+25	30	110
9	Выдержка высокой температуры	+50	93	175
10	Выдержка низкой температуры	–60	30	181
11	Выдержка низкой температуры	–60	30	188
12	Выдержка высокой температуры	+50	93	220
13	Выдержка низкой температуры	–60	30	230
14	Окончание испытаний	+21	30	240

Ответные отклики меток регистрировались считывающим устройством, на экране монитора отражались номера меток, присвоенные каждому исследуемому образцу. Результаты испытаний по количеству откликнувшихся RFID-меток представлены в таблице 3.

В ходе испытаний было установлено, что отклик меток зависит от их расположения в климатической камере. Метки, расположенные в глубине камеры, не каждый раз давали отклик на зондирующий сигнал считывателя. Как было установлено, это связано с экранированием металлическим корпусом самой камеры, метки под воздействием воздушных потоков переместились на дно климатической камеры. При открытой двери камеры все метки функционировали в нормальном режиме (опыты 8 и 14). Выяснено, что расположение метки в вертикальной и горизонтальной плоскостях влияет на ответный сигнал от метки. Данный момент надо будет

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

учитывать и метки закреплять в вертикальной плоскости относительно считывателя с линейной поляризацией (это является рабочим положением работы метки). После проведения климатических испытаний все исследуемые образцы меток откликнулись на сигналы считывателя.

Таблица 3 – Количество откликнувшихся меток, закрепленных на образцах

Образцы	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1.1	3.2.1	3.3.1	4.1	4.2	4.3	4.4
Номер метки	5573	2575	AD76	CD7B	4D73	2175	2975	2D75	B176	A976	DD7B
Тип метки	VAR3	VAR3	VAR3	VAR2	VAR3	VAR3	VAR3	VAR3	VAR3	VAR3	VAR2
Количество откликнувшихся меток	10	13	14	9	7	11	11	10	14	10	14

Важные практические результаты испытаний были получены по механической устойчивости алюминиевых покрытий полиэтиленовых колпачков. В таблице 4 приведено описание внешнего вида покрытых колпачков после климатических испытаний.

Определено, что стойкость покрытия во многом зависит от конструктивной сборки изделий. Наилучшее качество у покрытий после испытаний у отдельных колпачков (2.1 и 2.2). При этом практически нет видимых разрушений поверхности алюминия. Климатические перепады не влияют на поверхностное металлизированное покрытие.

Таблица 4 – Описание внешнего вида алюминиевых покрытых полиэтиленовых колпачков после климатических испытаний

Номер образца	Внешний вид колпачков	Площадь разрушений, %	Общее состояние токопроводящего слоя
2.1	Без изменений	5	Хорошее
2.2	Без изменений	0	Хорошее
3.1.1	Есть отслоения	30	Удовлетворительное
3.1.2	Есть отслоения	50	Неудовлетворительное
3.2.1	Почти без изменений	10	Хорошее
3.3.1	Есть отслоения	10	Удовлетворительное
3.3.2	Есть отслоения	20	Удовлетворительное
4.1	Небольшая потертость	20	Удовлетворительное
4.2	Небольшая потертость	15	Хорошее
4.3	Потертость и отслоение	35	Удовлетворительное
4.4	Небольшая потертость	10	Хорошее

У образцов 3 «Сборная конструкция» (состоящая из стального штыря с насаженными полиэтиленовыми колпачками) среднее значение площади разрушения токопроводящего слоя алюминия составило около 25 %. При этом в четырех случаях из пяти токопроводящий алюминиевый слой не был разрушен и не наблюдалось значительного отслоения. В рабочей сборке с изолятором для образцов 4 «Изолятор типа ШФ с RFID-индикатором (3 шт.) и сборная конструкция, состоящая из стального штыря на уголке с насаженным полиэтиленовым колпачком с токопроводящим покрытием и прикрепленной RFID-меткой (1 шт.)» среднее значение площади разрушений составило не более 20 %, что несколько меньше, чем у образцов 3. При этом у образцов 4 наблюдается потертость на резьбовой поверхности за счет трения при закручивании и раскручивании изолятора на колпачок. Токопроводящий слой на образцах 4 с изоляторами не был нарушен. Таким образом, у исследуемых образцов 2, 3 и 4 токопроводящее покрытие имеет удовлетворительное состояние после проведенных климатических и механических испытаний.

Основываясь на представленных данных, мы пришли к выводу, что основная причина отслоения токопроводящего покрытия обусловлена особенностями конструкции колпачка и

принятой технологии монтирования его на штырь. Внутренняя верхняя часть колпачка имеет сужение и при вбивании колпачка на штырь происходит механическое поверхностное растяжение, особенно если штырь имеет больший диаметр. При этом в зависимости от конструкции колпачка происходит постепенное сужение его диаметра. Механическое воздействие в сочетании с разными тепловыми коэффициентами расширения у алюминия и полиэтилена при температурных колебаниях приводит к частичному отслаиванию тонкой алюминиевой пленки. Для устранения этого недостатка нами предложено применять штырь с резьбой. Штырь можно закрепить на траверсе болтовым соединением или сваркой. Данная резьба упрощает монтаж разработанной конструкции за счет калибровки размеров при сборке колпачка на штырь и установке RFID-индикатора. Благодаря предложенному решению навинчивания по резьбе уменьшится площадь деформации токопроводящей алюминиевой поверхности в отличие от применяемого заколачивания колпачка.

Измерение электрического сопротивления алюминиевого покрытия проводилось мультиметром PC5000, Кл 0,2. Среднее поверхностное сопротивление определялось присоединением щупов к поверхности колпачка и измерением по четырем точкам через каждые 90 ° по окружности.

Для оценки влияния изменения электрических характеристик, а именно увеличения омического сопротивления, исследовали образцы 2, 3, 4. Результаты измерений приведены в таблице 5.

Во всех исследуемых образцах наблюдалось незначительное увеличение сопротивления от 1,5 до 4 раз под влиянием внешних механических и климатических факторов. Полученные результаты находятся в пределах допустимой нормы, которая составляет не более 8 Ом. Наибольшее увеличение наблюдалось в местах разрушения токопроводящего алюминиевого покрытия (образцы 3.1.1, 3.1.2, 3.3.2, 4.3), что свидетельствует о необходимости улучшения адгезии между полиэтиленовой поверхностью и алюминиевым покрытием. Предлагается до покрытия колпачков алюминиевым слоем провести пескоструйную обработку внешней полиэтиленовой поверхности колпачка, что позволит улучшить сцепление материалов.

Таблица 5 – Результаты измерений сопротивления образцов

Образцы 2. Полиэтиленовый колпачок с токопроводящим покрытием и RFID-меткой						
Обозначение образца	2.1.			2.2.		
Среднее сопротивление покрытия колпачка, Ом						
До начала испытаний	2,7			2,8		
После предварительной выдержки	2,8			4,1		
После испытаний	3,5			6,7		
Образцы 3. Сборная конструкция, состоящая из стального штыря с двумя полиэтиленовыми колпачками с токопроводящим покрытием						
Обозначение образца	3.1.1	3.1.2	3.2.1	3.2.2	3.3.1	3.3.2
Среднее сопротивление покрытия колпачка, Ом						
До начала испытаний	1,0	1,2	2,5	2	1,3	1,1
После предварительной выдержки	1,8	1,5	3	2,7	1,7	1,4
После испытаний	5	5	6	3,4	6	7,9
Образцы 4. Сборные конструкции						
Обозначение образца	4.1	4.2	4.3	4.4		
Тип изолятора	ШФ-10	ШФ-20	ШС-10	Без изолятора		
Среднее сопротивление покрытия колпачка, Ом						
До начала испытаний	1,3	1,5	1,2	0,7		
После предварительной выдержки	1,8	1,9	2,1	1,2		
После испытаний	5,1	6	7	4,4		

В результате проведенные климатические испытания изоляторов с RFID-индикатором и их компонентов, входящих в систему RFID-контроля, подтвердили соответствие ГОСТ 28224–89 (МЭК 68-2-38-77) «Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов». Испытание Z/AD: Составное циклическое испытание на воздействие температуры и влажности. Basic environmental testing procedures. Part 2. Test Z/AD. Composite temperature and humidity cyclic test.

Даны предложения по совершенствованию компонентов и сборочной конструкции. Во-первых, применить на вершухе штыря винтовую резьбу вместо специальной накатки (ГОСТ 18381–80 «Штыри стальные для изоляторов воздушной линии электропередачи»), что снизит механические нагрузки при монтаже конструкции отдельных компонентов и позволит снизить погрешность установочных размеров для улучшения приема-передачи сигналов между считывателем и меткой. Во-вторых, путем пескоструйной обработки поверхности полиэтиленового колпачка можно улучшить адгезию поверхности с токопроводящим покрытием, что увеличит электропроводность конструкции.

Сама предлагаемая RFID-система функционирует в заданных климатических условиях, что позволяет рекомендовать ее применение в системе электроснабжения с изолированной нейтралью на участках воздушной линии СЦБ и ПЭ напряжением 6 – 10 и 35 кВ.

Список литературы

1. Шалин, А. И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6-35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты // <http://news.elteh.ru/> : сайт. – Текст : электронный. – URL : <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php> (дата обращения: 12.07.2021).
2. Арбузов, Р. С. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи / Р. С. Арбузов, А. Г. Овсянников. – Новосибирск : Наука, 2009. – 136 с. – Текст : непосредственный.
3. Исследование электростатического поля на гирляндах изоляторов контактной сети / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 1 (21). – С. 54–59.
4. Шумилов, Ю. Н. О необходимости повышения надежности линейных изоляторов для распределительных сетей 10 – 20 кВ / Ю. Н. Шумилов, В. Г. Сантоцкий, Э. Д. Шумилова. – Текст : непосредственный // Электротехника і електромеханіка. – 2018. – № 1. – С. 62–65.
5. Несенюк, Т. А. Радиочастотная идентификация для автоматизированного контроля состояния изоляторов / Т. А. Несенюк. – Текст : непосредственный // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2018. – № 5. – С. 45–51.
6. Галкин, А. Г. Бесконтактный RFID-контроль изоляторов / А. Г. Галкин, Т. А. Несенюк, О. А. Шерстюченко. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2014. – № 1 (40). – С. 65–70.
7. Несенюк, Т. А. Методика определения состояния изоляторов ВЛ 6 – 10 кВ / Т. А. Несенюк, Б. С. Сергеев, А. П. Сухогузов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 4 (20). – С. 97–104.
8. Несенюк, Т. А. Исследование токопроводящего покрытия для индикации штыревых изоляторов воздушной линии электропередачи / Т. А. Несенюк, В. Н. Соколов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2019. – № 2 (61). – С. 80–85.
9. Несенюк, Т. А. Автоматизированный контроль состояния изоляторов с применением RFID-индикаторов / Т. А. Несенюк, В. Н. Соколов. – Текст : непосредственный // Наука и образование – транспорту. – 2020. – № 1. – С. 351–355.
10. Кудимов, В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В. В. Кудимов, Г. В. Бобров; под ред. Б. С. Митина. – Москва : Металлургия, 1992. – 432 с. – Текст : непосредственный.

11. ГОСТ 28224-89 (МЭК 68-2-38-77). Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание Z/AD: Составное циклическое испытание на воздействие температуры и влажности. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 11 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Shalin A. I. Ground faults in power lines 6–35 kV. Appearance features and protection devices [Zamykaniya na zemlyu v liniyakh elektroperedachi 6–35 kV. Osobennosti vozniknoveniya i pribory zashchity], Available at: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php> (accessed 12 July 2021).

2. Arbuzov R. S., Ovsiannikov A. G. *Sovremennyye metody diagnostiki vozdukhnykh linii elektroperedachi* (Modern methods of diagnostics of overhead power lines). Novosibirsk: Nauka Publ., 2009, 136 p.

3. Kuz'menko A. Iu., Kuznetsov A. A., Krotenko E. A. Investigation of electrostatic field on the insulator strings catenary [Issledovanie elektrosticheskogo polia na girliandakh izolyatorov kontaktnoi seti]. *Izvestiya Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 54–59.

4. Shumilov Yu. N., Santotskiy V. G., Shumilova E. D. On the need to increase the reliability of linear insulators for distribution networks 10–20 kV [O neobkhodimosti povysheniya nadezhnosti lineynykh izolyatorov dlya raspredelitel'nykh setey 10–20 kV]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 1, pp. 62–65.

5. Nesenyuk T. A. Radio frequency identification for automated control of the state of insulators. [Radiochastotnaya identifikatsiya dlya avtomatizirovannogo kontrolya sostoyaniya izolyatorov]. *Energobezopasnost' i energosberezheniye – Energy safety and energy economy*, 2018, no. 5, pp. 45–51.

6. Galkin A. G., Nesenjuk T. A., Sherstiuchenko O. A. Contactless RFID control of insulators [Beskontaktnyy RFID-kontrol' izolyatorov]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2014, no. 1 (40), pp. 65–70.

7. Nesenyuk T. A., Sergeev B. S., Sukhoguzov A. P. Determination procedure of the condition of the insulators used in an overhead power transmission line of 6–10 kV [Metodika opredeleniya sostoyaniya izolyatorov VL 6–10 kV]. *Izvestiya Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 4 (20), pp. 97–104.

8. Nesenyuk T. A., Sokolov V. N. Research of a conductive coating for indication of pin insulators of an overhead power transmission line [Issledovaniye tokoprovodyashchego pokrytiya dlya indikatsii shtyrevykh izolyatorov vozdukhnoy linii elektroperedachi]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2019, no. 2 (61), pp. 80–85.

9. Nesenyuk T. A., Sokolov V. N. Automated control of the state of insulators using RFID Indicators. [Avtomatizirovanny kontrol' sostoyaniya izolyatorov s primeneniym RFID-indikatorov]. *Nauka i obrazovaniye transportu – Science and education for transport*, 2020, no. 1, pp. 351–355.

10. Kudimov V. V., Bobrov G. V., ed. Mitin B. S. *Naneseniye pokrytiy napyleniyem. Teoriya, tekhnologiya i oborudovaniye* (Application of coatings by spraying. Theory, technology and equipment). Moscow: Metallurgiya Publ., 1992, 432 p.

11. *Osnovnyye metody ispytaniy na vozdeystviye vneshnikh faktorov. Chast' 2. Ispytaniya. Ispytaniye Z / AD: Sostavnoye tsiklicheskiye ispytaniye na vozdeystviye temperatury i atmosfery, GOST 28224-89 (IEC 68-2-38-77)* (Basic test methods for external factors. Part 2. Tests, National Standard 28224-89). Moscow, Standardinform, 2006, 11 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Несенюк Татьяна Анатольевна

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины», УрГУПС.

Тел.: +7 (912) 690-23-74.

E-mail: TNesenuk@mail.ru

Соколов Виктор Николаевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Кандидат химических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины», УрГУПС.

Тел.: +7 (903) 081-85-70.

E-mail: VSokolov@usurt.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Несенюк, Т. А. Исследование влияния климатических факторов на штыревые изоляторы с RFID-индикаторами / Т. А. Несенюк, В. Н. Соколов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 31 – 40.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nesenyuk Tatiana Anatolievna

Ural State University of Railway Transport (USURT).

65, Kolmogorova st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric machines», USURT.

Phone: +7 (912) 690-23-74.

E-mail: TNesenuk@mail.ru

Sokolov Viktor Nikolayevich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

65, Kolmogorova st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Ph. D. in Chemistry, associate professor of the department «Natural science disciplines», USURT.

Phone: +7 (903) 081-85-70.

E-mail: VSokolov@usurt.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nesenyuk T. A., Sokolov V. N. Study of the influence of climatic factors for pin insulators with RFID indicators. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 2 (46), pp. 31 – 40 (In Russian).

УДК 621.314.214.332

Б. А. Аржанников, И. А. Баева, Т. С. Тарасовский

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург,
Российская Федерация

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМОГО РЕАКТОРА ТИРИСТОРНО-РЕАКТОРНОГО УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

Аннотация. Проанализированы недостатки используемых в тяговом электроснабжении ступенчатой системы автоматического регулирования напряжения под нагрузкой (АРПН) и системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения (БАРН) с реакторным переключающим устройством преобразовательного трансформатора. Рассмотрена схема тиристорно-реакторного переключающего устройства (ТРПУ), подключенного к первичной обмотке трансформатора. Приведено краткое описание работы трансформатора с ТРПУ и порядок расчета симметричных и несимметричных внешних естественных характеристик преобразовательного агрегата с ТРПУ.

На основании зависимости энергетических показателей преобразовательного агрегата от сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ предложена методика расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора, где за критерий рациональности принят коэффициент мощности преобразовательного агрегата. Методика включает в себя два этапа: первый – расчет семейства значений коэффициента мощности преобразовательного агрегата в зависимости от сопротивления неуправляемого реактора и тока нагрузки преобразовательного агрегата; второй – определение среднего по току нагрузки значения коэффициента мощности преобразовательного агрегата для каждого рассматриваемого значения сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ и определение рационального для рассматриваемых внешних естественных характеристик агрегата.

В соответствии с представленной методикой произведен расчет минимального допустимого и рационального сопротивлений неуправляемого реактора ТРПУ в составе преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРДП-16000/10.

С учетом выбранного рационального значения сопротивления неуправляемого реактора ТРПУ произведен расчет и представлены внешние естественные характеристики преобразовательного агрегата с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРДП-16000/10.

Проверка работоспособности представленной методики расчета для решения задачи выбора рационального сопротивления неуправляемого реактора была проведена на физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ, с 12-пульсовым выпрямительным блоком, с трансформатором мощностью 30 кВ·А и линейным первичным напряжением 380 В. Сравнение экспериментальных и расчетных значений показало незначительное расхождение, не превышена допустимая погрешность.

Определение величины сопротивления неуправляемого реактора на основании разработанной методики обеспечивает получение наибольших значений коэффициента мощности преобразовательного агрегата.

Ключевые слова: тяговое электроснабжение, преобразовательный агрегат, устройства РПН, тиристорно-реакторное переключающее устройство, неуправляемый реактор, технико-энергетические показатели.

Boris A. Arzhannikov, Irina A. Baeva, Timofey T. Tarasovskiy

Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, the Russian Federation

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING THE RATIONAL RESISTANCE OF A NON-CONTROLLED REACTOR OF A THYRISTOR-REACTOR DEVICE FOR VOLTAGE REGULATION UNDER LOAD AT TRACTION SUBSTATIONS

Abstract. The drawbacks of the step-by-step automatic voltage control system under load AVC and the non-contact automatic voltage control system NAVC with the reactor switching device of the converter transformer used in the traction power supply are analyzed. The scheme of a thyristor-reactor switching device (TRSD) connected to the primary winding of the transformer is considered. A brief description of the operation of a transformer with TRSD and the procedure for calculating the symmetrical and asymmetrical external natural characteristics of a converter unit with TRSD are given.

Based on the dependence of the energy indicators of the converter unit on the resistance of the uncontrolled reactor TRSD, a method is proposed for calculating the rational resistance of an uncontrolled reactor, where the power factor of the converter unit is taken as the criterion of rationality. The method includes two stages: the first is the calculation of the values of the power factor of the converter unit depending on the resistance of the uncontrolled reactor and the load current of the converter unit; the second is the determination of the average load current value of the power factor of the converter unit for each considered value of the resistance of the uncontrolled TRSD reactor and the determination of the rational for the considered external natural characteristics of the unit.

In accordance with the presented methodology, the calculation of the minimum permissible and rational resistances of the uncontrolled reactor TRSD as part of a converter unit with a converter transformer TRDP-16000/10 was made.

Taking into account the selected rational value of the resistance of the uncontrolled reactor TRSD, a calculation was made and the external natural characteristics of a converter unit with a TRSD and a converter transformer TRDP-16000/10 are presented.

The performance check of the presented calculation method for solving the problem of choosing the rational resistance of an uncontrolled reactor was carried out on a physical model of a converter unit with a TRSD, with a 12-pulse rectifier unit, with a 30 kVA transformer and a linear primary voltage of 380 V. Comparison of experimental and calculated values showed a slight discrepancy, the permissible error was not exceeded.

Determination of the resistance value of an uncontrolled reactor based on the developed methodology provides the highest values of the power factor of the converter unit.

Keywords: traction power supply, converter unit, on-load tap-changers, thyristor-reactor switching device, uncontrolled reactor, technical and energy indicators.

Известные в настоящее время устройства регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой (РПН) можно разделить на две основные группы: устройства ступенчатого контактного и бесконтактного регулирования напряжения и устройства плавного регулирования напряжения.

Для электрифицированных участков железных дорог была разработана во ВНИИЖТе [1, 2] автоматическая ступенчатая контактная система АРПН, которая обеспечивала стабилизацию выпрямленного напряжения в диапазоне 3500 – 3700 В со степенью регулирования

$\Delta U_d = 150$ В. Система не нашла широкого применения ввиду низкой надежности механического переключателя и контакторов в устройстве РПН, а также большой погрешности регулирования.

В системе тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ широко применяется система бесконтактного автоматического регулирования напряжения [3, 4] с использованием плавного изменения коэффициента трансформации.

Система состоит из преобразовательного трансформатора и несимметричного реакторного бесконтактного устройства РПН. Регулирование осуществляется со стороны первичной обмотки путем подмагничивания и размагничивания управляемого реактора. Наличие дополнительных индуктивных устройств (реакторов) в цепи протекания тока нагрузки снижает коэффициент мощности преобразовательного агрегата (ПА) (преобразовательный трансформатор и выпрямительный блок). Кроме того, к недостаткам системы БАРН следует отнести значительные массогабаритные показатели, соизмеримые с показателями преобразовательного трансформатора; высокую стоимость реакторов, связанную с использованием электротехнической меди и стали; и главное, значительные потери электроэнергии в реакторах.

Для повышения технико-энергетических показателей системы БАРН перспективным направлением дальнейшего развития является применение полупроводниковых приборов в конструкции устройства РПН, что по предварительным расчетам, позволит снизить потери электроэнергии в устройстве РПН почти в пять раз и за счет исключения управляемого реактора из конструкции переключателя снизить его стоимость в два раза. Одним из вариантов работы по указанному направлению является разработка тиристорно-реакторного переключающего устройства [5, 6].

В системе БАРН с ТРПУ изменение числа витков производится с помощью тиристорно-реакторного переключающего устройства, подключенного к первичной обмотке трехфазного преобразовательного трансформатора (рисунок 1).

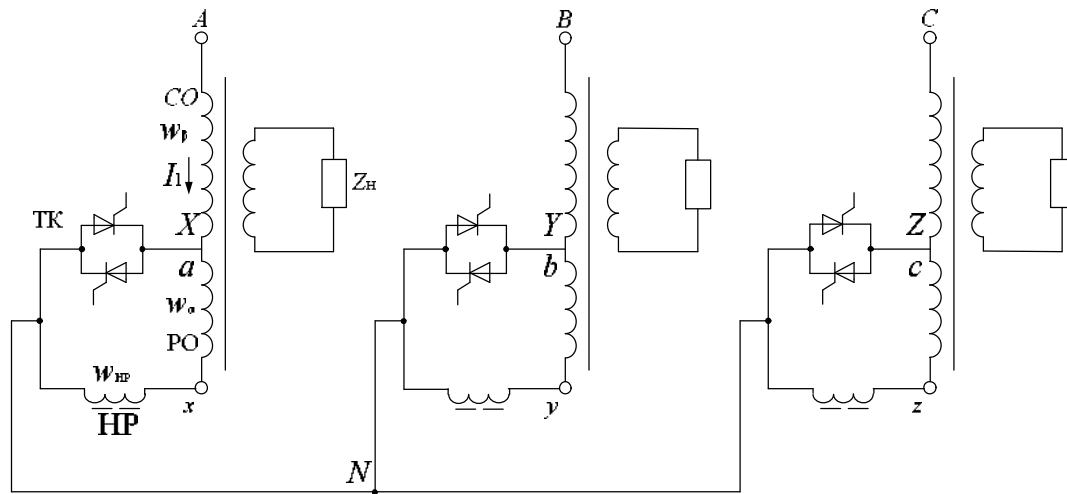


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема соединения ТРПУ с первичными обмотками трехфазного трансформатора

Первичная обмотка трансформатора состоит из последовательно соединенных обмоток – сетевой (СО) с числом витков w_b и регулировочной обмоткой (РО) с числом витков w_a . К точке соединения обмоток (первый отвод РО) подключен тиристорный ключ (ТК) – два встречно-параллельно включенных тиристора. К концу РО подключен неуправляемый реактор (НР), соединенный с концом ТК, образуя общую точку. Соединение общих точек всех трех фаз образует нейтраль N соединения первичных обмоток с ТРПУ трансформатора.

Коэффициент трансформации такого трансформатора в зависимости от состояния тиристорного ключа ТК изменяется по закону:

$$K_p = K_\beta + \rho K_\alpha, \quad (1)$$

где $K_\beta = \frac{w_\beta}{w_2}$, $K_\alpha = \frac{w_\alpha}{w_2}$;

w_2 – число витков вторичной обмотки;

где параметр регулирования

$$\rho = \frac{R_{TK}}{X_\alpha + X_{HP} + R_{TK}}, \quad (2)$$

где R_{TK} – сопротивление тиристорного ключа, Ом;

X_α – индуктивное сопротивление РО, Ом;

X_{HP} – индуктивное сопротивление НР, Ом.

Режим работы ТРПУ при неизменном X_α и принятом при дальнейшем расчете рациональном значении X_{HP} может быть определен двумя идеальными состояниями тиристорного ключа:

$$\begin{aligned} \text{ТК закрыт, } R_{TK} = \infty; \rho = 1; K_{p_{\max}} &= K_\beta + K_\alpha = K_1; \\ \text{ТК открыт, } R_{TK} = 0; \rho = 0; K_{p_{\min}} &= K_\beta. \end{aligned} \quad (3)$$

Вторичное напряжение холостого хода изменяется в соответствии с соотношением:

$$U_{20} = \frac{U_{10}}{K_p}, \quad (4)$$

где U_{10} – первичное напряжение холостого хода трансформатора, В.

Режим работы ТРПУ при закрытом ТК. При закрытом тиристорном ключе напряжение питающей сети U_c приложено к последовательно соединенным обмоткам w_β , w_α и обмотке w_{HP} неуправляемого реактора (см. рисунок 1). Реактор НР в этом режиме является дополнительным сопротивлением в цепи первичной обмотки трансформатора и уменьшает напряжение U_{10} , приложенное непосредственно к первичной обмотке $w_\beta + w_\alpha$ трансформатора:

$$U_{10} = U_c - I_{01}(X_c + X_{HP}), \quad (5)$$

где I_{01} – ток холостого хода трансформатора с первичной обмоткой $w_\beta + w_\alpha$, А;

X_c – индуктивное сопротивление питающей сети, Ом.

Выпрямленное напряжение холостого хода

$$U_{d0} = K_b \frac{U_{10}}{K_{p_{\max}}} = U_{d0\min}, \quad (6)$$

где K_b – коэффициент выпрямления, для 6-пульсовой трехфазной мостовой схемы – 2,34; для 12-пульсовой схемы – 4,68.

Среднее значение напряжения преобразовательного агрегата

$$U_d = U_{d0} - U_{d\gamma} - \Delta U_d, \quad (7)$$

где $\Delta U_d = \Delta U_R + \Delta U_B$ – падение напряжения на активных сопротивлениях трансформатора с ТРПУ и на вентилях выпрямительного блока, В;

ΔU_γ – среднее значение коммутационной потери выпрямленного напряжения, В.

При последовательной работе в 12-пульсовой схеме продолжительность работы вентиля и одной фазы вентильной обмотки из трех фаз ($q = 3$) составляет $2\pi/3$ [7]:

$$\Delta U_\gamma = 2 \frac{I_d X}{2\pi / 3} = \frac{3 I_d X}{\pi}, \quad (8)$$

где X – индуктивное сопротивление обмоток трансформатора ($w_\beta + w_\alpha$), w_2 , определенное из опыта короткого замыкания и приведенное ко вторичной стороне, Ом:

$$X = \frac{1}{K_\rho^2} \cdot \frac{U_{K1} U_{1H}}{I_{1H}} = \frac{U_{K1} U_2}{K_\rho I_{1H}} \cdot \frac{K_\beta}{K_\beta} = \frac{U_{K1} U_{d0 \min}}{K_\rho K_\beta \cdot 1,57 I_{dH}} = \frac{U_{K1} U_{d0 \min}}{K_\beta \cdot 1,57 I_{dH}}, \quad (9)$$

где U_{K1} – напряжение короткого замыкания трансформатора по схеме с обмотками ($w_\beta + w_\alpha$), w_2 , В.

Отсюда с учетом формул (1) – (5) имеем:

$$U_{d \min} = \frac{K_\beta}{K_\beta + K_\alpha} [U_C - I_{01} (X_C + X_{HP})] \cdot \left(1 - \frac{3I_d}{\pi} \cdot \frac{U_{K1}}{K_\beta \cdot 1,57 I_{dH}} \right) - \Delta U_d. \quad (10)$$

Режим работы ТРПУ при открытом ТК. При открытом ключе ТК [8 – 10] напряжение питающей сети U_C приложено к обмотке w_β трансформатора (см. рисунок 1). В контуре «РО – открытый тиристорный ключ ТК – НР» протекает так называемый циркулирующий ток I_α .

$$I_\alpha = \frac{\dot{E}_\alpha}{X_\alpha + X_{HP} + R_{TK}} = \frac{K_\alpha \dot{U}_{10}}{K_\beta (X_\alpha + X_{HP} + R_{TK})}, \quad (11)$$

где E_α – ЭДС регулировочной обмотки трансформатора, В;

$U_{10} = U_C - I_{02} X_C$ – расчетное (начальное) первичное напряжение трансформатора, равное напряжению питающей сети, уменьшенному за счет падения напряжения на сопротивлении сети X_C при протекании холостого хода I_{02} трансформатора с первичной обмоткой w_β , В.

Циркулирующий ток ограничен сопротивлением регулировочной обмотки трансформатора X_α , сопротивлением открытого тиристорного ключа R_{TK0} и сопротивлением неуправляемого реактора X_{HP} , рациональное определение которого для ТРПУ составляет задачу этой работы.

Кроме того, циркулирующий ток, являясь для трансформатора дополнительной индуктивной нагрузкой в цепи третьей (регулирующей) обмотки и не принимающей непосредственного участия в рабочей цепи преобразовательного агрегата, увеличивает первичный ток трансформатора на величину

$$I_\alpha^* = \frac{K_\alpha}{K_\beta} I_\alpha \quad (12)$$

и в режиме холостого хода рабочей цепи составит

$$I_{10} = I_{02} + I_\alpha^*. \quad (13)$$

Напряжение U_1 , приложенное к обмотке трансформатора w_β в режиме холостого хода,

$$U_1 = U_C - I_{10} X_C = U_C - (I_{02} + I_\alpha^*) X_C. \quad (14)$$

Выпрямленное напряжение холостого хода

$$U_{d0} = K_\beta \frac{U_1}{K_{\rho \min}} = U_{d0 \max}. \quad (15)$$

Среднее значение напряжения преобразовательного агрегата соответствует формулам (7) и (8), где индуктивное сопротивление обмоток трансформатора w_β , w_2

$$X = \frac{U_{K2} U_{d0 \max}}{K_B \cdot 1,57 I_{dH}}, \quad (16)$$

где U_{K2} – напряжение короткого замыкания трансформатора по схеме с обмотками w_β , w_2 , В.
Отсюда:

$$U_{d \max} = \frac{K_B}{K_\beta} \left[U_C - (I_{02} + I_{II}') X_C \right] \cdot \left(1 - \frac{3 I_d}{\pi} \cdot \frac{U_{K2}}{K_B \cdot 1,57 I_{dH}} \right) - \Delta U_d. \quad (17)$$

На рисунке 2 представлен вид внешних естественных характеристик, из которых 1 и 2 (ограничительные) рассчитаны по формулам (10) и (17) соответственно при закрытых и открытых тиристорных ключах ТРПУ в трех фазах трансформатора, реализуя симметричный режим работы тиристорных ключей ТРПУ.

Угол открытия тиристорных ключей ТК не учитывается, и их работа происходит в ключевом режиме «открыт – закрыт». Получение промежуточных характеристик вида 3 или 4 при симметричном режиме ТРПУ связано с временным делением периода (цикла) регулирования T_{II} на открытое (одна часть T_{II}) и на закрытое (другая часть T_{II}) состояние тиристорных ключей ТРПУ всех трех фаз обмоток трансформатора.

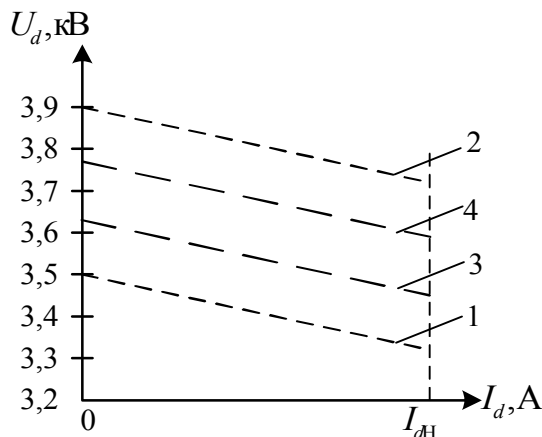


Рисунок 2 – Возможные внешние характеристики преобразовательного агрегата с трансформатором ТРДП-16000/10 с ТРПУ

При получении автоматических стабилизированных внешних характеристик (на рисунке 2 не показаны) происходит переключение тиристорных ключей (уменьшение времени T_{II}) трех фаз в полном диапазоне регулирования $\Delta U_{d0} = U_{d0 \max} - U_{d0 \min}$, равного для трансформатора ТРДП-16000/10 $\Delta U_{d0} = 3900 \text{ В} - 3500 \text{ В} = 400 \text{ В}$, что превышает принятую во ВНИИЖТе для трансформатора ТДРУНГ-20000/110 ступень регулирования напряжения $\pm 75 \text{ В}$ и равную 150 В [1, 2].

Для снижения напряжения ступени переключения тиристорных ключей ТРПУ введем способ пофазного регулирования напряжения [11], при котором промежуточные характеристики 3 и 4 (см. рисунок 2) соответствуют несимметричному режиму работы ТРПУ: тиристорный ключ открыт в одной (любой) фазе (характеристика 3) и тиристорные ключи открыты в двух (любых) фазах трансформатора (характеристика 4).

Ранее отмечено, что для повышения энергетических показателей преобразовательного агрегата в режиме работы ТРПУ с закрытыми ключами величина сопротивления НР должна стремиться к нулю ($X_{НР} = 0$). С другой стороны, при открытых тиристорных ключах для снижения потребляемой преобразовательным агрегатом реактивной мощности сопротивление НР должно максимально ограничить циркулирующий ток. В этом случае величина сопротивления НР стремится к бесконечности ($X_{НР} = \infty$). Из этого следует, что сопротивление реактора НР находится в диапазоне значений от нуля до бесконечности и что каждой внешней промежуточной характеристике соответствует конкретное значение реактора НР, что связано с регулированием сопротивления НР.

Такое решение ведет к усложнению схемы, поэтому с учетом рассмотренных режимов работы ТРПУ произведем расчет ряда промежуточных внешних характеристик с оценкой $\cos \varphi_I$ (при расчете коэффициента мощности K) с использованием теории оптимального управления при последовательном переборе возможных вариантов сопротивления неуправляемого реактора.

Критерием выбора рационального сопротивления реактора НР принимается наибольшее значение $\cos \varphi_1$ для каждой промежуточной внешней естественной характеристики с дальнейшим выбором его среднего значения и проверкой расчета $\cos \varphi_1$ для всех естественных промежуточных и ограничительных характеристик диапазона регулирования напряжения.

Коэффициент мощности преобразовательного агрегата при наличии выпрямителя с большой катодной индуктивностью определяется уравнениями следующего вида:

$$\begin{cases} K = F_1 \cos \varphi_1; \\ F_1 = \frac{I_{1(1)}}{I_1}; \\ \varphi_1 = \alpha + \frac{2}{3}\gamma, \end{cases} \quad (18)$$

где F_1 – коэффициент искажения формы кривой сетевого тока I_1 , вносимый выпрямительным блоком, равный при 12-пульсовой схеме выпрямления 0,988 [7];

$I_{1(1)}$ – основная гармоника сетевого тока, А;

α, γ – углы задержки и коммутации тока вентилях коммутирующих фаз вентильной обмотки трансформатора, эл. град.

Угол задержки α появляется при регулировании напряжения с помощью управляемых вентилях выпрямительного блока ПА. Известно [7], что в режиме работы неуправляемых вентилях выпрямительного блока, характеризуемого наибольшим значением коэффициента мощности, угол коммутации γ изменяется от 0 до 60 эл. град.

Этот режим находится в диапазоне $0 \leq \frac{I_d X_a}{\sqrt{mE_2}} \leq 1,225$ и определяется уравнением:

$$\cos \gamma \leq 1 - \frac{I_d X_a}{\sqrt{mE_2}}, \quad (19)$$

где I_d – среднее значение выпрямленного тока, А;

E_2 – действующее значение фазной ЭДС вентилях обмотки, В;

X_a – реактивное сопротивление цепи коммутации, Ом;

m – число фаз, входящих в коммутационную группу.

При расчете сопротивление коммутации принимается

$$X_a = \frac{1}{K_p^2} [X_\beta + \rho(X_a + X_{HP}) + X_C] + X_2, \quad (20)$$

которое в обычном нерегулируемом трансформаторе остается неизменным, в рассматриваемом преобразователе зависит от состояния тиристорных ключей «закрыт» – «открыт», соответственно зависит от параметра регулирования ($\rho = 1$ либо $\rho = 0$) и от коэффициента трансформации ($K_{p \max}, K_{p \min}$). Кроме того, в X_a вводятся сопротивление питающей сети X_C и ряд значений величин сопротивлений X_{HPi} , из которых необходимо выбрать рациональную величину.

Полная мощность, потребляемая из сети преобразовательным трансформатором в составе преобразовательного агрегата с ТРПУ,

$$S_{1(1)\rho} = 3(U_C - I'_{1(1)\rho} X_C) I'_{1(1)\rho} \cdot 10^{-3}. \quad (21)$$

Активная мощность, потребляемая из сети преобразовательным агрегатом с ТРПУ,

$$P_1 = (U_d + \Delta U_R + \Delta U_B) C \cdot 10^{-3} + \left(\frac{K_1}{K_p} \right)^2 (P_0 + P_{\text{онр}}) + \frac{I_{1(1)}}{\frac{1}{K_p} 1,5 I_{\text{дн}}} (P_K + P_{\text{кнр}}), \quad (22)$$

где $\Delta P_0, \Delta P_K$ – потери холостого хода и короткого замыкания преобразовательного трансформатора, Вт.

Среднее значение выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата при работе ТРПУ в симметричных режимах (характеристики 1 и 2 на рисунке 2) $U_{d \min}$ и $U_{d \max}$ определены из уравнений (10) и (17).

Среднее значение выпрямленного напряжения при несимметричном режиме ТРПУ

$$U_{d03} = \frac{n_{\text{откр}} U_{d0 \max} + n_{\text{закр}} U_{d0 \min}}{3}, \quad (23)$$

где $n_{\text{откр}}, n_{\text{закр}}$ – число открытых и закрытых тиристорных ключей соответственно, шт.

При расчетах внешних естественных характеристик 1 и 2 (см. рисунок 2) наибольшие значения коэффициентов мощности ($\cos \varphi_{1(1)}$), как указано ранее, могут быть получены при минимальном значении $X_{\text{нр}}$ (характеристика 1) и при максимальном значении $X_{\text{нр}}$ (характеристика 2). Однако окончательная величина $X_{\text{нр}}$ для всех внешних естественных характеристик может быть получена только из расчета промежуточных характеристик 3 и 4 несимметричного режима работы ТРПУ.

При рассмотрении варианта минимального расчетного сопротивления $X_{\text{нр min}}$ может быть принято такое сопротивление, при котором по обмотке $w_{\text{нр}}$ реактора должен протекать ток, не превышающий номинального первичного тока I_1 ($w_{\beta} + w_{\alpha}$) трансформатора при открытом состоянии тиристорных ключей и при максимальном напряжении на регулировочной обмотке $U_{\alpha \max}$. Тогда для преобразовательного трансформатора ТРДП с ТРПУ

$$X_{\text{нр min}} = \frac{\frac{w_{\alpha}}{w_{\beta} + w_{\alpha}} U_{\text{нр}}}{I_{\text{нр}}}; \quad (24)$$

$$X_{\text{нр min}} = \frac{0,18 \cdot 6069}{627} = 1,74 \text{ Ом.}$$

Из расчета следует, что минимальная величина $X_{\text{нр}}$ должна быть не менее 1,74 Ом.

Если минимальное расчетное сопротивление $X_{\text{нр min}}$ принято на основании реальных величин первичного тока и напряжения регулировочной обмотки трансформатора, то максимальное расчетное сопротивление $X_{\text{нр max}}$ принимается произвольным, но с выполнением условия: максимальный приведенный к сетевой обмотке w_{β} циркулирующий ток $I_{\text{ц}}''$ не должен превышать тока холостого хода I_{02} трансформатора с сетевой обмоткой w_{β} , т. е. $I_{\text{ц}}'' \leq I_{02}$, где $I_{\text{ц}}''$ определяется по формуле (12).

Для неуправляемого реактора в схеме ТРПУ преобразовательного трансформатора ТРДП-16000/10 расчетное значение сопротивления $X_{\text{нр}}$ рассмотрим в пределе от 1,5 до 3,5 Ом со ступенью расчета 0,5 Ом.

Методика расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора тиристорно-реакторного устройства регулирования напряжения под нагрузкой включает в себя два этапа.

Схема алгоритма решения первого этапа задачи рационального по $\cos \varphi_1$ сопротивления неуправляемого реактора представлена на рисунке 3.

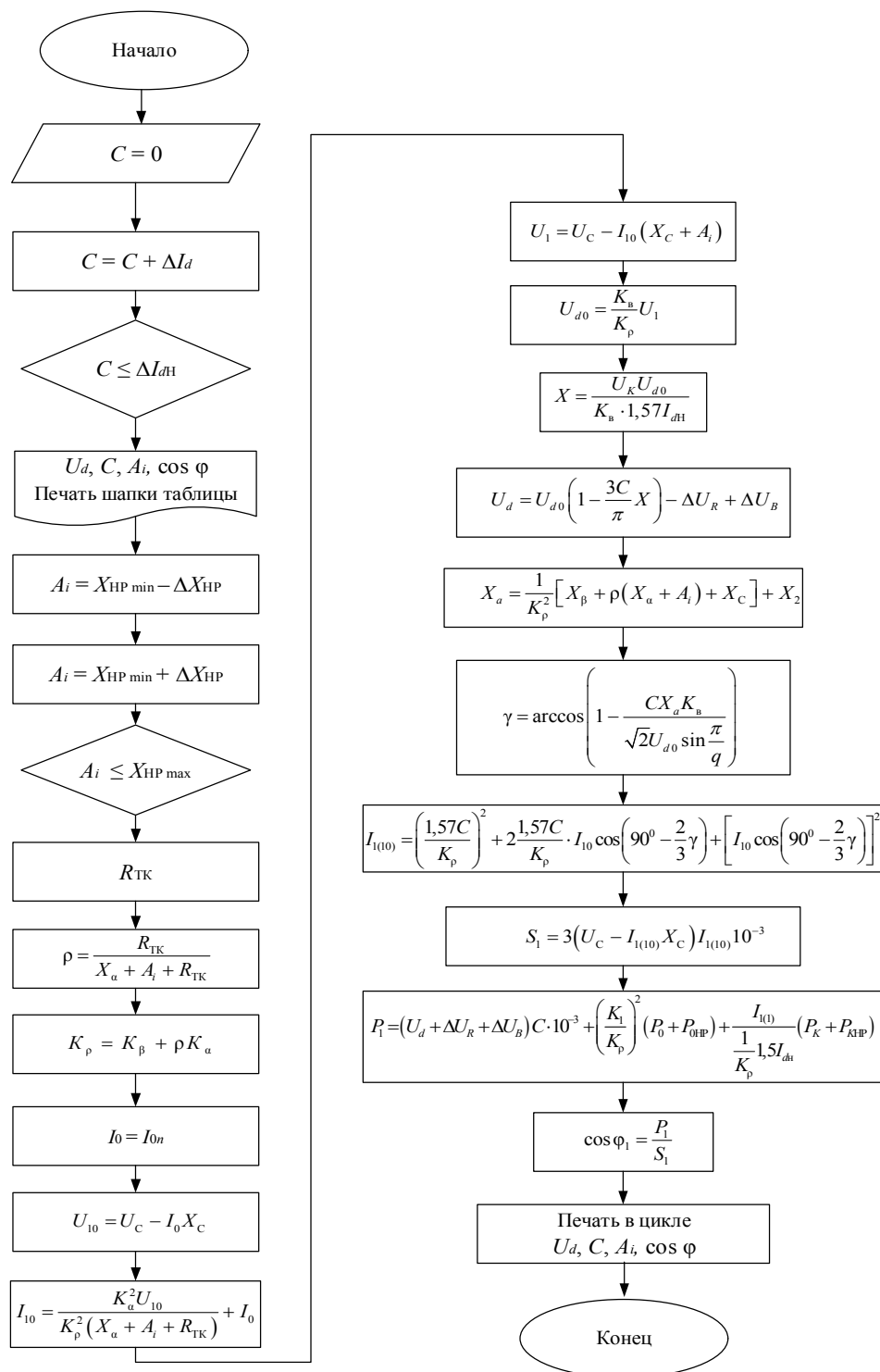


Рисунок 3 – Схема алгоритма решения первого этапа задачи рационального $\cos \varphi_1$ сопротивления неуправляемого реактора

В результате проведенных расчетов получаем семейство графиков зависимости косинуса φ_1 $\cos \varphi_1 = f(I_d)$ от тока нагрузки преобразовательного агрегата, определяемое сопротивлением неуправляемого реактора ТРПУ для внешних характеристик 3 и 4 (рисунок 4).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

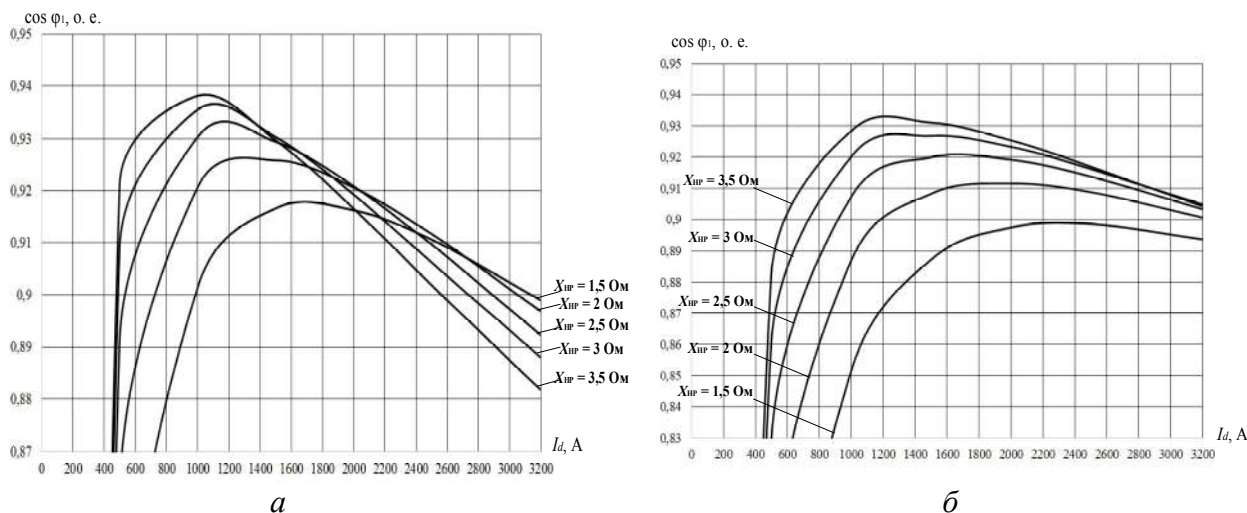


Рисунок 4 – Семейство графиков зависимости косинуса ϕ_1 $\cos \phi_1 = f(I_d)$ от тока нагрузки преобразовательного агрегата, определяемое сопротивлением неуправляемого реактора ТРПУ для внешней характеристики 3 (а) и внешней характеристики 4 (б)

Многоволновая природа графиков функций объясняется их линейной аппроксимацией («сглаживанием») для более наглядного представления результатов расчетов, что на погрешность результатов влияет незначительно.

На втором этапе методики на основании полученных результатов расчетов в виде семейства графиков $\cos \phi_{1i} = f(I_d)$ из всего множества значений $\cos \phi_{1i}$ определяется среднее $\cos \phi_{1cp}$ для каждого значения сопротивления неуправляемого реактора в рамках рассматриваемого диапазона для внешних характеристик 3 и 4 по формуле:

$$\cos \phi_{1cp} = \frac{\sum_{i=I_{d,3}}^{I_{dH}} \cos \phi_{1i}}{INT\left(\frac{I_{dH}}{\Delta I_d}\right) + 1}, \quad (25)$$

где ΔI_d – шаг изменения выпрямленного тока I_d , А;

I_{dH} – номинальное значение тока нагрузки ПА, А;

INT – функция, определяющая целую часть выражения в скобках.

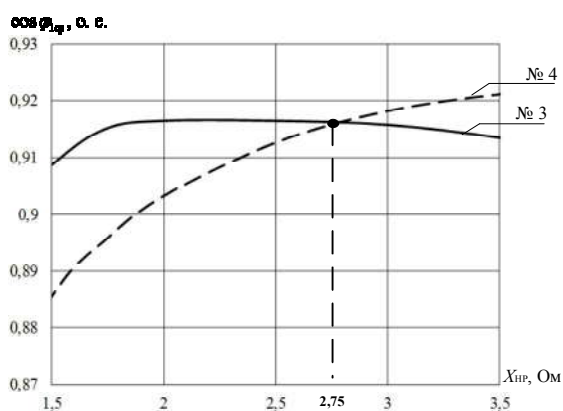


Рисунок 5 – График зависимости $\cos \phi_{1(1)cp} = f(X_{нр})$ внешних характеристик 3 и 4 преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРДП-16000/10 и ТРПУ

Результаты проведенных расчетов $\cos \phi_{1cp}$ внешних характеристик 3 и 4 преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРДП-16000/10 и ТРПУ при различных значениях сопротивления неуправляемого реактора представлены на рисунке 5.

Значение сопротивления неуправляемого реактора $X_{нр} = 2,75$ Ом, которому соответствует точка пересечения графиков зависимости $\cos \phi_{1(1)cp} = f(X_{нр})$ характеристик 3 и 4, является рациональным для ТРПУ в составе преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРДП-16000/10.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Расчетные внешние характеристики преобразовательного агрегата с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРДП-16000/10 при сопротивлении неуправляемого реактора, равном 2,75 Ом, показаны на рисунке 6.

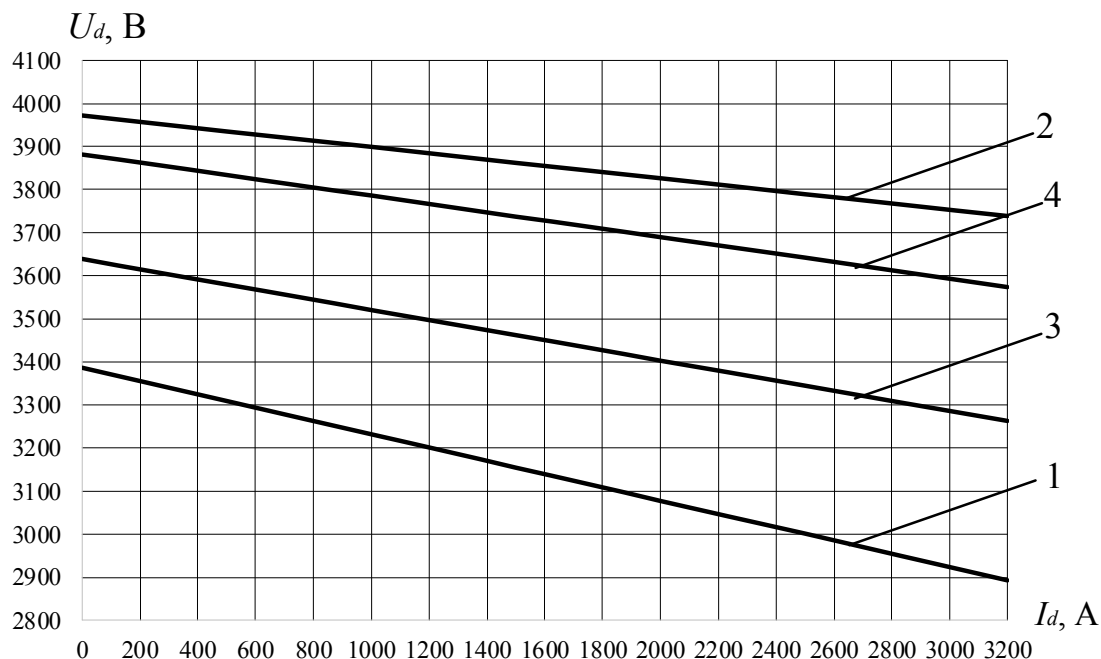


Рисунок 6 – Расчетные внешние характеристики ПА с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРДП-16000/10 при сопротивлении неуправляемого реактора, равном 2,75 Ом

Проверка расчета $\cos \varphi_{1cp}$ для решения задачи выбора рационального сопротивления неуправляемого реактора была также проведена на физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ, с 12-пульсовым выпрямительным блоком, с трансформатором мощностью 30 кВ·А и линейным первичным напряжением 380 В при сопротивлениях неуправляемого реактора, равных 2,4 и 2,8 Ом для внешних характеристик 3 и 4 (таблица).

Расчетные и экспериментальные значения $\cos \varphi_{1(1)cp}$ физической модели преобразовательного агрегата с ТРПУ

Сопротивление X_{HP} , Ом	Номер внешней характеристики ПА с ТРПУ	Значение $\cos \varphi_{1(1)cp}$, о. е.	
		расчетное	экспериментальное
2,4	3	0,938	0,932
	4	0,955	0,948
2,8	3	0,915	0,924
	4	0,93	0,938

Из анализа данных таблицы следует, что значения $\cos \varphi_{1cp}$ преобразовательного агрегата с ТРПУ, рассчитанные в соответствии с представленной методикой, отличаются от экспериментальных незначительно, погрешность составляет не более 2 %.

Таким образом, в соответствии с представленной методикой можно определить сопротивление НР, при котором обеспечивается наибольшее значение $\cos \varphi_{1cp}$ преобразовательного агрегата с ТРПУ при выбранном преобразовательном трансформаторе. Так, для преобразовательного агрегата с ТРПУ и преобразовательным трансформатором ТРДП-16000/10 рациональное сопротивление НР равно 2,75 Ом, при этом обеспечивается среднее значение $\cos \varphi_{1cp} = 0,917$ о. е.

Список литературы

1. Моченов, И. Г. Способы автоматического регулирования напряжения на тяговых подстанциях / И. Г. Моченов. – Текст : непосредственный // Электрическая и тепловозная тяга. – 1959. – № 6. – С. 50–61.
2. Моченов, И. Г. Результаты опытной эксплуатации устройств автоматического регулирования напряжения на подстанциях / И. Г. Моченов. – Текст : непосредственный // Тр. ин-та ЦНИИ МПС. – Вып. 250. – Москва : Трансжелдориздат, 1963. – С. 56–80.
3. Ветлугин, Е. М. Плавное регулирование напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой с помощью дросселей насыщения / Е. М. Ветлугин, Р. Н. Урманов. – Текст : непосредственный // Тр. Ин-та УЭМИИТ, 1962. – № 5. – С. 44–55.
4. Урманов, Р. Н. К теории регулирования напряжения трансформатора дросселями насыщения / Р. Н. Урманов, Е. М. Ветлугин. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Электромеханика. – 1965. – № 2. – С. 146–157.
5. А. с. № 419860 СССР. Регулятор напряжения : № 1775238 / 24-7 : заявлено 18.04.1972 : опубликовано 15.03.1974 / Вашкевич Е. И., Шапиро С. В. – 2 с. – Текст : непосредственный.
6. Пат. № 2613340 РФ. Устройство регулирования напряжения и способ его регулирования : № 2015135100/ 07 : заявлено 19.08.2015 : опубликовано 27.02.2017 / Аржанников Б. А., Низовцев К. А., Штин А. Н. – 5 с. – Текст : непосредственный.
7. Засорин, С. Н. Электронная и ионная техника : учебник / под ред. С. Н. Засорина. – Москва : Транспорт, 1969. – 376 с. – Текст : непосредственный.
8. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электрооборудования постоянного тока / Б. А. Аржанников, М. П. Бадер [и др.]. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2016. – № 9 (60). – С. 51–57.
9. Аржанников, Б. А. Устройства регулирования напряжения преобразовательных трансформаторов под нагрузкой : учебное пособие / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – 101 с. – Текст : непосредственный.
10. Тарасовский, Т. С. Тиристорно-реакторное устройство регулирования напряжения под нагрузкой РПН преобразовательного трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1 / Т. С. Тарасовский. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2017. – № 3 (54). – С. 87–91.
11. Фишлер, Я. Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я. Л. Фишлер, Р. Н. Урманов, Л. М. Пестряева. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 320 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Mochenov I. G. Methods of automatic voltage regulation at traction substations [Sposoby avtomaticheskogo regulirovaniia napriazheniia na tiagovykh podstantsiakh]. *Elektricheskaia i teplovoznaia tiaga – Electric and diesel traction*, 1959, no. 6, pp. 50–61.
2. Mochenov I. G. Results of experimental operation of automatic voltage regulation devices at substations [Rezultaty opytnoi ekspluatatsii ustroistv avtomaticheskogo regulirovaniia napriazheniia na podstantsiakh]. *Trudy instituta TsNII MPS – Proceedings of the Central Research Institute of MPS*, no. 250, Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1963, pp. 56–80.
3. Vetlugin E. M., Urmanov R. N. Smooth voltage regulation of power transformers under load using saturation chokes [Plavnoe regulirovanie napriazheniia silovykh transformatorov pod nagruzkoi s pomoshch'iu drosslei nasyshcheniia]. *Trudy instituta UEMIIIT – Proceedings of the UEMIT Institute*, 1962, no. 5, pp. 44–55.
4. Urmanov R. N., Vetlugin E. M. On the theory of transformer voltage regulation by saturation chokes [K teorii regulirovaniia napriazheniia transformatora drosseliami nasyshcheniia]. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika – News of universities. Electromechanics*, 1965, no. 2, pp. 146–157.
5. Vashkevich E. I., Shapiro S. V. Copyright certificate 419860 (USSR), 15.03.1974.
6. Arzhannikov B. A., Nizovtsev K. A., Shtin A. N. Patent RU 2613340, 27.02.2017.

7. Zasorin S. N. (ed.) *Elektronnaia i ionnaia tekhnika: uchebnik* (Electronic and ion technology: textbook). Moscow: Transport Publ., 1969, 376 p.

8. Arzhannikov B. A., Bader M. P. [et al.]. Improvement of the basic requirements for the system and devices of DC traction power supply [Sovershenstvovanie osnovnykh trebovaniy k sisteme i ustroystvam tiagovogo elektrosnabzheniya postoiannogo toka]. *Elektrotekhnika – Electrical engineering*, 2016, no. 9 (60), pp. 51–57.

9. Arzhannikov B. A. *Ustroystva regulirovaniia napriazheniia preobrazovatel'nykh transformatorov pod nagruzkoii: uchebnoe posobie* (Voltage regulation devices of converter transformers under load: textbook). Ekaterinburg: USURT Publ., 2017, 101 p.

10. Tarasovskii T. S. Thyristor-reactor voltage regulation device under load RPN converter transformer TRSZP-12500/10 ZHU1 [Tiristorno-reaktornoe ustroystvo regulirovaniia napriazheniia pod nagruzkoii RPN preobrazovatel'nogo transformatora TRSZP-12500/10 ZhU1]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2017, no. 3 (54), pp. 87–91.

11. Fishler Ia. L., Urmanov R. N., Pestrieva L. M. *Transformatornoe oborudovanie dlia preobrazovatel'nykh ustanovok* (Transformer equipment for conversion plants). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989, 320 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аржанников Борис Алексеевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

E-mail: BArzhannikov@usurt.ru

Баева Ирина Анатольевна

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

E-mail: IBaeva@usurt.ru

Тарасовский Тимофей Сергеевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7 (962) 317-12-60.

E-mail: tar-tima@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Аржанников, Б. А. Разработка методики расчета рационального сопротивления неуправляемого реактора тиристорно-реакторного устройства регулирования напряжения под нагрузкой на тяговых подстанциях / Б. А. Аржанников, И. А. Баева, Т. С. Тарасовский. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 40 – 52.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Arzhannikov Boris Alekseevich

Ural State University of Railway (USURT).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Transport power supply», USURT.

E-mail: BArzhannikov@usurt.ru

Baeva Irina Anatolevna

Ural State University of Railway (USURT).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, senior teacher of the department «Transport power supply», USURT.

E-mail: IBaeva@usurt.ru

Tarasovskiy Timofey Sergeevich

Ural State University of Railway (USURT).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Senior teacher of the department «Transport power supply», USURT.

Phone: +7 (962) 317-12-60.

E-mail: tar-tima@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Arzhannikov B. A., Baeva I. A., Tarasovskiy T. S. Development of a method for calculating the rational resistance of a non-controlled reactor of a thyristor-reactor device for voltage regulation under load at traction substations. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 40 – 52 (In Russian).

УДК 629.463.125+06

О. А. Ворон

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО «РГУПС»),
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИОГЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИННОВАЦИОННОГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы организации эксплуатации при использовании криогенных технологий для газотепловозов и изотермических вагонов (ИВов). Представлена структура перевозок скоропортящихся грузов (СПГ) по типам подвижного состава и видам грузов и особенности перевозок замороженной рыбы с Дальнего Востока в центральные районы страны. На примере их рассмотрения предложена новая структура типажа изотермического подвижного состава (ИПСа), включая различные типы одиночных ИВов, крупнотоннажные рефрижераторные контейнеры и съемные кузова. Предлагается для перспективных автономных рефрижераторных вагонов (АРВов) использовать блочно-модульный принцип формирования энергохолодильного оборудования. Выполнен обзор перспективных моделей АРВов, разработанных АО «НПК «Уралвагонзавод» и АО «Алтайвагон», готовых к серийному выпуску. Сформулированы факторы, которые должны быть приняты во внимание при создании инновационного изотермического подвижного состава.

Рассмотрены варианты использования криогенных технологий для автономного рефрижераторного вагона и одиночных ИВов. По результатам ранее проведенных эксплуатационных испытаний автономных жидкоазотных вагонов приведены их основные преимущества и возможные сферы использования.

Обоснованы технологические и технические решения по совершенствованию конструкции системы захлаждения грузового помещения для вагонов-термосов, охлаждаемых жидким азотом. Представлены расчетные характеристики по расходу жидкого азота при транспортировке замороженных грузов. Проанализированы преимущества использования экологичных жидкоазотных систем охлаждения и формализованы сферы использования криогенных технологий для ИПСа.

Неопределенность и стихийность рынка перевозок СПГ наряду с отсутствием крупного заказчика ставит перед вагоностроителями сложную задачу организации серийного производства изотермического подвижного состава с малыми объемами выпуска и различными техническими характеристиками. Поэтому при создании изотермических и рефрижераторных вагонов целесообразно сделать упор на единый универсальный вагонокомплект на базе изотермического кузова с возможностью трансформации его за счет использования различных вариантов энергохолодильного оборудования и ходовых частей.

Ключевые слова: криогенная технология, автономный изотермический вагон, автономный жидкоазотный вагон, расход жидкого азота, вагон-термос, холодильная установка, скоропортящийся груз, технические характеристики, экипажировка, железнодорожная инфраструктура.

Oleg A. Voron

Federal state budgetary educational establishment of higher professional education
«Rostov State Transport University», Rostov-on-Don, the Russian Federation

THE OPPORTUNITIES OF USING CRYOGENIC TECHNOLOGIES FOR INNOVATIVE ISOTHERMAL ROLLING STOCK

Abstract. The article deals with the organization of operation when using cryogenic technologies for gas locomotives and isothermal cars (IV). The structure of transportation of perishable goods (SPG) by types of rolling stock and types of cargo and the peculiarities of transportation of frozen fish from the Far East to the central regions of the country is presented. On the example of their consideration, a new structure of the type of isothermal rolling stock (IPS) is proposed, including various types of single isothermal cars, large-capacity refrigerated containers and swap bodies. It is proposed to use the block-modular principle of forming energy refrigeration equipment for promising autonomous refrigerated cars (ARC). A review of promising ARC models developed by UralVagonZavod and Altayvagon, ready for serial production, has been carried out. The factors that should be taken into account when creating an innovative isothermal rolling stock are formulated.

Variants of using cryogenic technologies for an autonomous refrigerator car and single insulated cars are considered. Based on the results of previously conducted operational tests of autonomous liquid nitrogen cars, the main their advantages and possible areas of use are given.

The technology and technical solutions for improving the design of the cooling system of the cargo space for thermos cars cooled with liquid nitrogen have been substantiated. The calculated characteristics of the consumption of liquid nitrogen during the transportation of frozen goods are presented. The advantages of using environmentally friendly liquid nitrogen cooling systems are analyzed and the areas of using cryogenic technologies for isothermal rolling stock are formalized.

Uncertainty and spontaneity of the perishable goods transportation market, along with the absence of a large customer, poses a difficult task for car builders to organize serial production of isothermal rolling stock with small production volumes and various technical characteristics. Therefore, when creating isothermal and refrigerator cars, it is advisable to focus on a single universal car kit based on an isothermal body with the possibility of transforming it by using various options for energy refrigeration equipment and chassis.

Keywords: cryogenic technology, autonomous isothermal car, autonomous liquid nitrogen car, liquid nitrogen consumption, thermos car, refrigeration unit, perishable cargo, technical characteristics, equipment, railway infrastructure.

В настоящее время в различных отраслях техники растёт потребление жидких продуктов разделения воздуха (кислород, азот, аргон) и начинают внедряться в различные сферы транспортных технологий технические решения, связанные с использованием сжиженного природного газа метана (СПГМ).

В Стратегии инновационного развития ОАО РЖД («Белая книга» ОАО «РЖД») предусматривается увеличение объемов потребления СПГМ в качестве моторного топлива на полигоне Свердловской железной дороги. В качестве перспективного полигона для использования железнодорожного транспорта на СПГМ определен участок Войновка – Новый Уренгой, протяженность которого составляет около 1500 км. Создание инфраструктуры СПГМ обеспечат ООО «Газпром газомоторное топливо» и совместное предприятие ООО «Газпром СПГ технологии» и АО «Уралкриомаш» [1, 2].

Использование сжиженного метана в качестве топлива для автомобильного транспорта закреплено в ГОСТ Р 56 217–2014.

Для подготовки железнодорожной инфраструктуры к эксплуатации тепловозов на СПГ создаются пункты экипировки магистральных газотепловозов. Заправка маневровых газотепловозов может осуществляться на территориях для экипировки тепловозов по принципу дозаправки дизельным топливом.

Перевозки скоропортящихся грузов по железным дорогам России и стран СНГ осуществляется преимущественно в вагонах-термосах с усиленной теплоизоляцией «сэндвич», переоборудованных изотермических вагонах-термосах, пятивагонных рефрижераторных секциях и в крупнотоннажных рефрижераторных контейнерах (КРК) [3, 11]. Автономные рефрижераторные вагоны (АРВы) с индивидуальным энергоснабжением не эксплуатируются и списаны уже более 20 лет назад. Усилившаяся конкуренция автомобильных перевозок СПГ сделала железнодорожные перевозки конкурентоспособными при протяженности маршрутов более 2 – 3 тыс. км, так как средняя суточная скорость движения изотермических вагонов составляет около 400 км/сут [4].

По данным Ассоциации операторов рефрижераторного подвижного состава (АСОРПС) и АО «Евросиб СПб-транспортные системы», структура перевозок СПГ по типам подвижного состава в 2020 г. представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структура железнодорожного рынка перевозок скоропортящихся грузов по типам подвижного состава в 2020 г.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

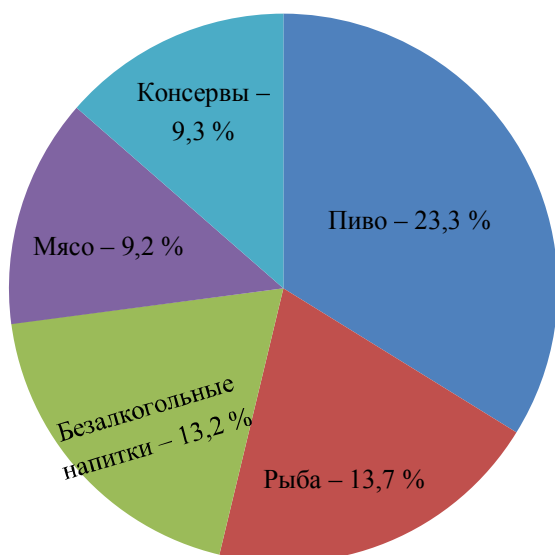


Рисунок 2 – Структура железнодорожного рынка перевозок скоропортящихся грузов по группе груза в 2020 г.

Среднегодовая потребность в использовании подвижного состава по типам показывает, что доля перевозок в рефрижераторных секциях снижается с каждым годом (списание по сроку службы) и составляет 3,6 %, в вагонах-термосах и ИВ-термосах – 28,1 %, в вагонах-термосах, переоборудованных из крытых вагонов, и в крытых вагонах – 37,5 %.

Главные направления перевозок в рефрижераторных секциях – из портов (Санкт-Петербург, Калининград, Владивосток) и таможенных терминалов (Москва) в центр страны.

Структура перевозок СПГ по их видам достаточно стабильна в течение последних лет и представлена на рисунке 2 [5].

Особенностью рынка является крайне узкая номенклатура перевозимых грузов, основную долю которых (68,9 %) составляют внутренние перевозки, а доля экспортных и импортных перевозок составляет соответственно 15,2 и 13,2 %.

На рынке перевозок грузов в рефрижераторных вагонах наблюдаются значительные отклонения в доходности различных направлений перевозок. Это связано с существованием кольцевых маршрутов, обеспечивающих минимальный порожний пробег, и маршрутов, не имеющих обратной загрузки [5]. Основные грузопотоки СПГ, перевозимых в рефсекциях, направлены из портов вглубь страны. Из рефрижераторных вагонов, прибывающих с продовольствием на Урал, около 90 % не имеют обратной загрузки, при перевозках в Сибирь 70 % вагонов не имеют обратной загрузки, обеспечение погрузки рефсекций на Калининградской железной дороге осуществляется полностью порожними вагонами [4].

Одним из стратегических продуктов питания для продовольственной безопасности страны является замороженная рыба, транспортировка которой носит сезонный характер, зависящий от объема вылова и реализации на внутреннем рынке рыбы на Дальнем Востоке [4]. На ее долю в 2020 г. приходилось 13,7 % общего объема перевозок СПГ. Особенностью логистики этой продукции является тот факт, что основные места ее производства расположены на Дальнем Востоке, а потребителями являются крупные города с населением более миллиона человек. Появление в графиках движения ускоренных рефрижераторных поездов (УРПов) с Дальневосточной железной дороги в европейскую часть России позволило значительно уменьшить время транспортировки. При скорости движения по маршруту более 1000 км/сут время доставки скоропортящейся продукции из Владивостока в Санкт-Петербург сократилось с 22 до 16 суток. До Москвы ускоренные рефрижераторные поезда следуют за 13 – 14 суток вместо 21 [4].

Структура перевозок СПГ, представленная на рисунке 2, показывает, что к лидерам по объему следует отнести две большие группы термосопригодной продукции – пиво (23,3 %) и безалкогольные напитки (13,2 %). Замороженная рыба (13,7 %) и мясо (9,2 %) хотя и находятся среди лидеров по объемам перевозок, но все же уступают этим напиткам. При этом следует учесть, что термосопригодные грузы могут транспортироваться в широком температурном диапазоне грузового помещения с минимальной вероятностью порчи при отклонении температур зимой (подморозка) или летом (перегрев). Замороженная мясная и рыбная продукция, имеющая существенно большую стоимость, требует поддержания в грузовом помещении температуры не менее -9°C . И если в зимний период времени риски исключены, то в переходные

и летний периоды года нарушение температурного режима приведет к дефростации и порче данных видов СПГ.

Из всего сказанного выше можно сделать вывод о том, что будущее ИПСа – это одиночные изотермические вагоны различного исполнения с различными типами систем термостабилизации грузового помещения.

При этом необходимо принимать во внимание следующие факторы.

1. Ужесточение международных требований СПС при перевозках СПГ приведет к более жесткому контролю температурного режима в вагонах-термосах различного исполнения.

2. В отправлениях будут преобладать малые партии различных видов СПГ, направляемых в адрес различных получателей, т. е. будет иметь место «распыление» потока, отгружаемого из мест массового производства.

3. Слишком малая доля СПГ (0,36 %) в общих объемах перевозок РЖД не способствует коммерческой заинтересованности в развитии этого вида перевозок и созданию инфраструктуры для его функционирования.

4. Неопределенность и стихийность рынка, постоянно подстраивающегося под экономические маневры ОАО «РЖД» (тарифы), и отсутствие крупного заказчика.

5. Для вагоностроителей серийное производство ИПСа будет иметь малые объемы и необходимость проведения НИОКР по каждому из типов выпускаемого ИПСа. Причем с точки зрения владельца железнодорожной инфраструктуры потребность по каждому типу ИПСа не ясна.

Предлагаемая структура перспективного ИПСа представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Предлагаемая структура парка подвижного состава для транспортировки СПГ

Технические решения, предлагаемые к использованию, можно разделить на две основные группы: концептуальные и локальные.

Концептуальные, определяющие основные технико-экономические параметры вагона:

при создании изотермических и рефрижераторных вагонов сделать упор на единый вагонокомплект на базе изотермического кузова с возможностью трансформации его в рамках одной модели вагона за счет использования различных вариантов энергохолодильного оборудования;

разработка или адаптация типажа ходовых частей для ИПСа и средств доставки КРК (фитинговых платформ и вагонов дизель-электростанций).

Локальные, улучшающие потребительские качества и расширяющие сферу их использования:

- источник энергоснабжения;
- тип холодильной машины;
- энергоэффективная конструкция теплоизоляции кузова и технология ее изготовления;
- телеметрические системы дистанционного управления и мониторинга.

В 2021 г. на фоне спада спроса на продукцию вагоностроения у ряда вагоностроительных заводов появились разработки рефрижераторных вагонов и контейнеров. Поэтому в настоящее время проходят сертификацию инновационные автономные рефрижераторные вагоны и готовится их выпуск. АО «НПК «Уралвагонзавод» провел сертификацию и уже презентовал АРВы модели 16-5213. Алтайский вагоностроительный завод среди перспективных разработок заявляет АРВы модели 16-2155. И если в первом случае потребителю предлагается на выбор два варианта автомобильных автономных компрессорных холодильных навесных агрегатов, то во втором случае выбор более широк [6]. Предлагается паровая компрессионная машина, система отопления на жидком топливе и криогенная жидкоазотная система охлаждения. Общий вид АРВа модели 16-2155 представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Общий вид АРВа модели 16-2155

Для повышения автономности работы АРВа на протяженном маршруте без дозаправки можно рассматривать комбинированную энергосиловую установку, в которой используются дизель-генераторный агрегат и подвагонный генератор.

В работах [4, 8] предлагается для перспективного АРВа использовать блочно-модульный принцип формирования энергохолодильного оборудования. Важными критериями при выборе вариантов систем энергоснабжения АРВа являются массогабаритные ограничения установки, поэтому размещение больших запасов топлива весьма проблематично ввиду существен-

ного сокращения полезного объема и снижения грузоподъемности [8]. При этом основным источником электроэнергии является дизель-генераторная установка, а в качестве дополнительного источника электроэнергии при движении вагона со скоростью 700 – 1000 км/сут предполагается использовать вентильно-индукторный подвагонный генератор, установленный на тележке типа КВЗ-И2 [7].

Применение двух источников энергоснабжения позволит увеличить автономность перспективного рефрижераторного вагона, сократить расход горюче-смазочных материалов за счет уменьшения времени работы дизель-генератора и, тем самым, повысить его экономическую эффективность.

Другим направлением развития для одиночного ИПСа может быть использование автономного жидкоазотного вагона (АЖВа), использующего жидкий азот в качестве расходуемого хладагента.

Следует отметить, что опытная эксплуатация автономных жидкоазотных вагонов уже проводилась в 90-е гг. на Среднеазиатском (силами НИИЖТа) и Северо-Кавказском (силами РГУПС) направлениях [3, 9].

Для определения экономической целесообразности использования АЖВов при перевозках СПГ была выпущена их опытная партия, которая проходила опытную эксплуатацию на

сети дорог. В процессе выполнения работ были осуществлены опытные перевозки яблок летних и зимних сортов созревания, свежей капусты ранних сроков созревания, сливы, томатов, перца сладкого, копченых колбас. По результатам эксплуатационных испытаний было сформулировано следующее заключение:

автономные жидкоазотные вагоны имеют более простую конструкцию системы охлаждения и распределения термообработанной газовой смеси, что повышает их эксплуатационную надежность;

транспортировка свежей плодоовощной продукции в атмосфере с повышенным содержанием азота позволяет сократить транспортные потери и снизить нормы естественной убыли при лучшей сохранности товарных и потребительских качеств данной продукции;

режим термостатирования для плодоовощей, перевозимых в АЖВах, может быть повышен на несколько градусов по сравнению с температурным режимом, устанавливаемым Правилами перевозок грузов, что позволяет сократить часовой расход жидкого азота.

Расход жидкого азота на захлаживание свежей плодоовощной продукции составляет около 4 т на вагон, величина расхода хладагента на поддержание температурного режима в грузовом помещении лежит в пределах 300 – 500 кг в сутки. Поэтому необходимость размещения в вагоне значительного количества азота уменьшает грузоподъемность вагона на 5 – 6 т по сравнению с традиционными рефрижераторными вагонами, имеющими паровую компрессионную машину.

Расчетный график зависимости расхода жидкого азота от времени при перевозках замороженных грузов представлен на рисунке 5.

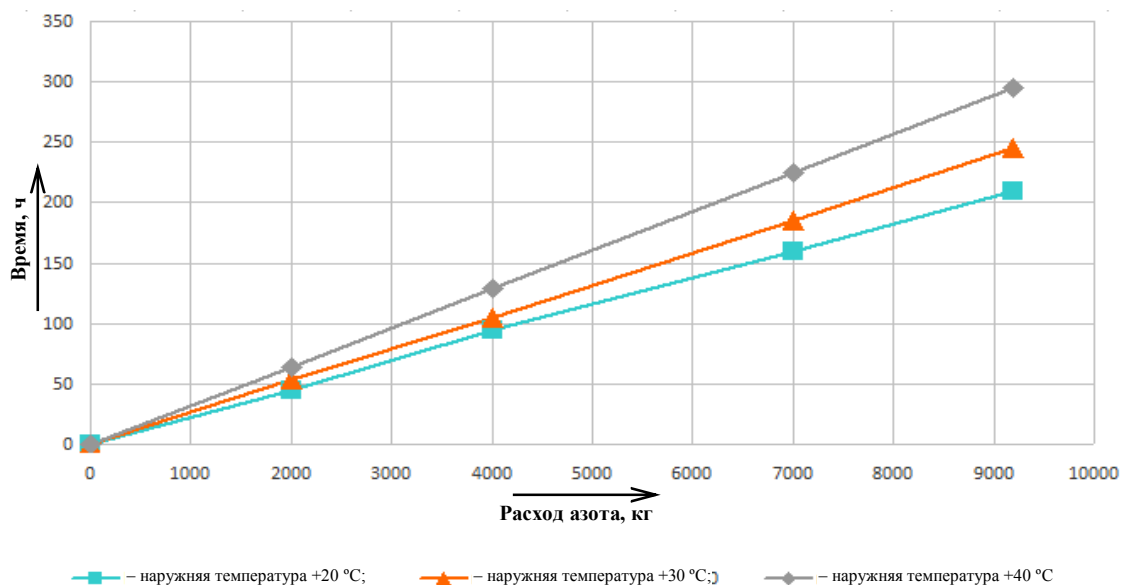


Рисунок 5 – Расчетный график расхода жидкого азота при перевозках замороженных грузов [9]

Хотя результаты опытных перевозок подтвердили положительный эффект и лучшую сохранность перевозимых СПГ, особенно явно это проявлялось при перевозках плодоовощной продукции, но экономические и политические события в 90-е гг. прошлого века привели к повышению цен на электроэнергию и, как следствие, на жидкий азот, что сделало АЖВы неконкурентоспособными на транспортном рынке. Анализ графика с расходом жидкого азота за время перевозки позволяет определить, какие бортовые запасы хладагента должны быть израсходованы за расчетный период времени.

Кроме этого рассматриваются проекты модернизации вагонов-термосов, в которых можно будет осуществлять дополнительное охлаждение груза в грузовом помещении вагона за счет подачи жидкого азота.

В рабочем парке АО «Рефсервис» и некоторых других владельцев имеются вагоны-термосы типа ТН4-201 постройки Германии, которым продлен срок полезного использования.

Эти вагоны предназначены для транспортировки термически подготовленных грузов широкой номенклатуры. Транспортные компании, имеющих парк собственных вагонов-термосов этой модели, проявляет интерес к транспортировке замороженной продукции на дальние расстояния – в районы Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока. Действующие Правила перевозок устанавливают срок доставки для этого вида продуктов в летний период восемь суток, а в зимний период он ограничивается 17 сутками. Существующие сроки доставки не позволяют осуществлять перевозки по этим маршрутам даже в зимнее время. Для сохранения качества перевозимой продукции требуется поддержание температурного режима холодильной машины либо понижение температуры груза до нижнего допустимого предела замораживанием в стационарных холодильниках. Очевидно, что отсутствие в вагоне-термосе холодильной машины не позволит регулировать температурный режим грузового помещения. Замораживание в холодильниках связано со значительным объемом погрузочно-выгрузочных работ и большой продолжительностью охлаждения. Однако отсутствие мощных станций по захолаживанию груза существенно ограничивает полигон и период использования вагона. Одним из главных условий, делающих эту технологию целесообразной, является высокая скорость захолаживания груза без выгрузки его из вагона. Это можно реализовать при использовании охлаждения сжиженными газами. Например, при использовании жидкого азота в качестве хладагента появляется возможность снизить температуру груза за короткое время до нижнего допустимого предела и после этого продолжить транспортировку без дополнительного охлаждения и перегрузки вагона.

Увеличение продолжительности маршрутов применения вагонов-термосов и повышение сохранности перевозимых скоропортящихся грузов в переходный период могут быть достигнуты за счет дополнительного охлаждения груза в вагоне. Для этого предлагается оснастить вагоны-термосы устройствами для подачи жидкого азота в грузовое помещение в виде распределительного коллектора и системой газосброса. Технология эксплуатации таких модернизированных вагонов следующая.

1. При перевозках замороженных грузов на значительные расстояния, когда срок транспортировки не позволяет использовать вагон-термос на данном маршруте для данного вида замороженного груза, определяется граничное, допускаемое расстояние перевозки, определенное в соответствии с действующими правилами.

2. На границе этого участка оборудуется стационарный пункт для захолаживания груза в вагоне за счет подачи в его грузовое помещение жидкого азота. Для этого на сортировочной станции в непосредственной близости от специальных путей устанавливаются транспортные криогенные резервуары. В общем виде эта операция подобна экипировке льдом на льдозаводах и льдопунктах вагонов-ледников, эксплуатировавшихся до 80-х гг. прошлого века.

3. Вагон-термос, требующий захолаживания, после роспуска с сортировочной горки подается на специальный путь, где через соединительные фланцы к патрубкам распределительного коллектора через криогенные шланги подключается к стационарной криогенной цистерне.

4. Криогенная цистерна приводится в рабочее положение «Выдача азота», и по штатным приборам вагона контролируется температура и давление в грузовом помещении. При этом особое внимание следует уделять визуальному контролю выхода отработанных паров азота из грузового помещения через специальные выпуски.

5. Расход жидкого азота определяется в зависимости от теплофизических характеристик и вида перевозимого замороженного груза, температуры наружного воздуха и температуры груза внутри верхнего ряда штабеля.

6. После достижения требуемых параметров температуры подача жидкого азота из сторонней криогенной емкости прекращается и криошланги отключаются. Заправочный штуцер и патрубок сброса избыточного давления заглушаются специальными пробками. После этого вагон готов к дальнейшей транспортировке [10].

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В развитие криогенных технологий АО «Линде Газ Рус» представило в ОАО «РЖД» материалы о возможности нового развития сервисной и экипировочной инфраструктуры при эксплуатации автономных вагонов с жидкоазотным охлаждением уже на новой технической базе.

Использование новой технологии криогенных резервуаров позволит улучшить такие технико-экономические параметры вагона, как грузоподъемность и полезный объем.

Неопределенность и стихийность рынка перевозок СПГ наряду с отсутствием крупного заказчика ставит перед вагоностроителями сложную задачу организации серийного производства ИПСа с малыми объемами выпуска и различными техническими параметрами. Причем потребность по каждому типу ИПСа не ясна. Поэтому при создании изотермических и рефрижераторных вагонов целесообразно сделать упор на единый универсальный вагонокомплект на базе изотермического кузова с возможностью трансформации его за счет использования различных вариантов энергохолодильного оборудования и ходовых частей. В этой связи для создания инновационного ИПСа применение криогенных технологий возможно для трех его вариантов:

автономного рефрижераторного вагона с дизель-генератором, использующим СПГМ в качестве моторного топлива;

автономного жидкоазотного вагона, использующего жидкий азот в качестве расходуемого хладагента;

модернизированного вагона-термоса с усиленной теплоизоляцией типа «сэндвич» со смонтированной в грузовом помещении системой подачи и распределения жидкого азота, подаваемого от стационарной криогенной емкости, в режиме захолаживания замороженного груза.

Предлагаемые варианты применения экологически чистых криогенных технологий потребуют реализации комплекса мер в части совершенствования имеющейся и потребной стационарной инфраструктуры, необходимой для перевозок СПГ (стационарных холодильников с подъездными железнодорожными путями, пунктов экипировки и технического обслуживания ИПСа, а также современных технологий перевозки – скоростные контейнерные и рефрижераторные «холодные» поезда.

Список литературы

1. Использование сжиженного природного газа на железнодорожном транспорте // www.rzd-expo.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL : <http://www.rzd-expo.ru/innovation/stock/ispolzovanie-szhizhennogo-prirodnogo-gaza-na-zheleznodorozhnom-transporte/> (дата обращения: 15.05.2021).

2. Матяш, Ю. И. Хладотранспорт и основы теплотехники : монография / Ю. И. Матяш, В. П. Ключа, О. А. Ворон, С. Н. Наumenko. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. – 360 с. – Текст : непосредственный.

3. Ворон, О. А. Аспекты совершенствования железнодорожных перевозок скоропортящихся грузов в составе непрерывной холодильной цепи / О. А. Ворон, И. Г. Морчиладзе. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 1 (50). – С. 24–29.

4. Рефперевозки. Чего ждёт рыба? : fishnet.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL : http://www.fishnet.ru/news/novosti_otrasli/90020.html (дата обращения: 13.07.2021).

5. Международный транзит // rzdlog.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL : https://www.rzdlog.ru/services/main/international_transit (дата обращения: 30.06.2021).

6. Mamaev E. A., Guda A. N., Levin B. A., Baginova V. V., Vinogradov V. V., Morozov V. N. Strategic Trends of Cargo Turnover in Major Hubs: Assessment, Clustering and Prediction, *International Journal of Economic Perspectives*, 2017, vol. 11, issue 2.

7. Продукция: вагоностроение // altaivagon.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL : http://altaivagon.ru/product_main#product_vagonhttp (дата обращения: 30.06.2021).

8. Voron O. A., Bulavin Y. P., Volkov I. V. Modelling the dynamics of an undercar generator with a v-belt drive of an isothermal railway vehicle, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 709 (2020), 033094.

9. Ворон, О. А. Использование сжиженного природного газа в комбинированной энерго-силовой установке автономного рефрижераторного вагона / О. А. Ворон. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2019. – Т. 78. – № 3. – С. 188–192.

10. Временная инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию опытных вагонов с жидкоазотным охлаждением №543-89 ПКБ ЦВ. – Москва : Транспорт, 1989. – 36 с. – Текст : непосредственный.

11. Ворон, О. А. Особенности оценки прочности металлоконструкции кузова изотермического вагона, охлаждаемого жидким азотом / О. А. Ворон, Е. А. Василькова. – Текст : непосредственный // Транспорт : наука, образование, производство : сб. науч. тр. – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – Т. 3. Технические науки. – С. 266–269.

References

1. *Ispolzovaniye szhizhennogo prirodnogo gaza na zheleznodorozhnom transporte* (The use of liquefied natural gas in railway transport), Available at: <http://www.rzd-expo.ru/innovation/stock/ispolzovanie-szhizhennogo-prirodnogo-gaza-na-zheleznodorozhnom-transporte/> (accessed 15 May 2021).

2. Matiash Iu. I., Kliuka V. P., Voron O. A., Naumenko S. N. *Khladotransport i osnovy teplotekhniki: monografiia* (Hladotransport and fundamentals of heat engineering: monograph). Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2019, 360 p.

3. Voron O. A., Morchiladze I. G. Aspects of improving the rail transportation of perishable goods as part of a continuous cold chain [Aspekty sovershenstvovaniya zheleznodorozhnykh perevozok skoropertyashchikhsya грузов v sostave nepreryvnoy kholodilnoy tsepi]. *Transport Rossiiskoi Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2014, no. 1 (50), pp. 24–29.

4. *Refperevozki. Chego zhdet ryba?* (Refrigerated transportation. What is the fish waiting for?), Available at: http://www.fishnet.ru/news/novosti_otrasli/90020.html (accessed 13 July 2021)

5. *Mezhdunarodnyy tranzit* (International transit), Available at: https://www.rzdlog.ru/services/main/international_transit (accessed 30 June 2021).

6. Mamaev E. A., Guda A. N., Levin B. A., Baginova V. V., Vinogradov V. V., Morozov V. N. Strategic Trends of Cargo Turnover in Major Hubs: Assessment, Clustering and Prediction, *International Journal of Economic Perspectives*, 2017, vol. 11, issue 2.

7. *Produktsiya: vagonostroyeniye* (Products: car building), Available at: http://ataivagon.ru/product_main#product_vagonhttp (accessed 30 June 2021).

8. Voron O. A., Bulavin Y. P., Volkov I. V. Modelling the dynamics of an undercar generator with a v-belt drive of an isothermal railway vehicle, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 709 (2020), 033094.

9. Voron. O.A. Use of liquefied natural gas in a combined power plant of an autonomous refrigerator car [Ispolzovaniye szhizhennogo prirodnogo gaza v kombinirovannoy energosilovoy ustanovke avtonomnogo refrizheratornogo vagona]. *Vestnik VNIIZhTa – Bulletin of VNIIZHT*, 2019, vol. 78, no. 3, pp. 188–192.

10. *Vremennaya instruktsiya po ekspluatatsii i tekhnicheskemu obsluzhivaniyu opytnykh vagonov s zhidkoazotnym okhlazhdeniyem №543-89 PKB TsV* (Temporary instructions for the operation and maintenance of experimental cars with liquid-nitrogen cooling No. 543-89 PCB CV). Moscow, Transport Publ., 1989, 36 p.

11. Voron O. A., Vasilkova E. A. Features of assessing the strength of the metal structure of the body of an isothermal car cooled with liquid nitrogen [Osobennosti otsenki prochnosti metallokonstruktsii kuzova izotermicheskogo vagona, okhlazhdaemogo zhidkim azotom]. *Transport: nauka,*

obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov (Transport: science, education, production: collection of scientific papers). – Rostov-on-Don, 2019, vol. 3. Technical sciences, pp. 266–269.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ворон Олег Андреевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство», РГУПС.

Тел.: +7 (928) 279-08-53.

E-mail: rgups_voron@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Voron Oleg Andreyevich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya square, Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, chief of the department «Car and car facilities», RSTU.

Phone: +7 (928) 279-08-53.

E-mail: rgups_voron@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ворон, О. А. Возможности использования криогенных технологий для инновационного изотермического подвижного состава / О. А. Ворон. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 53 – 62.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Voron O. A. The opportunities of using cryogenic technologies for innovative isothermal rolling stock. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 2 (46), pp. 53 – 62 (In Russian).

УДК 621.332.3

А. Н. Смердин, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков, А. С. Голубков

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

РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ В РАБОТЕ СИСТЕМЫ ТОКОСЪЕМА ВСЛЕДСТВИЕ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОВОДАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Аннотация. В статье рассмотрены критерии, используемые для расчета вероятности возникновения отказов устройств системы токосъема по причине гололедно-изморозевых отложений на контактной подвеске. Целью работы является определение влияния климатических и эксплуатационных факторов (в т. ч. количество вибропантографов, пневмобарабанов на электровозах в границах дирекции по энергообеспечению и устройств для механической очистки гололеда в дистанциях электроснабжения) на вероятность наступления отказов системы токосъема и их тяжести, что позволит повысить надежность работы устройств тягового электрооборудования в условиях гололедообразования и эффективность капиталовложений Трансэнерго и Дирекции тяги при приобретении указанных средств. Для определения вероятности возникновения отказов устройств токосъема вследствие образования гололеда на проводах контактной сети предложено разделение всех факторов на климатические и эксплуатационные. Выбор факторов при прогнозировании отказов проведен с помощью вероятностной сети Байеса на основе статистических методов обработки данных, а также корреляционного и регрессионного анализа. В результате проведенных исследований определены факторы, оказывающие влияние на вероятность возникновения отказов устройств токосъема, выполнена оценка их значимости с помощью рассчитанных дисперсий. Приведена методика расчета вероятности возникновения отказов для условной дистанции электроснабжения, позволяющая оценить достаточность оснащенности подразделений Трансэнерго и Дирекции тяги устройствами для механической очистки гололеда с контактного провода, вибропантографами и пневмобарабанами.

Ключевые слова: контактная сеть, гололед, вероятность отказа, устройство удаления гололеда, фактор, децильный коэффициент, сеть Байеса, дисперсия.

Alexander N. Smerdin, Alexander V. Tarasenko, Ivan E. Chertkov, Anton S. Golubkov

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

DEVELOPMENT OF A PROBABLE FAILURE PREDICTION MODEL IN THE OPERATION OF THE CURRENT COLLECTION SYSTEM DUE TO ICE FORMATION ON THE WIRES OF THE CONTACT NETWORK

Abstract. The article discusses the criteria used to calculate the probability of failures of devices of the current collection system due to ice and frost deposits on a catenary. The purpose of the work is to determine the influence of climatic and operational factors (including the number of vibrating pantographs, pneumatic drums on electric locomotives within the boundaries of the Directorate for power supply and devices for mechanical cleaning of ice at power supply distances) on the probability of the occurrence of failures of the current collection system and their severity, which will allow to increase the reliability of operation of traction power supply devices in conditions of ice formation and the efficiency of investments by Transenergo and the Traction Directorate for the purchase of these funds. To determine the likelihood of failures of current collection devices due to the formation of ice on the wires of the contact network, it is proposed to divide all factors into climatic and operational. The choice of factors in predicting failures was carried out using a probabilistic Bayesian network based on statistical methods of data processing, as well as correlation and regression analysis. As a result of the research, the factors influencing the likelihood of failures of current collection devices have been determined, and their significance has been assessed using the calculated variances. A method is given for calculating the probability of failure for a conditional distance of power supply, which makes it possible to assess the adequacy of the equipment of Transenergo and Traction Directorates with devices for mechanical cleaning of ice from a contact wire, vibropantographs and pneumatic drums.

Keywords: contact network, ice, probability of failure, device for removing ice, factor, decile coefficient, Bayesian network, variance.

Гололедные образования, обычно наблюдаемые во время смены оттепели похолоданием при температурах, незначительно отличающихся от нуля, во время туманов или при дождях, когда температура воздуха ниже нуля, значительно усложняют работу контактной сети и процесс токосъема [1]. Наличие гололеда на контактных проводах ухудшает, а иногда и прерывает контакт между ними и полозами токоприемников, так как ледяная корка имеет очень низкую электрическую проводимость. В ряде случаев образуется электрическая дуга, которая повреждает контактные поверхности токосъемных устройств, вызывает отжиг и пережог контактных проводов, их обрыв. Образование гололеда увеличивает нагрузку на провода, что при полукompенсированных подвесках приводит к значительному увеличению натяжения несущих тросов, а при компенсированных вызывает большие стрелы провеса всех проводов. Указанные обстоятельства определяют актуальность проблемы удаления гололеда с проводов контактной сети.

Основными способами борьбы с гололедом на проводах контактной подвески являются электрический (плавка гололеда и профилактический подогрев проводов), химический (нанесение противогололедных смазок [2]), механический (использование устройств для механической очистки гололеда (МОГ), вибропантографов, пневмобарабанов) и ручной (при помощи изолированных штанг и шестов).

Анализ отказов технических средств подразделений Трансэнерго за 2018 – 2020 гг. показал, что количество отказов устройств электроснабжения, в том числе и устройств контактной сети, в результате возникновения гололеда продолжает оставаться на высоком уровне. Отказы устройств электроснабжения, как правило, приводят к возникновению перерыва электроснабжения тяги поездов и их задержкам, что свидетельствует о необходимости повышения эффективности мер по предотвращению гололедообразования на проводах контактной сети и токоприемниках электроподвижного состава.

Недостаточное количество или, наоборот, наличие излишних (неиспользуемых) МОГ в районах контактной сети, вибропантографов/пневмобарабанов, устанавливаемых на подвижном составе, и отсутствие соответствующей методики, определяющей необходимое коли-

чество указанных устройств удаления гололеда, создают предпосылки для возникновения экономического ущерба ОАО «РЖД», обусловленного их неэффективным использованием.

Выбор факторов для определения вероятности возникновения отказов устройств токосъема является сложной задачей, что обусловлено следующими особенностями:

размерность расчетной модели. С добавлением каждой новой переменной в модель увеличивается ее размерность в пространстве данных, что влечет за собой усложнение работы модели и в конечном итоге может привести к необходимости использования более мощных вычислительных мощностей или к ухудшению ее работы;

внутренние зависимости между переменными. Оценка степени влияния переменных на целевые значения является сложной задачей, которая связана с внутренней взаимосвязью двух и более факторов между собой. Наличие такой взаимосвязи может лучше характеризовать исследуемый процесс, чем каждая переменная по отдельности. Поэтому исключение малоинформативной переменной может существенно ухудшить качество работы всей модели;

избыточность переменных. Являясь независимыми переменными, предикторы, описывающие вероятность отказов вследствие образования гололеда, могут содержать в себе дублирующую информацию о закономерностях процесса. Переменные, имеющие высокую степень корреляции, необходимо объединить с целью уменьшения размерности всей модели.

В связи со сказанным выше набор переменных в расчетной модели должен быть минимален при наиболее полном описании исследуемого процесса.

Для определения вероятности возникновения отказов устройств токосъема вследствие образования гололеда на проводах контактной сети все факторы первоначально были разделены на две основные группы:

климатические (районирование по гололеду/ветру/температуре, относительная влажность воздуха, атмосферное давление, количество выпавших осадков, толщина стенки гололеда, среднее количество дней с образованием гололеда и др.);

эксплуатационные (эксплуатационная и развернутая длина электрифицированных участков по роду тока и числу путей, классность участков, количество путей, анкерные участки, длина участков контактной сети, оборудованных схемами плавки гололеда и профилактического подогрева контактных проводов и др.).

Информация по климатическим условиям структурных подразделений Трансэнерго определяется по нормативно-справочной литературе [3, 4] и уточняется с использованием карт районирования территории Российской Федерации по климатическим характеристикам [5]. Для выбора параметров окружающей среды, при которых вероятно образование гололеда, их изменения в районах структурных подразделений Трансэнерго и Дирекции тяги, а также для определения среднего количества дней с образованием гололеда можно воспользоваться данными метеостанций и метеодатчиков Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета). Данные метеостанций содержат более 25 параметров, включающих в себя информацию о температуре окружающей среды, атмосферном давлении, влажности воздуха, ветре, облачности, величине снежного покрова и др. Однако не все метеорологические явления оказывают влияние на образование гололедно-изморозевых отложений на проводах контактной подвески. Кроме того, анализ данных различных метеостанций, расположенных в границах участков железных дорог, показал, что не на всех метеостанциях и не всегда ведется подробный и точный учет перечисленных выше параметров, в том числе связанных с образованием гололедно-изморозевых отложений, что затрудняет их использование. В этом случае определение среднего количества дней с образованием гололеда целесообразно производить с помощью математического моделирования.

Эксплуатационные факторы дистанций электроснабжения принимаются на основании формы статистической отчетности АГО-9 по дистанциям электроснабжения Трансэнерго ОАО «РЖД». Оснащенность подразделений Трансэнерго и Дирекции тяги техническими средствами для удаления гололеда определяются на основании актуальной «Справки о наличии

средств борьбы с гололедом и объезда контактной сети с повышенным нажатием токоприемника».

Количество климатических и эксплуатационных факторов дистанций электроснабжения получается значительным (более 70), при этом некоторые, по сути, дублируют друг друга. Для сокращения рассматриваемых факторов был проведен их попарный корреляционный анализ, задачей которого являлось выявление характера и взаимосвязей между различными показателями.

Оценка тесноты (силы) корреляционной связи осуществлялась по шкале Чеддока. С целью сокращения количества учитываемых переменных в дальнейших расчетах учитывались лишь те, которые имеют низкий коэффициент корреляции.

При оценке взаимосвязей между различными переменными использовался линейный коэффициент корреляции Пирсона [6, 7]. В результате проведенного попарного корреляционного анализа количество климатических и эксплуатационных факторов, оказывающих влияние на вероятность возникновения отказов устройств токосъема, сократилось до 23.

Дальнейшая работа по оптимизации климатических и эксплуатационных факторов проводилась с помощью вероятностной сети Байеса. Основными причинами использования байесовских сетей для моделирования отказов являются возможность простой причинно-следственной интерпретации структуры сети и явное представление влияющих факторов.

Исследования в области применения байесовских сетей для прогнозирования отказов устройств железнодорожной инфраструктуры [8 – 10] показали перспективность использования данного метода.

В разработанной модели в качестве входных параметров кроме погодных факторов использовались также данные об отказах технических средств и особенностях их эксплуатации. Результатом работы модели является вероятность возникновения (прогноз) отказа отдельных элементов или подсистем в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

Графическая структура разработанной байесовской сети представляет собой ациклический направленный граф $G = (V, A)$, где V – множество вершин графа и A – множество ребер. Граф определяет факторизацию совместного распределения вероятностей $V = \{X_1, X_2, \dots, X_v\}$ событий, учтенных моделью. Форма факторизации определялась в соответствии с Марковским свойством байесовской сети, которое утверждает, что случайная переменная X_i зависит только от своих прямых родительских переменных:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_v) = \prod_{i=1}^v P(X_i | \prod_{x_i} x_i). \quad (1)$$

Для обучения общей байесовской сети использована информация об отказах устройств токосъема из-за возникновения гололеда. Для удобства интерпретации полученных результатов использовано понятие «дециль» (одна десятая часть) и приняты обозначения децильных коэффициентов для распределения возможных вариантов исхода (таблица 1).

Таблица 1 – Децильные коэффициенты возможных вариантов исхода моделирования

Децильный коэффициент	Вероятность отсутствия или появления отказов устройств токосъема
1	Вероятность того, что в течение года отказы отсутствуют
2	Вероятность возникновения одного отказа в течение года
3 – 10	Сумма вероятностей возникновения двух и более отказов в течение года

Результаты моделирования общей байесовской сети показали, что ряд факторов, оставшихся после попарного корреляционного анализа, не оказывают влияния на вероятность возникновения отказов устройств токосъема, что позволяет не учитывать их в дальнейших расчетах. Для остальных факторов характерна низкая степень корреляции, и в дальнейшем данные факторы принимаются неизменными. С учетом принятого допущения о независимости влияющих факторов целесообразно воспользоваться «наивной» байесовской сетью (рисунок). Выделенные на рисунке факторы в расчетах принимаются неизменными.

«Наивные» методы Байеса [11, 12] представляют собой набор алгоритмов контролируемого обучения, основанных на применении теоремы Байеса с «наивным» предположением об условной независимости между каждой парой характеристик при заданном значении переменной класса. Теорема Байеса утверждает следующее отношение, учитывая переменную класса y и зависимый вектор признаков x_1 через x_n :

$$P(y | x_1, \dots, x_n) = \frac{P(y)P(x_1, \dots, x_n | y)}{P(x_1, \dots, x_n)}. \quad (2)$$

Используя «наивное» предположение об условной независимости

$$P(x_i | y, x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) = P(x_i | y), \quad (3)$$

для всех i , это отношение можно упростить до

$$P(y | x_1, \dots, x_n) = \frac{P(y) \prod_{i=1}^n P(x_i | y)}{P(x_1, \dots, x_n)}. \quad (4)$$

Так как в выражении (4) $P(x_1, \dots, x_n)$ является константой, с учетом входных данных можно использовать следующее правило классификации:

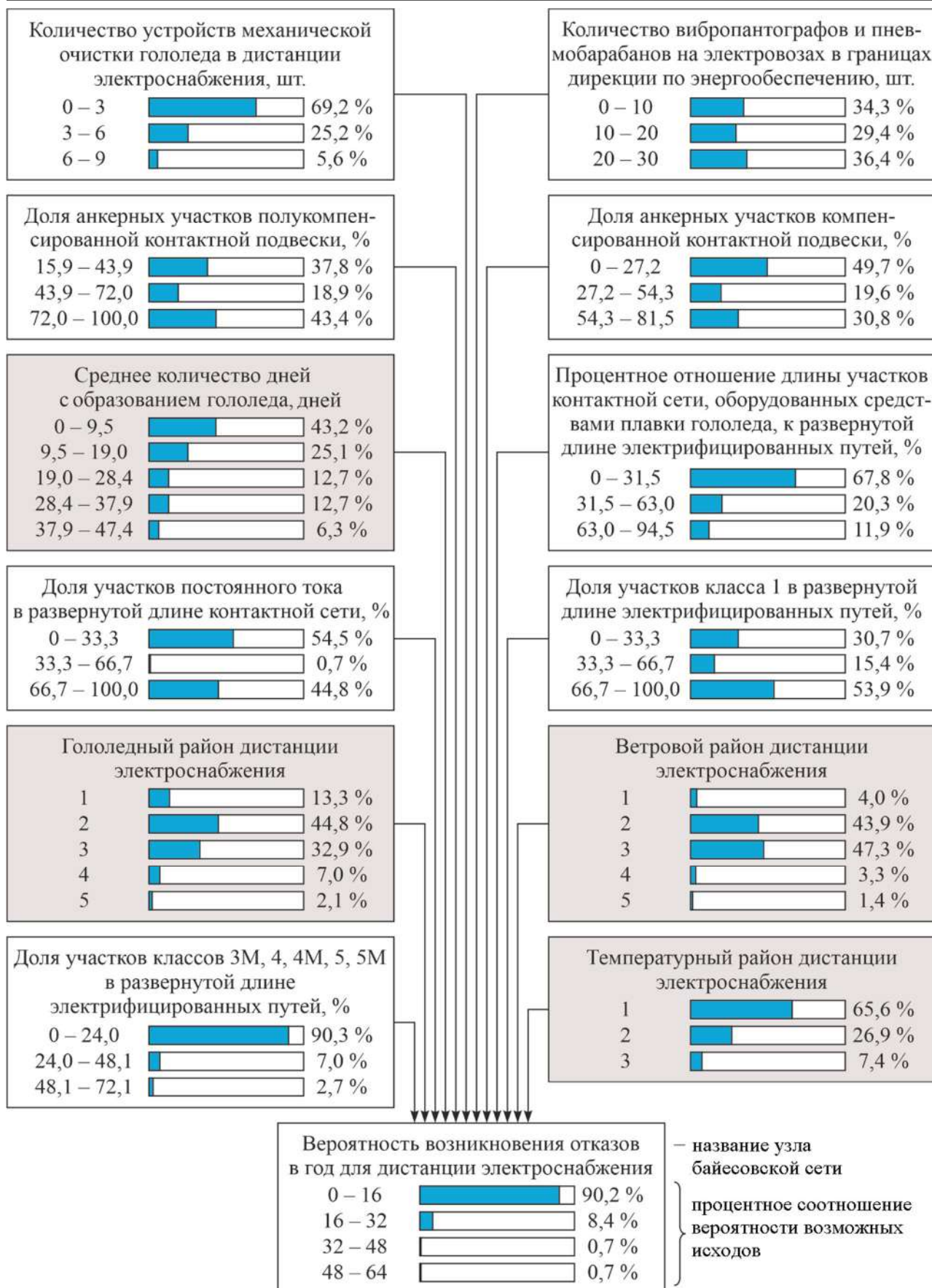
$$\begin{aligned} P(y | x_1, \dots, x_n) \propto P(y) \prod_{i=1}^n P(x_i | y) \\ \Downarrow \\ \hat{y} = \arg \max_y P(y) \prod_{i=1}^n P(x_i | y). \end{aligned} \quad (5)$$

«Наивные» байесовские классификаторы различаются в основном предположениями, которые они делают относительно распределения $P(x_i | y)$.

В результате проведенных исследований выявлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на вероятность возникновения отказов устройств токосъема, являются следующие:

- 1) доля участков класса 1 в развернутой длине электрифицированных путей, %;
- 2) доля участков классов 3М, 4, 4М, 5, 5М в развернутой длине электрифицированных путей, %;
- 3) доля участков постоянного тока в развернутой длине контактной сети, %;
- 4) доля анкерных участков компенсированной контактной подвески, %;
- 5) доля анкерных участков полукомпенсированной контактной подвески, %;
- 6) гололедный район дистанции электроснабжения;
- 7) ветровой район дистанции электроснабжения;
- 8) температурный район дистанции электроснабжения;
- 9) процентное отношение длины участков контактной сети, оборудованных средствами плавки гололеда (по данным автоматизированной системы учета, контроля и анализа подготовки и работы холдинга ОАО «РЖД» к работе в зимний период АС «Зима»), к развернутой длине электрифицированных путей из формы АГО-9, %;
- 10) количество устройств механической очистки гололеда в дистанции электроснабжения, шт.;
- 11) количество вибропантографов и пневмобарабанов на электровозах в границах дирекции по энергообеспечению, шт.;
- 12) среднее количество дней с образованием гололеда, дней.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Структура «наивной» байесовской сети для определения вероятности появления отказов устройств токосъема

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для выбранных факторов рассчитаны дисперсии (вариативность) переменных, которые позволяют оценить отклонение исследуемой величины от ее среднего значения (таблица 2): чем меньше дисперсия рассматриваемого фактора, тем меньше его отклонение от среднего значения и, следовательно, большее влияние этот фактор оказывает на вероятность появления отказа. В таблице 2 факторы с существенным влиянием показаны красным цветом, с незначительным – зеленым. Для удобства сравнения значения дисперсий представлены в относительных единицах.

Таблица 2 – Дисперсия переменных по степени их влияния на вероятность появления отказа

Наименование фактора	Дисперсия по децильным коэффициентам		
	1	2	3 – 10
Доля участков класса 1 в развернутой длине электрифицированных путей	0,153	0,204	0,038
Доля участков классов 3М, 4, 4М, 5, 5М в развернутой длине электрифицированных путей	0,028	0,041	0,001
Доля участков постоянного тока в развернутой длине контактной сети	0,226	0,218	0,144
Доля анкерных участков компенсированной контактной подвески	0,103	0,113	0,001
Доля анкерных участков полукompенсированной контактной подвески	0,101	0,098	0,001
Гололедный район дистанции электроснабжения	0,044	0,078	0,016
Ветровой район дистанции электроснабжения	0,030	0,026	0,063
Температурный район дистанции электроснабжения	0,096	0,146	0,001
Процентное отношение длины участков контактной сети, оборудованных средствами плавки гололеда (по данным АС «Зима»), к развернутой длине электрифицированных путей из формы АГО-9	0,078	0,075	0,001
Количество устройств механической очистки гололеда в дистанции электроснабжения	0,030	0,012	0,002
Количество вибропантографов и пневмобарабанов на электровазax в границах дирекции по энергообеспечению	0,126	0,038	0,047
Среднее количество дней с образованием гололеда	0,063	0,089	0,002

С учетом представленных в таблице 2 результатов можно сделать следующие выводы.

1. Для каждого децильного коэффициента свой набор наиболее значимых факторов.
2. Практически все рассматриваемые факторы оказывают влияние на вероятность возникновения двух и более отказов устройств токоcъема в течение года.
3. В качестве общих факторов для всех децильных коэффициентов следует выделить:
 - количество устройств механической очистки гололеда в дистанции электроснабжения;
 - долю участков классов 3М, 4, 4М, 5, 5М в развернутой длине электрифицированных путей;
 - ветровой район дистанции электроснабжения;
 - гололедный район дистанции электроснабжения;
 - процентное отношение длины участков контактной сети, оборудованных средствами плавки гололеда (по данным АС «Зима»), к развернутой длине электрифицированных путей из формы АГО-9;
 - среднее количество дней с образованием гололеда.

Предлагаемая прогнозная модель позволяет определить вероятность благоприятного исхода (отсутствие отказов устройств токоcъема или приемлемое их число) при управляемых изменениях исходных данных, таких как количество механических средств для удаления гололеда, размеры движения (грузонапряженность), оснащенность участков схемами плавки гололеда, что в дальнейшем позволит оценить достаточность оснащенности подразделений

Трансэнерго устройствами для механической очистки гололеда и Дирекции тяги вибропантографами и пневмобарабанами.

Список литературы

1. Фрайфельд, А. В. Устройство, сооружение и эксплуатация контактной сети и воздушных линий / А. В. Фрайфельд, Н. А. Бондарев, А. С. Марков. – Москва : Транспорт, 1980. – 422 с. – Текст : непосредственный.
2. Калининченко, А. Я. Предотвращение гололедообразования при токосъеме / А. Я. Калининченко, А. А. Ковалев, А. А. Кардаполов. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2014. – № 3 (52). – Т. 12. – С. 176–183.
3. Контактная сеть и воздушные линии. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтным воздушным линиям : справочник. – Москва : Трансиздат, 2001. – 512 с. – Текст : непосредственный.
4. Инструкция по подготовке к работе и обеспечению надежности работы устройств электропитания в зимний период : утв. распоряж. ОАО «РЖД» от 14.11.2019 № 2542/р (ред. распоряж. ОАО «РЖД» от 08.02.2021 № 220/р). – Екатеринбург : Уралюриздат, 2021. – 76 с. – Текст : непосредственный.
5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 74 с. – Текст : непосредственный.
6. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / В. Е. Гмурман. – Москва : Высшая школа, 2004. – 479 с. – Текст : непосредственный.
7. Елисеева, И. И. Общая теория статистики : учебник / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – Москва : Финансы и статистика, 2002. – 480 с. – Текст : непосредственный.
8. Cooper G. A. Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data, *Machine Learning*, 1992, no. 9, pp. 309 – 347.
9. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Philippov V. M., Nezevak V. L., Tarasenko A. V., Golubkov A. S. Concept of intellectual diagnostic system of traction electrical supply devices. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 918 (1), p. 012078.
10. Smerdin A., Ermachkov G., Nezevak V., Sidorov O., Golubkov A. Use of sensor networking technology to build a power transformer monitoring system. *E3S Web of Conferences «Topical Problems of Agriculture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2020»*, 2020, p. 02021.
11. Zhang H. The Optimality of Naive Bayes. *Published in FLAIRS Conference*, 2004.
12. Jensen Finn V. Bayesian Networks and Decision Graphs. Springer, 2001, 268 p.

References

1. Frajfel'd A. V., Bondarev N. A., Markov A. S. *Ustrojstvo, sooruzhenie i jekspluatacija kontaktnoj seti i vozdušnyh linij* (Arrangement, construction and operation of the contact network and overhead lines). Moscow: Transport Publ., 1980, 422 p.
2. Kalinichenko A. Ja., Kovalev A. A., Kardapolov A. A. Prevention of ice formation during current collection [Predotvrashhenie gololedoobrazovanija pri tokos'eme]. *Mir transporta – World of transport and transportation*, 2014, vol. 12, no. 3 (52), pp. 176–183.
3. *Kontakt'naja set' i vozdušnye linii. Normativno-metodicheskaja dokumentacija po jekspluatacii kontaktnoj seti i vysokovol'tnym vozdušnym linijam: Spravochnik* (Contact network and overhead lines. Normative and methodological documentation on the operation of the contact network and high-voltage overhead lines: Reference). Moscow: Transizdat Publ., 2001, 512 p.
4. *Instrukcija po podgotovke k rabote i obespečeniju nadezhnosti raboty ustrojstv jelektrosnabženija v zimnij period* (Instructions for preparing for work and ensuring the reliability of power supply devices in winter). Ekaterinburg: Uraljurizdat Publ., 2021, 76 p.
5. *SP 20.13330.2016 Nagruzki i vozdejstvija* (Loads and impacts. Set of rules 20.13330.2016). Moscow, Standardinform, 2018, 74 p.

6. Gmurman V. E. *Teorija verojatnostej i matematičeskaja statistika* (Probability theory and mathematical statistics). Moscow: Vysshaja shkola Publ., 2004, 479 p.
7. Eliseeva I. I., Juzbashev M. M. *Obshhaja teorija statistiki* (General theory of statistics). Moscow: Finansy i Statistika Publ., 2002, 480 p.
8. Cooper G. A. Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data, *Machine Learning*, 1992, no. 9, pp. 309–347.
9. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Philippov V. M., Nezevak V. L., Tarasenko A. V., Golubkov A. S. Concept of intellectual diagnostic system of traction electrical supply devices. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 918 (1), p. 012078.
10. Smerdin A., Ermachkov G., Nezevak V., Sidorov O., Golubkov A. Use of sensor networking technology to build a power transformer monitoring system. *E3S Web of Conferences «Topical Problems of Agriculture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2020»*, 2020, p. 02021.
11. Zhang H. The Optimality of Naive Bayes. *Published in FLAIRS Conference*, 2004.
12. Jensen Finn V. Bayesian Networks and Decision Graphs. *Springer*, 2001, 268 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смердин Александр Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Тарасенко Александр Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: alessandro-tar@yandex.ru

Чертков Иван Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: chertkovie@omgups.ru

Голубков Антон Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: anton.golubkov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smerdin Alexander Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Railways power supply», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Tarasenko Alexander Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railways power supply», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: alessandro-tar@yandex.ru

Chertkov Ivan Evgenyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railways power supply», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: chertkovie@omgups.ru

Golubkov Anton Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railways power supply», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: anton.golubkov@gmail.com

Разработка вероятностной модели прогнозирования отказов в работе системы токосъема вследствие гололедообразования на проводах контактной сети / А. Н. Смердин, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков, А. С. Голубков – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 62 – 71.

Smerdin A. N., Tarasenko A. V., Chertkov I. E., Golubkov A. S. Development of a probable failure prediction model in the operation of the current collection system due to ice formation on the wires of the contact network. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 2 (46), pp. 62 – 71 (In Russian).

УДК 629.4.02: 629.45

Д. Г. Евсеев, М. Ю. Куликов, А. С. Шинкарук

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ХРЕБТОВОЙ БАЛКИ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

Аннотация. В статье рассматривается возможность продления срока службы пассажирских вагонов. Проведенным анализом состояния парка пассажирских вагонов установлено, что темп пополнения плацкартных вагонов за последние 10 лет снижен более чем на 40 %, поэтому обеспечить покрытие и восполнение выбывания подвижного состава данного типа по истечении нормативного срока службы можно только за счет продления срока эксплуатации существующих вагонов путем проведения капитально-восстановительного ремонта с установлением им нового нормативного срока службы.

При анализе силового каркаса плацкартного пассажирского вагона установлено, что наибольшие статические и динамические нагрузки воспринимает его хребтовая балка. Именно из-за возникающих в ней напряжений формируется оценка дальнейшей возможности эксплуатации вагона как в периоде его жизненного цикла, так и дальнейшего использования при диагностике на возможность назначения ему нового нормативного срока службы при проведении капитально-восстановительного ремонта.

Проведенными исследованиями ряда элементов хребтовых балок, вырезанных из выработавших нормативный срок пассажирских вагонов, установлено, что основные характеристики металла удовлетворяют требованиям норм безопасности, это говорит о том, что заложенный в них запас прочности и ресурс полностью не выработаны.

При исследовании наличия остаточных напряжений, возникших в вырезанных из хребтовых балок элементах, в зависимости от глубины травления, проведенного по методу Н. Н. Давиденкова в соответствии с методикой ЦНИИТмаши, определены наиболее уязвимые и опасные места коррозионного воздействия, требующие более тщательного контроля при проведении вагону как технического обслуживания, так и планово-предупредительного ремонта.

В целях снижения развития остаточных напряжений и коррозионного воздействия на силовой каркас плацкартного вагона разработаны рекомендации и технологические операции по упрочнению хребтовой балки методом дробеструйной обработки с образованием равномерной мелкопористой структуры, обеспечивающей равномерное нанесение лакокрасочного покрытия.

Данная технология позволит провести упрочнение участков хребтовой балки в местах сварных соединений с концевыми, шкворневыми и промежуточными балками, снизить возникновение в них остаточных напряжений и повысить антикоррозионную защиту металла от воздействия окружающей среды и внешних факторов.

Ключевые слова: упрочнение хребтовой балки, коррозия, продление, напряжения, упрочнение, пассажирский вагон.

Dmitriy G. Evseev, Mikhail Yu. Kulikov, Andrey S. Shinkaruk

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

THE PASSENGER CAR RIDGE BEAM DURABILITY IMPROVING

Abstract. The article discusses the possibility of extending the service life of passenger cars. The analysis of the state of the passenger car fleet has established that the rate of replenishment of reserved cars has been reduced by more than 40 % over the past 10 years, therefore, it is possible to ensure coverage and replenishment of the retirement of rolling stock of this type after the expiration of the standard service life only by extending the service life of existing cars by carrying out capital repairs with the establishment of a new standard service life.

When analyzing the power frame of a reserved seat passenger car, it was found that the greatest static and dynamic loads are perceived by its center beam. It is precisely because of the stresses arising in it that an assessment is formed of the further possibility of operating a car both during its life cycle and further use in diagnostics for the possibility of assigning a new service life to it during overhaul repairs.

Studies of a number of elements of center beams cut from passenger cars that have expired the standard period have established that the main characteristics of the metal meet the requirements of safety standards, this indicates that the safety margin and resource inherent in them has not been fully depleted.

In the study of the presence of residual stresses that have arisen in the elements cut from the ridge beams, depending on the depth of etching carried out according to the method of N. N. Davidenkov in accordance with the TSNITmash methodology, the most vulnerable and dangerous places of corrosion that require more careful control during the car maintenance and scheduled preventive repairs were identified.

In order to reduce the development of residual stresses and the corrosive effect on the load-bearing frame of a second-class car, recommendations and technological operations have been developed for strengthening the ridge beam by the method of shot-blasting with the formation of a uniform fine-pored structure, which ensures uniform application of paint and varnish coating.

Keywords: strengthening of the ridge beam, corrosion, extension, stresses, hardening, passenger car.

Статистический анализ данных за 2010 – 2020 гг. показывает, что спрос на пассажирский подвижной состав в период летних пассажирских перевозок только растет. Необходимо отметить, что темп пополнения парка плацкартных вагонов за последние 10 лет снижен более чем на 40 % от его выбывания по истечении максимально допустимого срока службы, поэтому обеспечить покрытие потребности в пассажирских перевозках можно только за счет продления срока службы вагонов при проведении капитально-восстановительного ремонта с безусловным обеспечением требований безопасности движения его основных несущих элементов.

В связи с этим весьма актуальным становится вопрос о продлении срока службы существующим плацкартным пассажирским вагонам. Продление срока службы пассажирским вагонам позволит обеспечить перевозки на период создания новых современных вагонов.

Следует отметить, что проведенный анализ состояния парка пассажирских вагонов показывает, что все еще остаются незадействованными огромные возможности повышения эффективности их использования на основе внедрения новейших научно-технических разработок, модернизации и улучшения технико-эксплуатационных характеристик. Практическое решение этих вопросов может быть осуществлено на уже существующих производственных мощностях, что является гарантией высокой экономической эффективности.

Основную роль в обеспечении содержания пассажирского вагона является содержание в технически исправном состоянии его основных узлов и деталей, что обеспечивается своевременным и качественным выполнением регламентов планово-предупредительных ремонтов и технического обслуживания подвижного состава в процессе его эксплуатации [1].

Основными несущими элементами пассажирского вагона являются шкворневые, концевые и хребтовая балки вагона. Именно тщательный контроль и восстановление ресурса этих элементов в процессе ремонта формируют основу длительности полезной эксплуатации пассажирского вагона, который может быть продлен на более длительный период, чем заложено в нормативной и конструкторской документации [2].

Хребтовая балка является наиболее важным элементом пассажирского вагона, так как именно она «держит» конструкцию вагонов в процессе воздействия на нее статических и динамических нагрузок при эксплуатации. Вследствие этого при изготовлении хребтовой балки ее элементы подвергаются испытаниям на статическую прочность, ходовым, прочностным и динамическим испытаниям, испытаниям на сопротивление усталости, несущую способность и ресурсным испытаниям на соударение [3].

Продление срока службы пассажирского вагона в основном осуществляется при проведении капитально-восстановительного ремонта с установлением вагону нового назначенного срока службы. При проведении ремонта указанного выше объема наряду с прочими операциями осуществляется диагностирование основных несущих элементов

конструкции, в том числе и хребтовой балки. В процессе диагностирования в обязательном порядке проводится дефектоскопирование элементов хребтовой балки с измерением остаточной толщины металла. Допустимый процент износа (в основном износ имеет коррозионный характер) хребтовой балки составляет 20 % от сечения ее профиля [4, 5].

При попадании пассажирских вагонов в ремонт установлено, что порядка 15 % вагонов требуют частичного ремонта хребтовой балки в основном из-за наличия коррозионного износа.

Результаты ранее проводимых исследований показали, что главные повреждения металлоконструкций рамы и кузова вагона происходят из-за возникновения местной коррозии в несущих элементах вагона (рисунок 1). В основном интенсивная коррозия наблюдается в местах сварки хребтовой и шкворневой балок.



а



б

Рисунок 1 – Состояние хребтовых балок пассажирских вагонов в эксплуатации

Проведенным исследованием ряда элементов хребтовых балок, вырезанных из выработавших нормативный срок пассажирских вагонов, установлено, что основные характеристики металла (временное сопротивление, предел текучести, ударная вязкость и др.) удовлетворяют требованиям норм безопасности, и, следовательно, можно сделать вывод о том, что заложенный запас прочности и ресурс хребтовой балки полностью не выработаны [6].

В процессе проведенного изучения наличия и распределения остаточных напряжений в вырезанных элементах хребтовых балок проведено исследование на их наличие в зависимости от глубины травления по методу Н. Н. Давиденкова в соответствии с разработанной ЦНИИТмашем методикой. В результате напряжения в исследуемых элементах характеризуются широкой амплитудой знакопеременных значений. Результаты исследований приведены на рисунке 2.

В результате исследования остаточных напряжений установлено, что в фрагментах хребтовых балок, в районе приварки к шкворневым элементам, имеются максимальные растягивающие напряжения, а наибольшие знакопеременные остаточные напряжения выявлены в фрагменте балки 1980 года изготовления (амплитудные значения колеблются в диапазоне от -5045 до 4765 МПа). Наличие данных напряжений связано с существованием в данных местах повышенного концентратора напряжений, и здесь протекает более интенсивный коррозионный процесс в сравнении с другими участками [6 – 8, 10].

Проведенным металлографическим исследованием образцов установлено, что структура металла исследуемых образцов представляет собой феррито-пластинчатый перлит. В центральной части исследуемых образцов выявляется выраженная феррито-перлитная полосчатость с наличием коррозионных язв от 20 до 35 % сечения. Данные элементы

хребтовых балок вырезаны из зон приварки к шворневым балкам вагонов (наиболее уязвимые участки для коррозионного воздействия).

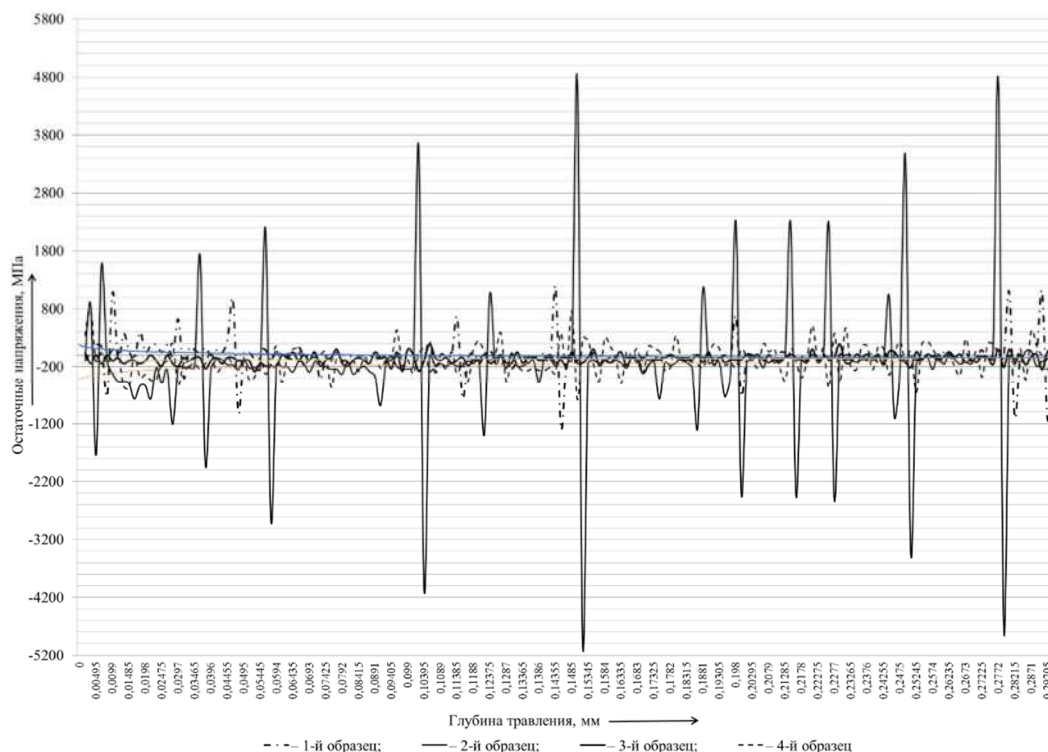


Рисунок 2 – Распределение остаточных напряжений при испытании образцов элементов хребтовых балок

Проведенным исследованием влияния коррозионного износа и механического воздействия на изменение толщины металла в исследуемых фрагментах установлено, что утонение металла хребтовых балок с момента их изготовления (1992 г.) составило от 0,27 до 0,49 мм, утонение металла в фрагментах хребтовой балки, изготовленной в 1980 г., составило от 0,22 до 0,76 мм.

На других участках хребтовой балки, практически не подверженных коррозии, происходит формирование сжимающих напряжений.

Проведенным исследованием ряда элементов хребтовых балок, вырезанных из выработавших нормативный срок пассажирских вагонов и не подверженных коррозии, установлено, что основные характеристики металла (временное сопротивление, предел текучести, ударная вязкость и др.) удовлетворяют требованиям норм безопасности, следовательно, можно сделать вывод о том, что заложенный запас прочности и ресурс хребтовой балки полностью не выработаны [6, 7, 10].

Проведение исследования в части влияния дробеструйной обработки на содержание хребтовой балки перед ее окрашиванием позволило установить ряд преимуществ этого процесса. Так, после упрочнения хребтовой балки дробью 0,3 – 0,5 мм на упрочняемой поверхности образовалась равномерная мелкопористая структура металла, позволившая равномерно осуществить нанесение лакокрасочного покрытия и сформировались сжимающие внутренние напряжения. Проведение работ по данной технологии позволило снизить влияние таких факторов, как наличие остаточного слоя ранее нанесенного лакокрасочного покрытия, образование адгезии, непрокрашивание металла отдельных участков хребтовой балки, а также исключить окраску по окалинам проводимых сварочных работ на подвижном составе в период ремонта.

Таким образом, участки хребтовых балок в районе приварки к шворневым элементам являются наиболее опасными и уязвимыми для образования в них коррозии и требуют осуществления более тщательного контроля и обслуживания при проведении вагонам технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта [9].

С целью снижения и исключения коррозионных процессов, а также продления долговечности пассажирского вагона необходимо обеспечивать упрочнение элементов хребтовой балки в местах сварных соединений с промежуточными балками рамы вагона и формирование в них остаточных внутренних напряжений, а также нанесение на эти участки дополнительного антикоррозионного покрытия.

Данные работы необходимо проводить при изготовлении и при проведении капитального ремонта вагона.

Список литературы

1. Приказ Минтранса России от 13 января 2011 года № 15 «О внесении изменений в приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 4 апреля 1997 года № 9Ц «О введении новой системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов»» // www.glavbukh.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://www.glavbukh.ru/npd/edoc/99_902262500 (дата обращения: 13.10.2021).
2. ГОСТ Р 55182–2012. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 24 с. – Текст : непосредственный.
3. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 41 с. – Текст : непосредственный.
4. Положение о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении. – Москва : ОАО «ВНИИЖТ», 2014. – 24 с. – Текст : непосредственный.
5. ПР НК В 1. Правила по неразрушающему контролю вагонов, их деталей и составных частей при ремонте. Общие положения. – Санкт-Петербург : ФГУП «НИИ мостов», 2012. – 51 с. – Текст : непосредственный.
6. Петров, Л. Н. Коррозия под напряжением : монография / Л. Н. Петров. – Киев : Вища школа, 1986. – 141 с. – Текст : непосредственный.
7. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – Москва : Машгиз, 1963. – 232 с. – Текст : непосредственный.
8. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей, А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев, Г. З. Серебренников. – Москва : Машиностроение, 1973. – 216 с. – Текст : непосредственный.
9. Способ увеличения продолжительности жизненного цикла пассажирского плацкартного вагона / Д. Г. Евсеев, М. Ю. Куликов, А. С. Шинкарук, М. А. Ларионов. – Текст : непосредственный // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 6 (103). – С. 47–52.
10. Екобори, Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел / Т. Екобори. – Москва : Металлургия, 1971. – 264 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Prikaz Mintransa Rossii ot 13 ianvaria 2011 goda № 15 «O vnesenii izmenenii v prikaz Ministerstva putei soobshcheniia Rossiiskoi Federatsii ot 4 apreliia 1997 goda № 9Ts «O vvedenii novoi sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniia i remonta passazhirskikh vagonov»»* (Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 15 dated January 13, 2011 «On Amendments to the Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation No. 9C dated April 4, 1997 «On the Introduction of a New system of maintenance and repair of passenger cars»»). Available at: https://www.glavbukh.ru/npd/edoc/99_902262500 (accessed 13 October 2021).
2. *Vagony passazhirskie lokomotivnoi tiagi. Obshchie tekhnicheskie trebovaniia, GOST R 55182-2012* (Passenger cars of locomotive traction. General technical requirements, National Standard 55182-2012). Moscow, Standardinform, 2019, 24 p.
3. *Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytanii na prochnost' i dinamicheskie kachestva, GOST 33788-2016* (Freight and passenger cars. Methods of testing for strength and dynamic qualities, GOST 33788-2016). Moscow, Standardinform, 2016, 41 p.

4. *Polozhenie o prodlenii sroka sluzhby passazhirskikh vagonov, kursiruiushchikh v mezhdunarodnom soobshchenii* (Regulations on extending the service life of passenger cars plying in international traffic). Moscow, JSC "VNIIZHT", 2014, 24 p.

5. *PR NK V 1. Pravila po nerazrushaiushchemu kontroliu vagonov, ikh detalei i sostavnykh chastei pri remonte. Obshchie polozheniia* (PR NC B 1. Rules for non-destructive testing of wagons, their parts and components during repair. General provisions). Saint-Petersburg, FGUP «NII mos-tov», 2012, 51 p.

6. Petrov L. N. *Korroziia pod napriazheniem: monografiia* (Corrosion under stress: monograph). Kiev: Vishcha shkola Publ., 1986, 141 p.

7. Birger I. A. *Ostatochnye napriazheniia* (Residual stresses). Moscow: Mashgiz Publ., 1963, 232 p.

8. Podzei A. V., Sulima A. M., Evstigneev M. I., Serebrennikov G. Z. *Tekhnologicheskie ostatochnye napriazheniia* (Technological residual stresses). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973, 216 p.

9. Evseev D. G., Kulikov M. Yu., Shinkaruk A. S., Larionov M. A. A way to increase the life cycle of a passenger reserved car [Sposob uvelicheniia prodolzhitel'nosti zhiznennogo tsikla passazhirskogo platskartnogo vagona]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk state technical university*, 2021, no. 6 (103), pp. 47 – 52.

10. Ekobori T. *Fizika i mekhanika razrusheniia i prochnosti tverdykh tel* (Physics and mechanics of fracture and strength of solids). Moscow: Metallurgii Publ., 1971, 264 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евсеев Дмитрий Геннадьевич

Российский университет транспорта (МИИТ).
Новосущевская ул., д. 22, стр. 1, Москва, 127055,
Российская Федерация.

Доктор технических наук, президент института
транспортной техники и систем управления.

Тел.: +7 (985) 769-60-78.

E-mail: evseev dg@gmail.com

Куликов Михаил Юрьевич

Российский университет транспорта (МИИТ).
Новосущевская ул., д. 22, стр. 1, Москва, 127055,
Российская Федерация.

Доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Технология транспортного машиностроения и ре-
монта подвижного состава».

Тел.: +7 (964) 578-56-89.

E-mail: muk.56@mail.ru

Шинкарук Андрей Сергеевич

Российский университет транспорта (МИИТ).
Новосущевская ул., д. 22, стр. 1, Москва, 127055,
Российская Федерация.

Инженер путей сообщения АО «Федеральная
пассажирская компания», соискатель ученой степени
кандидата технических наук.

Тел.: +7 (925) 804-44-95.

E-mail: Shinkarukas@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Евсеев, Д. Г. Повышение долговечности хребто-
вой балки пассажирского вагона / Д. Г. Евсеев,
М. Ю. Куликов, А. С. Шинкарук. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 71 – 76.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evseev Dmitriy Gennad'evich

Russian University of Transport (MIIT).
22, art. 1, Novosushchevskaya st., Moscow, 127055,
the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, the president of
Institute of Transport Engineering and Control Systems.

Phone: +7 (985) 769-60-78.

E-mail: evseev dg@gmail.com

Kulikov Mikhail Yur'evich.

Russian University of Transport (MIIT).
22, art. 1, Novosushchevskaya st., Moscow, 127055,
the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, head of the
department of Transport Engineering Technology and
Rolling Stock Repair.

Phone: +7 (964) 578-56-89.

E-mail: muk.56@mail.ru

Shinkaruk Andrey Sergeevich

Russian University of Transport (MIIT).
22, art. 1, Novosushchevskaya st., Moscow, 127055,
the Russian Federation.

Railway engineer, candidate of the academic degree
of Ph. D. in Engineering.

Phone: +7 (925) 804-44-95.

E-mail: Shinkarukas@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Evseev D. G., Kulikov M. Yu., Shinkaruk A. S. The
passenger car ridge beam durability improving. *Journal of
Transsib railway studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 71 – 76
(In Russian).

А. Н. Савоськин¹, А. А. Лунин², С. В. Чунин²

¹Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация;

²Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКТИ), г. Коломна, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА РЕЛЬСОШПАЛЬНОЙ РЕШЕТКЕ

Аннотация. В данной статье рассмотрена проблема оценки устойчивости бесстыкового пути при его температурном удлинении. Рассмотрен предложенный специалистами АО «ВНИКТИ» способ определения напряженно-деформированного состояния рельсов бесстыкового пути, который основан на использовании зависимости собственных частот колебаний рельса от приложенного продольного усилия. Такая зависимость может быть получена расчетным методом с использованием конечно-элементной модели участка пути. Оценка достоверности такой зависимости может быть проведена путем сравнения результатов, полученных расчетным способом, с действительными значениями собственных частот колебаний рельса в зависимости от приложенного продольного усилия растяжения и сжатия на натурном объекте. Таким объектом была выбрана рельсошпальная решетка. С целью получения действительной зависимости собственных частот колебаний рельса от приложенного продольного усилия был разработан специализированный стенд. Разработка стенда включила в себя создание конструкции элементов стенда и конечно-элементных моделей основных несущих элементов стенда – упора, кронштейна и тяги, а также последующего расчета их на прочность для подтверждения работоспособности выбранной конструкции при необходимых условиях нагружения. Оценка прочности проводилась при использовании коэффициента запаса по пределу текучести. Расчеты по методу конечных элементов показали, что конструкция стенда обладает достаточной прочностью. Разработанный стенд позволит проводить испытания с целью верификации полученной расчетным методом зависимости частот колебаний рельса от приложенного к нему продольного усилия растяжения и сжатия, а также для апробирования предлагаемого метода оценки продольного усилия в рельсе при его температурном расширении.

Ключевые слова: устойчивость, бесстыковой путь, собственные частоты, продольное усилие, расчет, стенд, испытания, разработка.

Anatoly N. Savoskin¹, Andrey A. Lunin², Sergey V. Chunin²

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation;

²Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock (VNIKTI), Kolomna, the Russian Federation

THE DEVELOPMENT OF A BENCH TO PERFORM TESTS ON TRACK PANEL

Abstract. In this article, the problem of assessing the stability of a continuous welded rail track during its thermal elongation is considered. The article considers the method of determining a stress-strain state of continuous welded rails proposed by specialists of JSC “VNIKTI”, which is based on the use of the dependence of natural frequencies of rail vibrations on the applied longitudinal force. Such a dependence can be obtained with the help of the calculation method using a finite element model of a track section. The reliability of such a dependence can be assessed by comparing the results obtained using the calculation method with the actual values of natural frequencies of rail vibrations, depending on the longitudinal tensile and compression force applied to a full-scale facility. The track panel is chosen as such a facility. In order to obtain the actual dependence of natural frequencies of rail vibrations on the applied longitudinal force, a specialized test bench is developed. The development of the test bench included designing the test bench elements and creating finite element models of main load-bearing elements of the test bench - a stop, support and traction, as well as their subsequent strength calculation to confirm the operability of the selected design under necessary loading conditions. The strength is assessed using the safety factor for the yield strength. Calculations using the finite element method have shown that the test bench design has sufficient strength. The developed test bench will allow performing tests for the purpose of the verification obtained using the calculation method of the dependence of rail vibration frequencies on the longitudinal tension and compression force applied to it, as well as for testing the proposed method to assess the rail longitudinal force during its thermal expansion.

Keywords: stability, continuous welded rail track, natural frequencies, longitudinal force, calculation, test bench, tests, development.

В настоящее время большое распространение на железных дорогах России и мира получает бесстыковой путь [1], специфика устройства которого позволяет повысить плавность движения поездов, улучшить показатели динамического воздействия пути и подвижного состава,

повысить надежность работы тяговых и сигнальных электрических цепей, улучшить экологические показатели за счет снижения шума. Особенно это актуально для организации высокоскоростного движения. Однако бесстыковой путь не лишен недостатков: отсутствует свободное изменение длины рельсов при изменении температуры воздуха, что вызывает в рельсах температурные напряжения [2]; при текущем содержании пути [3] требуется усиленный надзор, особенно в периоды критических температур; усложнены технологический процесс по укладке пути и ремонтные работы при текущем содержании.

Так, наиболее часто встречающейся проблемой, связанной с действием температурных напряжений в рельсах бесстыкового пути, является его выброс, который часто приводит к авариям при движении поездов [4]. Для оценки и прогнозирования работоспособности пути специалистами АО «ВНИКТИ» был предложен способ определения напряженно-деформированного состояния (НДС) различных упругих объектов [5], суть которого состоит в том, что оценку НДС проводят по изменению значений собственных колебаний объекта с использованием зависимости, полученной расчетным методом. Такая зависимость значений собственных частот колебаний рельса от приложенного продольного усилия была получена ранее расчетом с использованием модального анализа на конечно-элементной модели участка пути [6].

Для верификации полученной зависимости и апробирования предлагаемого метода оценки продольного усилия в рельсе при его температурном расширении был разработан специальный испытательный стенд (рисунки 1 – 4).

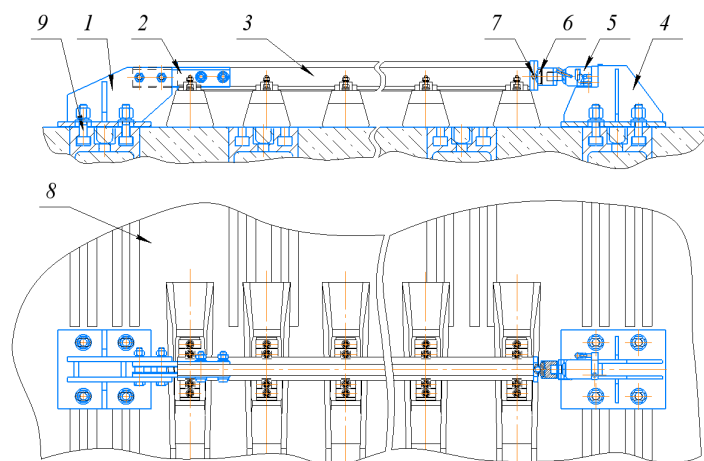


Рисунок 1 – Схема стенда для испытаний рельсошпальной решетки на сжатие: 1 – кронштейн; 2 – соединительная планка; 3 – рельсошпальная решетка; 4 – упор; 5 – домкрат; 6 – датчик силы; 7 – шарик; 8 – поверхность пола; 9 – болты крепления стенда

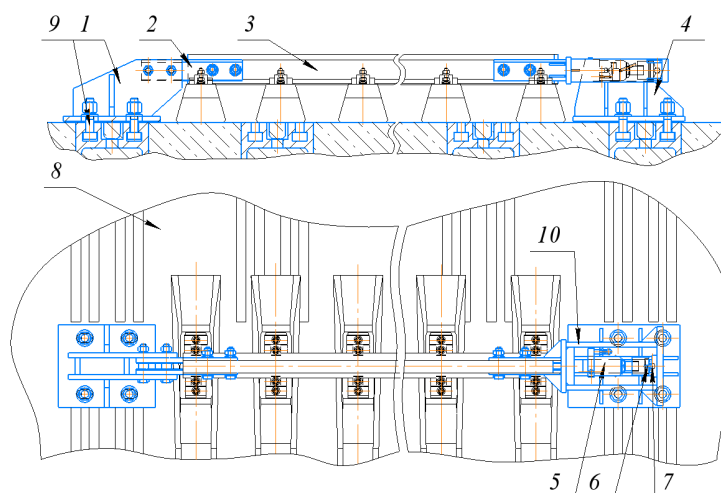


Рисунок 2 – Схема стенда для испытаний рельсошпальной решетки на растяжение: 1 – кронштейн; 2 – соединительная планка; 3 – рельсошпальная решетка; 4 – упор; 5 – домкрат; 6 – датчик силы; 7 – шарик; 8 – поверхность пола; 9 – болты крепления стенда; 10 – тяга



Рисунок 3 – Стенд для испытаний рельсошпальной решетки (вид сверху)

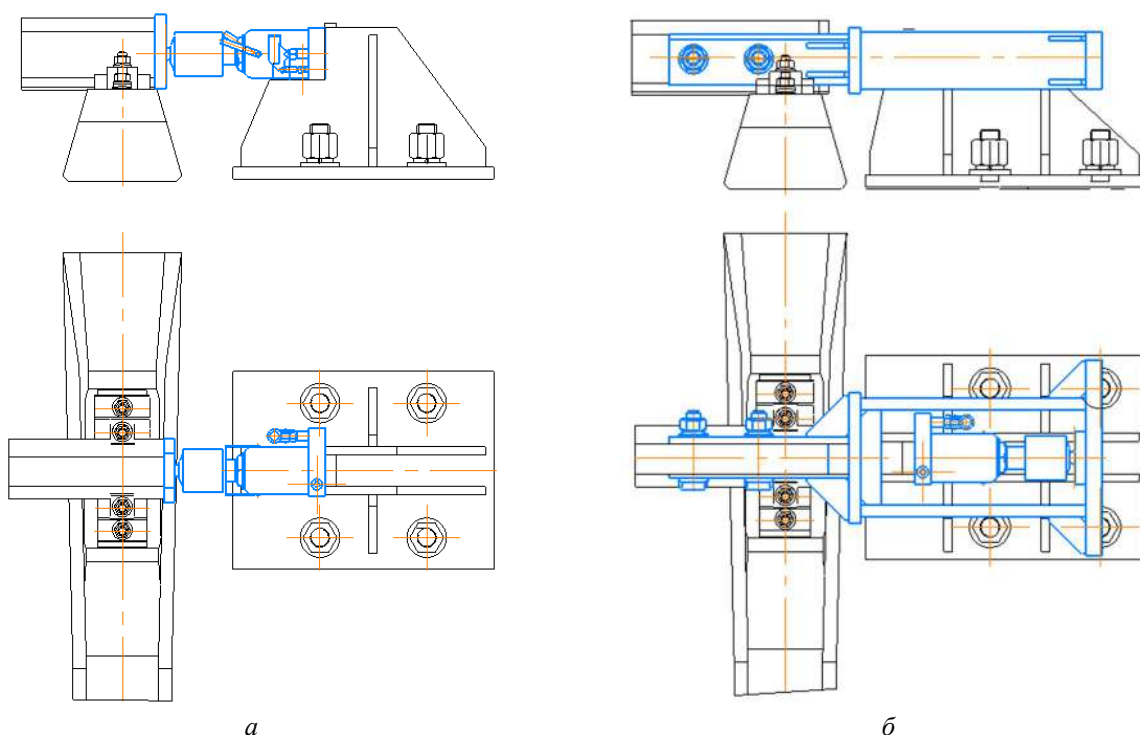


Рисунок 4 – Исполнение конструкции стенда для испытаний рельсошпальных решеток на сжатие (а) и растяжение (б)

Стенд состоит из рельсошпальной решетки длиной 5 м на бетонных шпалах [7] с рельсами типа Р65 [8] и болтовыми скреплениями [9], упоров, через которые производится продольное нагружение рельса гидравлическими домкратами, и кронштейнов для закрепления решетки от перемещения.

Упоры разработаны таким образом, чтобы обеспечить возможность создания сил растяжения и сжатия в рельсах путем их переворота вокруг вертикальной оси, для чего дополнительно используется тяга. На рис. 4 показаны варианты исполнения конструкции стенда для испытания рельсошпальной решетки на сжатие и растяжение.

Упоры и кронштейны закреплены с помощью закладных болтов к поверхности пола. Продольная сила растяжения-сжатия создается посредством бутылочных гидравлических домкратов. Для контроля величины сил в конструкции упоров предусмотрена возможность установки тензорезистивного датчика силы с шариком.

В качестве материала для изготовления элементов стенда выбрана сталь марки Ст3 по ГОСТ 380–2005 [10].

Для оценки прочности разработанной конструкции при работе стенда с нагрузками растяжения и сжатия до 200 кН произведен расчет методом конечных элементов на основе созданных моделей упора, кронштейна и тяги стенда (рисунки 5 – 7) [11].

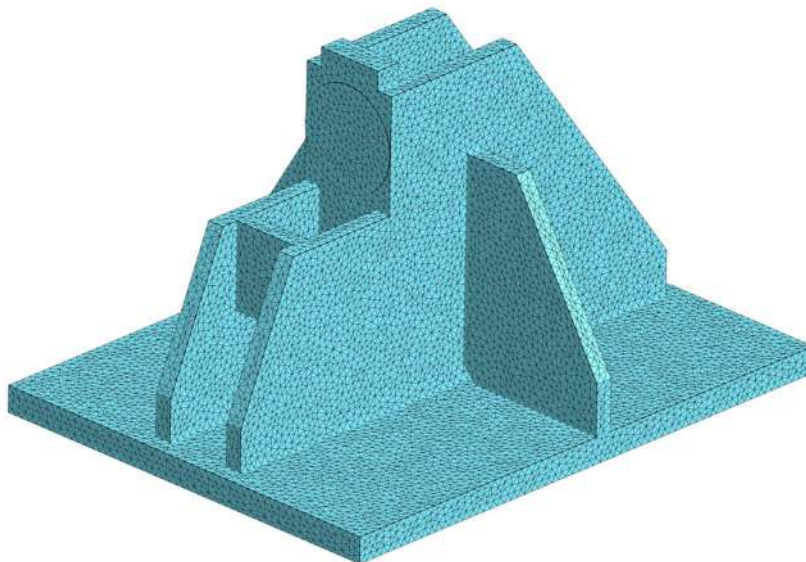


Рисунок 5 – Модель упора

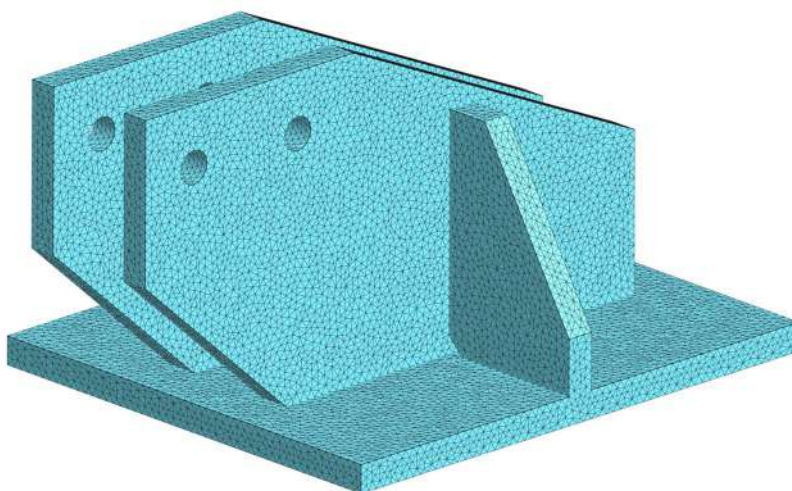


Рисунок 6 – Модель кронштейна

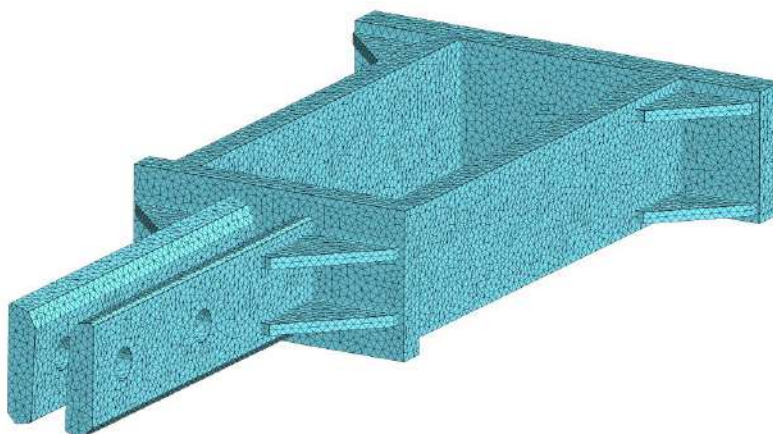


Рисунок 7 – Модель тяги

Закрепление моделей упора и кронштейна производилось по поверхности соприкосновения с полом. Нагрузка прилагалась для упора к поверхности опирания домкрата, для кронштейна по поверхности отверстий крепления к накладке рельса в продольном относительно рельса направлении. Значение нагрузки составило 200 кН, что соответствует максимальной силе, которую может создать выбранный домкрат.

Механические характеристики металла объектов расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические характеристики металла объектов расчета

Характеристика	Значение
Временное сопротивление разрыву (предел прочности при растяжении), МПа	380...490
Предел текучести σ_T , МПа	245
Модуль упругости, ГПа	210
Коэффициент Пуассона	0,26

Результаты расчета в виде картин распределения напряжений σ (рисунки 8 – 10) показывают расположение и значение наибольших напряжений в конструкции детали.

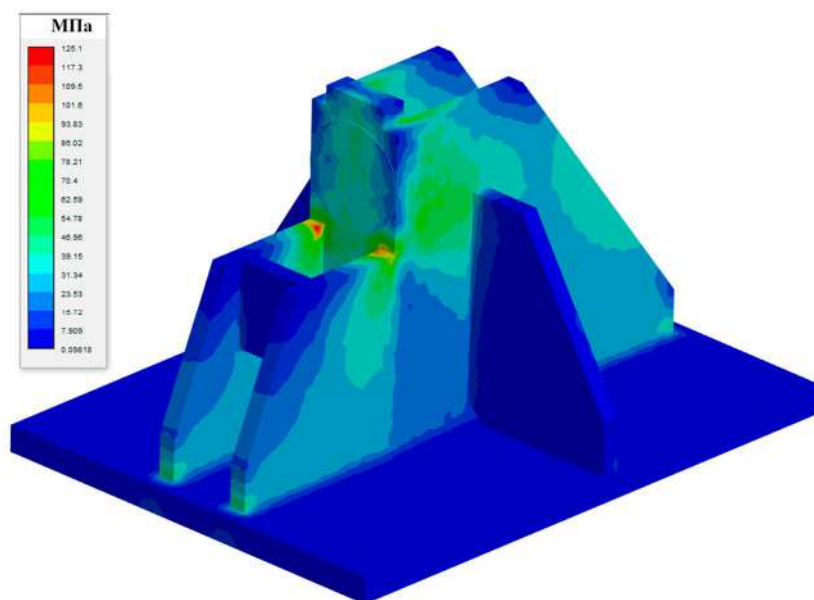


Рисунок 8 – Распределение эквивалентных напряжений в модели упора

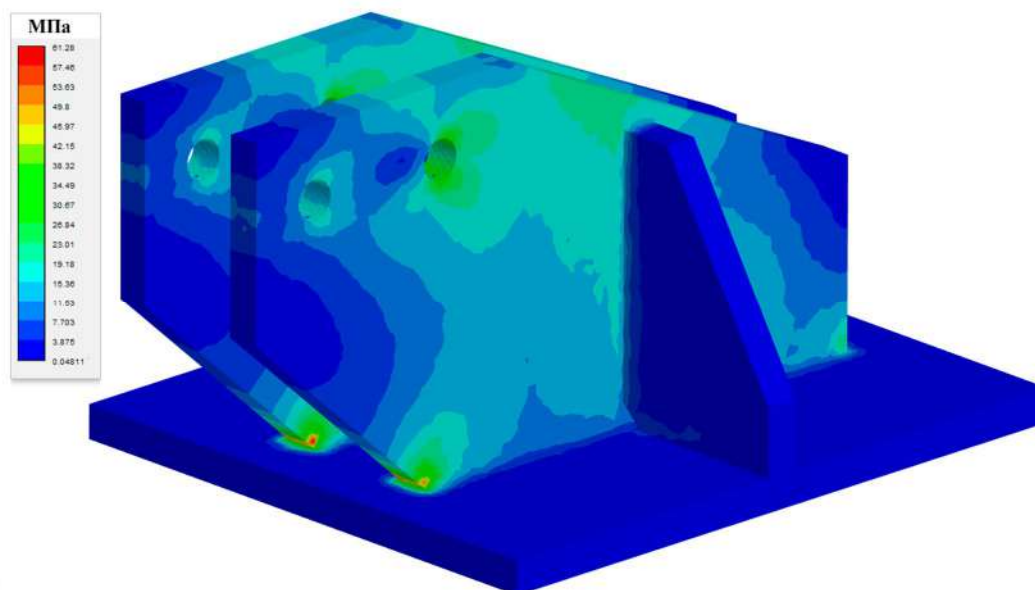


Рисунок 9 – Распределение эквивалентных напряжений в модели кронштейна

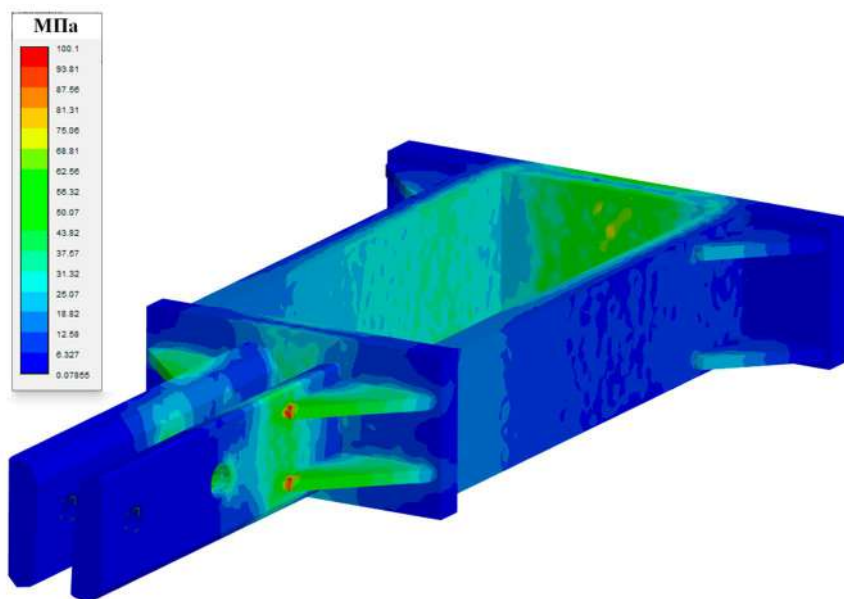


Рисунок 10 – Распределение эквивалентных напряжений в модели тяги

Оценку прочности конструкции произведем путем сравнения коэффициента запаса прочности n по отношению к пределу текучести σ_T с его нормативным значением $[n]$:

$$n = \frac{\sigma_T}{\sigma} \leq [n]. \quad (1)$$

Коэффициент запаса прочности n – отношение предельно допустимой теоретической нагрузки (в нашем случае это предел текучести материала σ_T к той нагрузке, которая образуется в результате работы конструкции с учетом случайных перегрузок, непредвиденных дефектов и недостоверности исходных данных σ).

Нормативный коэффициент запаса прочности $[n]$ не может быть единым для всех частных случаев механической нагрузки на металлические конструкции. В каждой отрасли машиностроения сложились свои подходы и методы проектирования. В изделиях общего машиностроения этот коэффициент принимают равным 1,3...2,2 для оценки по пределу текучести материала детали и 3...5 по пределу прочности.

Вероятность невыхода из строя приблизительно можно оценить с помощью коэффициента запаса для различных условий прочности, приведенных в таблице 2 [12].

Таблица 2 – Вероятность невыхода из строя деталей машин для соответствующих коэффициентов запаса прочности

Коэффициент запаса прочности по пределу текучести материала	Вероятность невыхода из строя, %
1	50,0
1,2	90,0
1,5	99,0
2	99,9

Коэффициенты запаса прочности по пределу текучести исследуемых элементов получены как отношения максимальных значений эквивалентного напряжения в конструкциях к пределу текучести материала (таблица 3).

Таблица 3 – Расчетные коэффициенты запаса по пределу текучести исследуемых элементов

Элемент станда	Коэффициент запаса прочности по пределу текучести
Упор	1,96
Кронштейн	4,00
Тяга	2,45

В результате анализа полученных расчетных коэффициентов запаса прочности установлено, что минимальное значение составило 1,96 – для упора. Учитывая соответствующую вероятность 99,9 % невыхода из строя детали (см. таблицу 2), можно сделать вывод о том, что конструкция элементов станда обладает достаточной прочностью.

Расчеты на прочность с использованием метода конечных элементов показали, что конструкция станда обладает достаточной прочностью.

Разработанный стенд позволит проводить испытания с целью верификации полученной расчетным методом зависимости частот колебаний рельса от приложенного к нему продольного усилия растяжения и сжатия, а также для апробирования предлагаемого метода оценки продольного усилия в рельсе при его температурном расширении.

Список литературы

1. ГОСТ Р 55056–2012. Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 50 с. – Текст : непосредственный.
2. Бромберг, Е. М. Устойчивость бесстыкового пути. – Москва : Транспорт, 1966. – 67 с. – Текст : непосредственный.
3. Об утверждении и введении в действие инструкции по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ: распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2540р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – Текст : непосредственный.
4. Суслов, О. А. Функциональная безопасность эксплуатации бесстыкового пути : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Суслов Олег Александрович ; Науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта. – Москва, 2017. – 241 с. – Текст : непосредственный.
5. Патент № 2670723 С9 Российская Федерация, МПК G01L 1/00 (2006.01). Способ определения напряженно-деформированного состояния различных упругих объектов : № 2017144958 : заявлено 21.12.2017 : опубликовано 15.11.2018 / Бидуля А. Л., Волохов Г. М., Овечников М. Н., Панин Ю. А., Пономарев А. С., Чунин С. В., Шабуневич В. И.; заявитель АО «ВНИКТИ». – 9 с. – Текст : непосредственный.
6. Коссов, В. С. Расчетное исследование собственных частот и форм колебаний рельса / В. С. Коссов, А. А. Лунин, С. В. Чунин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 76–85.
7. ГОСТ 33320–2015. Шпалы железобетонные для железных дорог. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 39 с. – Текст : непосредственный.
8. ГОСТ 16277–2016. Подкладки раздельного скрепления железнодорожных рельсов типов Р50, Р65 и Р75. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 20 с. – Текст : непосредственный.
9. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с изменением №1). – Москва : Стандартинформ, 2014. – 121 с. – Текст : непосредственный.
10. ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 8 с. – Текст : непосредственный.
11. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – Москва : Стройиздат, 1982. – 447 с. – Текст : непосредственный.
12. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – Москва : Машиностроение, 1993. – 640 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Transport zheleznodorozhnyy. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya, GOST R 55056-2012* (Railway transport. Basic concepts. Terms and definitions, National Standard 55056-2012). Moscow: Standartinform, 2013, 50 p.

2. Bromberg Ye. M. *Ustoychivost' besstykovogo puti* (Stability of a continuous welded rail track). Moscow: Transport Publ., 1966, 67 p.
3. *Ob utverzhdenii i vvedenii v deistvie instruksii po obespecheniiu bezopasnosti dvizheniya poezdov pri proizvodstve putevykh rabot: rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 14.12.2016 № 2540r* (On the approval and implementation of the instructions for ensuring the safety of train traffic during the production of track works: Order of JSC «Russian Railways» dated 14 December 2016 No. 2540r). Moscow, OAO «RZhD», 2016.
4. Suslov O.A. *Funktsional'naya bezopasnost' ekspluatatsii besstykovogo puti* (Functional safety of continuous welded rail track operation). Doctoral thesis, Moscow, VNIIZhT, 2017, 241 p.
5. Bidulya A.L., Volokhov G.M., Ovechnikov M.N., Panin Yu.A., Ponomarev A.S., Chudin S.V., Shabunovich V.I. *Patent RU 2670723*, 15.11.2018.
6. Kossov V. S., Lunin A. A., Chudin S. V. Computational study of natural frequencies and modes of rail vibrations [Raschetnoye issledovaniye sobstvennykh chastot i form kolebaniy rel'sa]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 76 – 85.
7. *Shpaly zhelezobetonnyye dlya zheleznykh dorog. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya, GOST 33320-2015* (Reinforced concrete sleepers for railways. General specifications, State Standard 33320-2015). Moscow, Standartinform, 2019, 39 p.
8. *Podkladki razdel'nogo skrepleniya zheleznodorozhnykh rel'sov tipov R50, R65 i R75. Tekhnicheskiye usloviya, GOST 16277-2016* (Plates for separate fastening of railway rails of types P50, P65 and P75. Specifications, State Standard 33320-2015). Moscow, Standartinform, 2019, 20 p.
9. *Rel'sy zheleznodorozhnyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya (s izmeneniyem №1), GOST R 51685-2013* (Railway rails. General specifications (with amendment No. 1), National Standard 51685-2013). Moscow, Standartinform, 2014, 121 p.
10. *Stal' uglerodistaya obyknovennogo kachestva. Marki, GOST 380-2005* (Carbon steel of an ordinary quality. Grades, State Standard 380-2005). Moscow: Standartinform, 2009, 8 p.
11. Bathe K., Wilson E. *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov* (Numerical methods in finite element analysis). Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 447 p.
12. Birger I. A., Shorr B. F., Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost' detaley mashin* (Strength calculation of machine parts). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993, 640 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савоськин Анатолий Николаевич

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

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

Доктор технических наук, профессор кафедры электропоездов и локомотивов.

Тел.: 8 (906) 59-48-88.

E-mail: elvechtrans@mail.ru

Лунин Андрей Александрович

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

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

Кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе.

Тел.: 8(496)618-05-99.

E-mail: lunin-aa@vnikti.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Savoskin Anatoly Nikolayevich

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian University of Transport» (MIIT).

9, b. 9, Obrazcova st., Moscow, City service post office-4, 127994, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department of Electric Trains and Locomotives.

Phone: 8 (906) 59-48-88.

E-mail: elvechtrans@mail.ru

Lunin Andrey Alexandrovich

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

410, Oktyabr'skoj revolyucii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Deputy Director General for Academic Affairs.

Phone: 8(496)618-05-99.

E-mail: lunin-aa@vnikti.com

Чунин Сергей Владимирович

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

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

Заведующий лабораторией АО «ВНИКТИ».

Тел.: 8(496)618-82-48, доб. 13-36.

E-mail: chunin-sv@vnikti.com

Chunin Sergey Vladimirovich

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

410, Oktyabr'skoj revolyucii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Head of Laboratory of JSC «VNIKTI».

Phone: 8(496)618-82-48, add. 13-36.

E-mail: chunin-sv@vnikti.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Савоськин, А. Н. Разработка стенда для проведения испытаний на рельсошпальной решетке / А. Н. Савоськин, А. А. Лунин, С. В. Чунин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 77 – 85.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Savoskin A. N., Lunin A. A., Chunin S. V. The development of a bench to perform tests on track panel. Journal of Transsib railway studies, 2021, no. 2 (46), pp. 77 – 85 (In Russian).

УДК 658.5: 656.259.12

М. М. Соколов, А. И. Давыдов

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

МИНИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ПОИСКА ОТКАЗОВ В АППАРАТУРЕ РЕЛЕЙНОГО КОНЦА СТАЦИОННОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ ТОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

Аннотация. В данной статье показываются преимущества использования условного алгоритма диагностирования с учетом сложности обследования для снижения времени поиска и устранения повреждений применительно к конкретной задаче поиска повреждения в аппаратуре релейного конца станционной тональной рельсовой цепи. В работе представлены рассчитанные условные вероятности, диагностические веса, частные и общие диагностические ценности обследований с учетом времени перемещения и проведения работы электромехаником. На основании проведенных вычислений составлен условный алгоритм диагностирования с учетом сложности обследования для аппаратуры релейного конца тональной рельсовой цепи. Показан эффект от применения указанного алгоритма. Результаты работы, приведенные в статье, могут быть использованы при техническом обслуживании систем автоматики действующих железных дорог.

Ключевые слова: рельсовая цепь, путевого приемник, генератор, диагностирование, алгоритм диагностирования, диагноз, диагностический признак.

Maxim M. Sokolov, Alexey I. Davydov

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

MINIMIZING THE SEARCH TIME FOR FAILURES IN RECEIVER END DEVICES OF TONAL TRACK CIRCUIT ON STATION

Abstract. The article deals with the possibility of applying diagnostic algorithms, taking into account the complexity of the examination, applied to a specific problem of searching for damage in receiver end of station's tonal track circuit. The article presents calculated conditional probabilities, diagnostic weights, particular and general diagnostic values of examinations, taking into account the time of movement and work by an electrician. Based on the calculations performed, a conditional diagnostic algorithm has been compiled, taking into account the complexity of the following for the equipment of the relay end of the tonal rail circuit. The effect of using this algorithm is shown. The results of the work given in the article can be used in the maintenance of automation systems of existing railways.

Keywords: track circuit, a track receiver, a generator, diagnosing, diagnosis algorithm, diagnostic indication.

Время проявления отказа в устройствах, обеспечивающих движение, а тем более влияющих на безопасность, является одним из основных факторов, приводящих к нарушению графика движения поездов. Снижение времени проявления повреждения может быть достигнуто

за счет применения специальных технологий обслуживания устройств, прогнозирования их состояния или оптимизации поиска отказавшего элемента [1, 2]. Последнее особенно важно для напольных устройств железнодорожной инфраструктуры, так как они располагаются на открытом воздухе в зоне воздействия целого ряда факторов: температура, освещенность, осадки и т. д. Эти же факторы могут воздействовать и на работника, которому необходимо в кратчайшие сроки локализовать и устранить отказ. В этих условиях особенно важным становится определение оптимальной последовательности действий при поиске отказа. Причем эта последовательность должна быть определена заранее, и при подходе к месту проведения процедуры поиска отказа работник должен четко ее понимать. Для решения этой задачи применяются алгоритмы диагностирования [3 – 6].

Первичную информацию об отказе в тональной рельсовой цепи (ТРЦ) электромеханик может получить на основании индикации на лицевых панелях путевого генератора (ГПЗ) и путевых приемников (ПП). В работах [6, 7] показано, что на основании этой индикации можно определить отказ в одном из основных элементов рельсовой цепи: аппаратуре питающего конца или релейного конца и т. д. Дальнейшее более точное определение места повреждения может потребовать перемещения электромеханика СЦБ с поста ЭЦ к напольному оборудованию. При этом неправильный выбор последовательности выполнения проверок может привести к превышению времени устранения отказа за счет излишних перемещений.

Локализация отказа аппаратуры ТРЦ требует от электромеханика СЦБ дополнительных действий, таких как проведение измерений, визуальная проверка элементов, изменение электрической схемы и т. п. При этом если для ряда диагнозов эти действия необходимо производить в одном месте (на посту ЭЦ) и отказ локализуется довольно быстро, то для других диагнозов часть действий по проверке гипотез необходимо выполнять на напольном оборудовании [8]. В данной ситуации неправильно выбранная последовательность действий приведет к большим временным затратам на перемещение и, как следствие, отразится на суммарном времени локализации и устранения отказа.

В работе [8] рассмотрено построение безусловного алгоритма диагностирования с условной остановкой и с учетом затрат времени на проведение обследования. Применение такого алгоритма позволяет сократить время поиска отказа уже при выборе первого действия электромеханика СЦБ. Вместе с тем полученная последовательность действий не является оптимальной с точки зрения затрачиваемого времени, так как на втором и последующих этапах проведения проверок она не учитывает информацию, полученную ранее.

В связи с этим для получения оптимальной последовательности проверок при локализации отказов в аппаратуре релейного конца станционных рельсовых цепей тональной частоты на втором и последующих этапах необходим пересчет общей диагностической ценности обследования по признаку в условиях изменившихся сложностей обследования (изменения местонахождения электромеханика) и учета информации, полученной на более ранних этапах.

На основании исходных данных и расчетов, приведенных в работе [8], рассмотрим построение условного алгоритма диагностирования с учетом сложности обследования для аппаратуры релейного конца станционной рельсовой цепи тональной частоты. Схема аппаратуры релейного конца ТРЦ и его части рельсовой линии приведена на рисунке 1.

Доступные электромеханику точки для проведения измерений согласно рисунку 1 следующие [8]:

- k_{31} – контакты клеммной колодки путевого приемника;
- k_{32} – клеммы кроссового статива;
- k_{33} – клеммы для подключения кабеля к трансформатору;
- k_{34} – выводы трансформатора для подключения к рельсам;
- k_{35} – рельсы на релейном конце РЦ;
- k_{36} – рельсы на протяжении рельсовой линии от релейного конца к питающему.

Представленная система на основании перечисленных точек, доступных для измерений, может находиться в следующих состояниях [8]:

- D_{31} – отказ ПП данного релейного конца;
 D_{32} – отказ постового оборудования от ПП до кроссового статива;
 D_{33} – отказ кабеля, соединяющего постовое и напольное оборудование;
 D_{34} – отказ трансформатора данного релейного конца;
 D_{35} – отказ устройств подключения трансформатора к рельсовой линии (перемычек);
 D_{36} – отказ элементов рельсовой линии до места измерения k_{36} ;
 D_{37} – отказ элементов рельсовой линии после места измерения k_{36} .

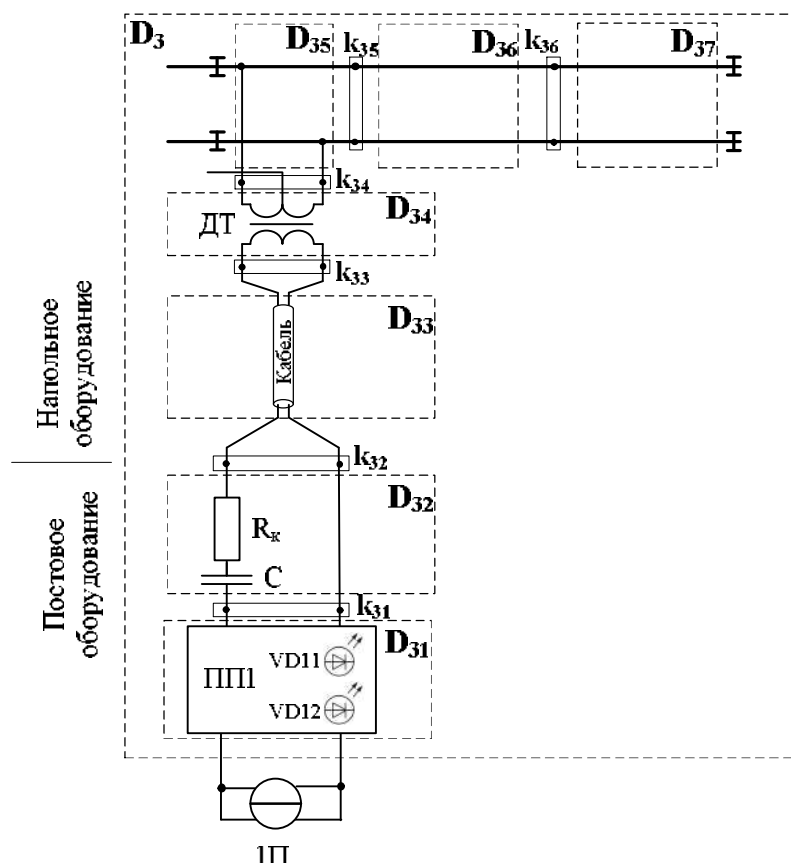


Рисунок 1 – Схема первого релейного конца тональной рельсовой цепи и его части рельсовой линии

Установление сложности обследования по диагностическому признаку (C_j) в зависимости от местонахождения электромеханика приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Усредненные затраты времени (сложность) обследований по диагностическому признаку

Откуда	Куда	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}	k_{35}	k_{36}
Начало		1	3	13	10	10	15
k_{31}			3	13	10	10	15
k_{32}		3		13	10	10	15
k_{33}		13	13		1	1	5
k_{34}		10	10	4		1	5
k_{35}		10	10	4	1		5
k_{36}		15	15	7	5	5	

После расчета условных вероятностей, информационного веса реализации диагностических признаков и общих диагностических ценностей без учета ($S_D(k_j)$) и с учетом сложности обследования ($S_D(k_j)'$) были получены результаты, приведенные в таблице 2 [8].

Таблица 2 – Значения диагностических ценностей с учетом сложности обследования

Признак	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}	k_{35}	k_{36}
$S_D(k_j)$	0,739	0,882	1,015	0,994	0,948	0,868
C_j , мин	1	3	13	10	10	15
$S_D(k_j)'$	0,739	0,294	0,078	0,099	0,095	0,058

По данным таблицы 2 видно, что наибольшее количество информации о состоянии аппаратуры релейного конца ТРЦ в единицу времени может быть получено при оценке признака k_{31} (контакты клеммной колодки путевого приемника).

Далее необходимо определить, какой из диагностических признаков является наиболее информативным с учетом полученной реализации признака k_{31} . Поставленная задача может быть решена путем вычисления условного диагностического веса, частной и общей диагностической ценности. Условный диагностический вес признаков может быть определен по выражению [3, 4, 7].

$$Z_{Di}(k_{2P} / k_{1S}) = \log_2 \frac{P(k_{2P} / D_i k_{1S})}{P(k_{2P} / k_{1S})}, \quad (1)$$

где k_{1S} – реализация S первого (по порядку) признака;

k_{2P} – реализации P второго (по порядку) признака;

$P(k_{2P} / D_i k_{1S})$ – условная вероятность появления признака k_{2P} для объектов с диагнозом D_i и реализацией признака k_{1S} ;

$P(k_{2P} / k_{1S})$ – условная вероятность появления признака k_{2P} для объектов с реализацией признака k_{1S} .

Общая диагностическая ценность обследования по признаку k_{2P} при условии, что результаты обследования по признаку k_{1S} известны (признак получил реализацию), с учетом всех возможных реализаций признака k_S может быть найдена по выражению

$$S_D(k_{2P} / k_{1S}) = \sum_{i=1}^n P(D_i / k_{1S}) Z_{Di}(k_{2P} / k_{1S}), \quad (2)$$

где частная условная диагностическая ценность обследования по признаку k_P для диагноза D_i определяется уравнением

$$Z_{Di}(k_{2P} / k_{1S}) = \sum_{\rho=1}^m P(k_{2P} / D_i k_{1S}) \log_2 [P(k_{2P} / D_i k_{1S}) / P(k_{2P} / k_{1S})]. \quad (3)$$

Общая диагностическая ценность обследования по признаку k_{2P} с учетом сложности обследования C_{SP} (см. таблицу 1) рассчитывается по формуле [4]

$$S_D(k_{2P} / k_{1S})' = \frac{S_D(k_{2P} / k_{1S})}{C_{SP}}. \quad (4)$$

В соответствии с исходными данными и алгоритмом диагностирования, приведенным на рисунке 3 работы [8], при реализации признака $k_{31} = 1$ дальнейшие проверки не требуются, так как однозначно определяется диагноз D_1 . Для случая реализации признака $k_{31} = 0$ была заполнена таблица 3.

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее количество информации о состоянии исследуемого объекта в единицу времени при условии, что признак $k_{31} = 0$, может

быть получено при оценке признака k_{32} (клеммы кроссового статива). Это обусловлено тем, что проще и логичнее пройти в кроссовое помещение и провести измерения, чем перемещаться к напольному оборудованию.

При единичной реализации данного признака выявляется диагноз D_{32} и алгоритм диагностирования прерывается.

Таблица 3 – Значения частных и общих диагностических ценностей признаков

Признак			k ₃₂	k ₃₃	k ₃₄	k ₃₅	k ₃₆
D ₃₂	P(D ₃₂ / $\overline{k_{31}}$) = 0,125	P(k _j /D ₃₂ $\overline{k_{31}}$)	1	1	1	1	1
		P(k _j /D ₃₂ $\overline{k_{31}}$)	0	0	0	0	0
		Z _{D32} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	2,585	1,585	1	0,585	0,485
		Z _{D32} (k/ $\overline{k_{31}}$)	0	0	0	0	0
		S _{D32} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	2,585	1,585	1	0,585	0,485
D ₃₃	P(D ₃₃ / $\overline{k_{31}}$) = 0,25	P(k _j /D ₃₃ $\overline{k_{31}}$)	0	1	1	1	1
		P(k _j /D ₃₃ $\overline{k_{31}}$)	1	0	0	0	0
		Z _{D33} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0	1,585	1	0,585	0,485
		Z _{D33} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0,263	0	0	0	0
		S _{D33} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0,263	1,585	1	0,585	0,485
D ₃₄	P(D ₃₄ / $\overline{k_{31}}$) = 0,063	P(k _j /D ₃₄ $\overline{k_{31}}$)	0	0	1	1	1
		P(k _j /D ₃₄ $\overline{k_{31}}$)	1	1	0	0	0
		Z _{D34} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0	0	1	0,585	0,485
		Z _{D34} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0,263	0,585	0	0	0
		S _{D34} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0,263	0,585	1	0,585	0,485
D ₃₅	P(D ₃₅ / $\overline{k_{31}}$) = 0,125	P(k _j /D ₃₅ $\overline{k_{31}}$)	0	0	0	1	1
		P(k _j /D ₃₅ $\overline{k_{31}}$)	1	1	1	0	0
		Z _{D35} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0	0	0	0,585	0,485
		Z _{D35} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0,263	0,585	1	0	0
		S _{D35} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0,263	0,585	1	0,585	0,485
D ₃₆	P(D ₃₆ / $\overline{k_{31}}$) = 0,125	P(k _j /D ₃₆ $\overline{k_{31}}$)	0	0	0	0	1
		P(k _j /D ₃₆ $\overline{k_{31}}$)	1	1	1	1	0
		Z _{D36} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0	0	0	0	0,485
		Z _{D36} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0,263	0,585	1	1,585	0
		S _{D36} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0,263	0,585	1	1,585	0,485
D ₃₇	P(D ₃₇ / $\overline{k_{31}}$) = 0,312	P(k _j /D ₃₇ $\overline{k_{31}}$)	0	0	0	0	0
		P(k _j /D ₃₇ $\overline{k_{31}}$)	1	1	1	1	1
		Z _{D37} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0	0	0	0	0
		Z _{D37} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0,263	0,585	1	1,585	1,807
		S _{D37} (k _j / $\overline{k_{31}}$)	0,263	0,585	1	1,585	1,807
P(k _j / $\overline{k_{31}}$)			0,17	0,33	0,50	0,67	0,71
S _D (k _j / $\overline{k_{31}}$)			0,553	0,960	1,000	1,023	0,898
C, мин			3	13	10	10	15
S _D '(k _j / $\overline{k_{31}}$)'			0,184	0,074	0,100	0,102	0,060

При нулевой реализации признака k_{32} необходимо заново рассчитать условный диагностический вес признаков, общую диагностическую ценность обследования и частную условную диагностическую ценность обследования при известной реализации двух признаков ($k_{31} = 0$, $k_{32} = 0$) по соответствующим формулам [4, 7]. Эти формулы в целом аналогичны формулам (1) – (4).

В таблице 4 приведены результаты расчета общих диагностических ценностей обследования по признакам, без указания результатов промежуточных вычислений.

Таблица 4 – Значения общих диагностических ценностей признаков при условии реализации признаков $k_{31} = 0$, $k_{32} = 0$

Признак	k_{33}	k_{34}	k_{35}	k_{36}
$S_D(k_j / \overline{k_{31} k_{32}})$	0,208	0,208	0,918	0,918
$C, \text{ мин}$	13	10	10	15
$S_D'(k_j / \overline{k_{31} k_{32}})'$	0,077	0,095	0,103	0,069

По результатам расчета видно, что на третьем этапе составления алгоритма диагностирования при известной реализации двух признаков ($k_{31} = 0$, $k_{32} = 0$) необходимо проводить обследование по признаку k_{35} .

В дальнейшем определение наиболее оптимальной проверки на определенном этапе диагностирования производится аналогично.

В таблицах 5 – 7 приведены результаты расчета общих диагностических ценностей, обследования по признакам с учетом сложности обследования, необходимых для построения алгоритма диагностирования. В таблице заливкой ячейки выделено значение, необходимое для выбора следующей проверки.

Таблица 5 – Значения общих диагностических ценностей признаков при условии реализации признаков $k_{31} = 0$, $k_{32} = 0$, $k_{35} = 1$

Признак	k_{33}	k_{34}	k_{36}
$S_D(k_j / \overline{k_{31} k_{32} k_{35}})$	1,156	0,871	0
$C, \text{ мин}$	4	1	5
$S_D'(k_j / \overline{k_{31} k_{32} k_{35}})'$	0,289	0,871	0

Таблица 6 – Значения общих диагностических ценностей признаков при условии реализации признаков $k_{31} = 0$, $k_{32} = 0$, $k_{35} = 0$

Признак	k_{33}	k_{34}	k_{36}
$S_D(k_j / \overline{k_{31} k_{32} k_{35}})$	0	0	1
$C, \text{ мин}$	4	1	5
$S_D'(k_j / \overline{k_{31} k_{32} k_{35}})'$	0	0	0,2

Таблица 7 – Значения общих диагностических ценностей признаков при условии реализации признаков $k_{31} = 0$, $k_{32} = 0$, $k_{35} = 1$, $k_{34} = 1$

Признак	k_{33}	k_{36}
$S_D(k_j / \overline{k_{31} k_{32} k_{35} k_{34}})$	0,99	0
$C, \text{ мин}$	4	5
$S_D'(k_j / \overline{k_{31} k_{32} k_{35} k_{34}})'$	0,25	0

Граф условного алгоритма диагностирования с учетом сложности обследования, полученный на основании данных таблиц 2 – 7, представлен на рисунке 2, б. Для сравнения на рисунке

2, а приведен граф безусловного алгоритма диагностирования с учетом сложности обследования [8].

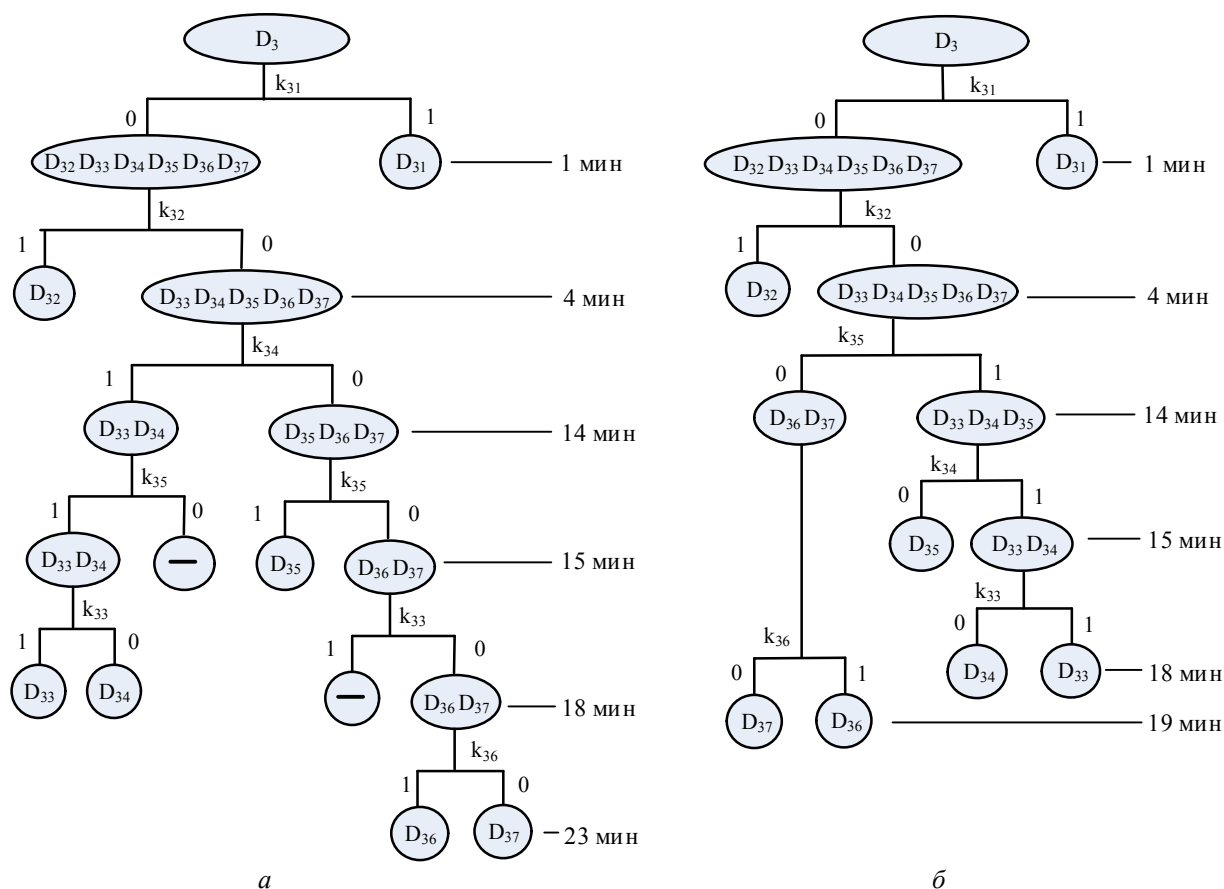


Рисунок 2 – Безусловный (а) и условный (б) алгоритмы диагностирования технического состояния аппаратуры релейного конца ТРЦ с учетом сложности обследования

Полученный условный алгоритм по отношению к безусловному алгоритму [8] имеет следующие отличия (преимущества).

1. Сократилось максимальное количество этапов диагностирования (пять против шести) за счет исключения ненужных действий.
2. Достигнуто снижение максимального времени, требуемого для определения диагноза (19 мин против 23 мин) за счет отсутствия необязательных проверок.
3. На каждом этапе диагностирования учитывается фактическое местоположение электро-механика с целью исключения ненужных перемещений.
4. Выбор признака, подлежащего обследованию на каждом этапе, зависит от информации, полученной на предыдущих этапах. Например, на четвертом этапе в одном случае это k_{34} , в другом – k_{36} .

Условный алгоритм диагностирования с учетом сложности обследования позволяет учитывать информацию, получаемую на предыдущих этапах, а также сложность проведения обследования, что позволяет получить результат диагностирования за наименьшее время по сравнению с другими видами алгоритмов.

Список литературы

1. Соколов, М. М. Совершенствование технологии обслуживания станционных рельсовых цепей / М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 3 (27). – С. 124–132.

2. Соколов, М. М. Контроль состояния системы электроснабжения устройств железнодорожной автоматики : монография / М. М. Соколов. – Саарбрюккен : Lambert Academic Publishing, 2012. – 161 с. – Текст : непосредственный.
3. Сапожников, В. В. Основы технической диагностики : учебное пособие / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2004. – 316 с. – Текст : непосредственный.
4. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – Москва : Машиностроение, 1978. – 240 с. – Текст : непосредственный.
5. Иванова, Е. Г. Построение алгоритма проверки технического состояния устройств числовой кодовой автоблокировки / Е. Г. Иванова, Г. В. Ларионов, С. Л. Лисин. – Текст : непосредственный // Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте : сб. науч. тр. – Иваново : ООО «Научный мир», 2010. – Т. 1. – № 2. – С. 26–28.
6. Соколов, М. М. Построение безусловного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты / М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 1 (33). – С. 139–145.
7. Соколов, М. М. Построение условного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты / М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 2 (34). – С. 150–158.
8. Соколов, М. М. Локализация отказов в аппаратуре релейного конца станционных рельсовых цепей тональной частоты / М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 3 (39). – С. 118–125.
9. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных дорог : справочник / В. С. Аркатов. – Москва : ООО «Миссия-М», 2006. – 496 с. – Текст : непосредственный.
10. Сороко, В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справочник : в 4 книгах / В. И. Сороко, Ж. В. Фоткина. – Москва : ООО «НПФ «Планета», 2013. – Кн. 1. – 1060 с. – Текст : непосредственный.
11. Ларионов, Г. В. Построение алгоритмов диагностирования аппаратуры числовой кодовой автоблокировки на основе информационной ценности признаков / Г. В. Ларионов, С. Л. Лисин. – Текст : непосредственный // Эффективность и безопасность работы электротехнических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте : межвуз. темат. сб. науч. тр. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – С. 32–38.

References

1. Sokolov M. M. Improvement of technology service of station track circuits railway automation [Sovershenstvovanie tehnologii obsluzhivaniya stancionnykh rel'sovykh tsepej]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 3 (27), pp. 124–132.
2. Sokolov M. M. *Kontrol' sostoiianiia sistemy elektrosnabzheniia ustroystv zheleznodorozhnoi avtomatiki: monografiia* (Monitoring of the state of the power supply system of railway automation devices : monograph). Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2012, 161 p.
3. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. *Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki* (Basics of technical diagnostics). Moscow: Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniiu na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2004, 316 p.
4. Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978, 240 p.
5. Ivanova E. G., Larionov G. V., Lisin S. L. Construction of an algorithm for checking the technical state of the devices of a numerical code lock [Postroenie algoritma proverki tekhnicheskogo sostoiianiia ustrojstv chislovoj kodovoj avtoblokirovki]. *Perspektivnye innovatsii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte : sbornik nauchnykh trudov* (Promising innovations in science, education, production and transport : collection of scientific papers). – Ivanovo, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 26–28.
6. Sokolov M. M. Construction of unconditional algorithm for diagnostics of tonal rail circuits on station [Postroenie uslovnogo algoritma diagnostirovaniya stantsionnykh rel'sovykh tsepej]

tonal'noj chastoty]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 1 (33), pp. 139–145.

7. Sokolov M. M. Construction of conditional algorithm for diagnostics of tonal rail circuits on station [Postroenie uslovnogo algoritma diagnostirovaniya stantsionnykh rel'sovykh tsepej tonal'noj chastoty]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 2 (34), pp. 150–158.

8. Sokolov M. M. Search for failures of receiver end devices of tonal rail circuits on station [Lokalizacija otkazov v apparature relejnogo konca stacionnykh rel'sovykh tsepej tonal'noj chastoty]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 3 (39), pp. 118–125.

9. Arkatov V. S. *Rel'sovye cipi magistral'nyh dorog* [Railways of main roads]. Moscow: ООО «Missiia-M» Publ., 2006, 496 p.

10. Soroko V. I., Fot'kina Zh. V. *Apparatura zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki* [Railway automation and telemechanics equipment]. Moscow: ООО «NPF «PLANETA» Publ., 2013, vol. 1, 1060 p.

11. Larionov G. V., Lisin S. L. The construction of algorithms for diagnosing the hardware of a numerical code lock on the basis of the information value of the signs [Postroenie algoritmov diagnostirovaniya apparatury chislovoj kodovoj avtoblokirovki na osnove informacionnoj cennosti priznakov]. *Effektivnost' i bezopasnost' raboty elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte: mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov* (Efficiency and safety of electrical complexes and automation and telemechanics systems in railway transport: interuniversity thematic collection of scientific papers). – Omsk, 2011, pp. 32–38.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколов Максим Михайлович

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) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

Давыдов Алексей Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и компьютерная графика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-28-47.

E-mail: DavydovAI@bk.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Соколов, М. М. Минимизация времени поиска отказов в аппаратуре релейного конца станционной рельсовой цепи тональной частоты / М. М. Соколов, А. И. Давыдов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 85 – 93.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sokolov Maxim Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railway Signaling and Interlocking», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

Davydov Alexey Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Informatics and computer graphics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-28-47.

E-mail: DavydovAI@bk.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sokolov M. M., Davydov A. I. Minimizing the search time for failures in receiver end devices of tonal track circuit on station. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 85 – 93 (In Russian).

УДК 625.1:625.7

Е. А. Кравченко¹, А. Л. Исаков², Ц. Лю³, С. Ли⁴

¹ Гонконгский университет науки и технологий (HKUST), Гонконг, САР КНР;

² Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация;

³ Университет имени Сунь Ятсена, г. Чжухай, КНР;

⁴ Пекинский транспортный университет, г. Пекин, КНР

ПРОБЛЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНЫХ И АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В ХОЛОДНЫХ РЕГИОНАХ КИТАЯ

Аннотация. Основной инженерной проблемой, связанной с деградацией вечной мерзлоты и циклическим промерзанием-оттаиванием сезонной мерзлоты, является снижение несущей способности инженерных сооружений за счет деградации основных физико-механических свойств грунтов насыпи и основания. Циклическое изменение температуры приводит к регулярному промерзанию-оттаиванию грунта, в результате чего происходят такие виды деформаций, как пучение при промерзании и осадка при оттаивании. Целью данной работы является освещение новых сведений о комплексных мероприятиях по стабилизации земляного полотна железных и автомобильных дорог в холодных регионах Китая. В работе рассмотрены такие меры, как термосифонная стабилизация, каменная наброска, установка вентиляционных труб и укладка термоизоляционных плит, а также описываются недостатки существующих мер стабилизации температурного режима насыпи и ее основания. Рассмотрена основная транспортная сеть Цинхай-Тибетского плато, включающая в себя железную дорогу Цинхай-Тибет и четыре автомагистрали. В качестве объекта исследования численного моделирования был выбран экспериментальный участок скоростной автомагистрали Ушю-Синин на Цинхай-Тибетском плато; проведен численный расчет температурных полей и полей объемной влажности грунтов насыпи и ее основания для типового сечения насыпи и насыпи с каменной наброской на 10-й год эксплуатации. Расчеты проводились на базе программного комплекса «Freeze-Cold», специально разработанного для инженерных расчетов процесса промерзания и оттаивания грунтов. Расчет показал, что каменная наброска позволяет снизить площадь оттаивания грунта, поднимая верхнюю границу мерзлого грунта, способствует снижению деградации мерзлого грунта, что в конечном итоге положительно сказывается на несущей способности всего инженерного сооружения. Анализ собранных данных и результатов расчета позволяет сделать вывод об эффективности применения каменной наброски толщиной 0,8 м в качестве теплоизолирующего материала для поддержания стабильности теплового режима насыпи на мерзлом грунте в рассматриваемом регионе Цинхай-Тибетского плато.

Ключевые слова: дорожное строительство, вечная мерзлота, земляное полотно, методы стабилизации, численное моделирование.

Ekaterina A. Kravchenko¹, Aleksandr L. Isakov², Jiankun Liu³, Xu Li⁴

¹ The Hong Kong University of Science and Technology (HKUST), Hong Kong, Special Administrative Region, China;

² Siberian Transport University, Novosibirsk, the Russian Federation;

³ Sun Yat-Sen University, Zhuhai, China;

⁴ Beijing Jiaotong University, Beijing, China

PROBLEMS OF STABILIZING THE SUBGRADE OF RAILWAYS AND HIGHWAYS IN COLD REGIONS OF CHINA

Abstract. The main engineering problem associated with the degradation of permafrost and cyclic freezing-thawing of seasonal permafrost soils is a decrease in the bearing capacity of engineering structures due to the degradation of the main physical-mechanical properties of the embankment soils. The cyclical change in temperature leads to regular freezing-thawing of the soil, as a result of which such types of deformations occur as heaving during freezing and settlement during thawing. The purpose of this work is to highlight new information about complex measures to stabilize the subgrade of railways and highways in the cold regions of China. The paper considers such measures as thermosiphon stabilization, rock fill, installation of ventilation pipes and laying of thermal insulation boards. This paper also describes the disadvantages of existing measures for stabilizing the temperature regime of the embankment and its base. Considered the main transport network of the Qinghai-Tibet plateau, including the Qinghai-Tibet railway and four highways. The experimental section of the Wushu-Xining expressway on the Qinghai-Tibet plateau was chosen as the object of the study of numerical modeling; a numerical calculation of the temperature and moisture content fields of the typical embankment was carried out, as well as numerical calculation of the embankment with rock fill for the 10th year of operation. The calculations were carried out on the basis of the «Freeze-Cold» software package specially developed for engineering calculations of the freezing and thawing process in soils. The calculation showed that rock fill allows to reduce the area of the soil thawing, raising the front of frozen soil, helps to reduce the degradation of frozen soil, which ultimately has a

positive effect on the bearing capacity of the entire engineering structure. Analysis of the collected data and calculated values allows to conclude that the use of rock fill of 0,8 meters depth as an insulating material to maintain the stability of the thermal regime of the embankment on frozen ground in the considered region of the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: road construction, permafrost, subgrade, stabilization methods, numerical model.

Для масштабного хозяйственного освоения холодных регионов Китая уже эксплуатируется и продолжает развиваться транспортный каркас, состоящий из Цинхай-Тибетской железной дороги и стратегических автомобильных дорог Цинхай-Тибет, Сычуань-Тибет, Синьцзян-Тибет и высокоскоростной автомобильной дороги Гонгюй. Согласно планам развития сети высокоскоростных железных дорог Китая «Восемь вертикалей» и «Восемь горизонталей» (рисунк 1), протяженность высокоскоростной железной дороги увеличится до 50 тыс. км. Китайская инициатива «Шелковый путь», включающая в себя строительство железной дороги в регионах вечной и сезонной мерзлоты, является основополагающим проектом в направлении развития интеграции евразийских стран. Именно по причине экономической и социальной важности ведения полноценной деятельности в регионе проектирования «Шелкового пути» в последнее время применяются инновационные технологичные решения и усовершенствуются уже имеющиеся меры по стабилизации земляного полотна в суровых климатических условиях.

Примерно 23 % от общемировой площади суши составляют мерзлые грунты. Площадь сезонномерзлых грунтов Китая составляет 53,5 % от площади суши страны. Большая часть мерзлого грунта в Китае представлена высокотемпературным мерзлым грунтом низких и высоких широт Цинхай-Тибетского плато и мерзлым грунтом низких и средних широт на северо-востоке страны. Формирование Цинхай-Тибетского плато в основном связано со столкновением и сжатием континентальных плит Евразии и Индии. Из-за последовательных поднятий Цинхай-Тибетское плато стало самым большим и самым молодым плато на Земле. Геотехническое районирование КНР характеризуется еще и тем, что Цинхай-Тибетское плато – это центральная часть территории, которая с запада на восток ступенчато понижается и соединяется с впадиной Тихого океана [2]. По сравнению с вечной мерзлотой в высоких широтах Северо-Восточного Китая, Сибири и Северной Америки вечная мерзлота на Цинхай-Тибетском плато имеет выраженную нестабильность и более сильную реакцию на климатические изменения [1].



Рисунок 1 – Карта проекта «Восемь горизонталей» (а) и «Восемь вертикалей» (б)

Цинхай-Тибетская железная дорога считается самой длинной на нагорье и самой высокогорной железной дорогой в мире. Она соединяет г. Синин в провинции Цинхай и г. Лхаса в Тибетском автономном районе. Общая длина железнодорожной линии составляет 1956 км, а средняя высота – свыше 4000 м над уровнем моря. Строительство этой железной дороги успешно решило три основные задачи строительства железных дорог в мире: строительство

железной дороги на мерзлом грунте; работа в условиях высокогорной гипоксии; защита уникальной окружающей среды.

Первая задача включает в себя технологические решения на этапе проектирования и строительства, а также мероприятия по стабилизации земляного полотна после введения в эксплуатацию. Исследования вечной мерзлоты на Цинхай-Тибетской железной дороге основаны на опыте строительства на мерзлых грунтах автомобильной дороги Цинхай-Тибет, нефтепровода Цинхай-Тибет, прокладки магистральной оптической кабельной линии Ланьси [3]. В настоящее время китайскими учеными были приняты следующие меры:

замена наземного расположения железной дороги «сухими мостами» – эстакадными переходами (рисунок 2), что, с одной стороны, позволяет избежать строительства насыпей на трудностабилизируемых льдистых участках местности и, с другой стороны, способствует беспрепятственной миграции животных и произрастанию растительности;

вентилируемое земляное полотно, реализованное вентилируемыми трубами с автоматическими или механическими затворами. Закладка гофрированных труб в тело насыпи способствует увеличению поверхности контакта между воздухом и телом насыпи, что дает возможность климатическим характеристикам Цинхай-Тибетского плато достичь цели активного охлаждения фундамента вечной мерзлоты. Полевые испытания показывают, что вентиляционная труба должна быть установлена в нижней части земляного полотна на расстоянии $1 \sim 1,5$ м от поверхности земли, а расстояние между трубами должно составлять $1,6 \sim 2,0$ м при диаметре трубы $0,3 \sim 0,4$ м;



а



б

Рисунок 2 – Эстакадный участок Цинхай-Тибетской железной дороги

защита откосов земляного полотна каменной наброской, способствующей активному снижению температуры вечной мерзлоты и одновременно регулирующей асимметрию температуры искусственной верхней границы земляного полотна. Поскольку солнечный склон насыпи поглощает больше тепла, чем тенистый склон, что приводит к разной глубине залегания вечной мерзлоты на склоне насыпи, то осадка солнечного склона больше, чем у тенистого, что в итоге вызывает наклон насыпи и образование продольных трещин. Каменная наброска на откосах насыпи участка вечной мерзлоты Цинхай-Тибетской железной дороги представлена на рисунке 3;



а



б

Рисунок 3 – Каменная наброска на откосах насыпи железной дороги

Термосифоны – устройства для терморегуляции грунта с помощью теплоносителя, циркулирующего под действием силы тяжести. В условиях вечной мерзлоты термосифон решает главную задачу охлаждения массива многолетнемерзлого грунта. Установка термосифонов происходит как вертикально, так и под углом к вертикальной оси (рисунок 4).

Таким образом, решение первой задачи затрудненного строительства сводится к комплексу мер по стабилизации земляного полотна с помощью различных инженерных решений.

Во время строительства железной дороги с 2001 по 2005 г. приблизительно 140 тыс. рабочих должны были работать в условиях сильной гипоксии [4]. Решение второй задачи – нехватки кислорода, которая влияет на работу персонала, свелось к регулярным поставкам на плато больших кислородных генераторов, чтобы обеспечить достаточным количеством кислорода рабочую бригаду, строившую туннели Цинхай-Тибетской железной дороги. В то время содержание кислорода в тоннелях было эквивалентно содержанию кислорода на высоте 1000 м над уровнем моря.



Рисунок 4 – Термосифоны на экспериментальных участках железных дорог Китая:
а – наклонные термосифоны; б – вертикальные термосифоны, установленные в два ряда

Что касается третьей задачи, то Китайская Народная Республика инвестировала более 2 млрд юаней только в охрану окружающей среды, что составляет 8 % от общего объема инвестиций в проект. В 2008 г. проект Цинхай-Тибетской железной дороги был оценен Министерством охраны окружающей среды как «Экологически безопасный национальный проект» [5]. Охрана окружающей среды в зоне инженерных сооружений и полосе отвода осуществляется специально учрежденным органом экологического надзора. На основе дистанционного зондирования и базы географических информационных технологий, при поддержке программного обеспечения дистанционного зондирования ERDAS, ENVI, IDL и программного обеспечения GIS ARCGIS, основанного на продукте индекса растительности GIMMS-NDVI спутника NOAA США и MODIS-NDVI данных EOS, MODIS-LST и радарного спутника периодически дается оценка состояния растительного покрова и миграции животных как вдоль Цинхай-Тибетской железной дороги, так и Цинхай-Тибетского плато в целом [6].

Три автомобильные дороги Цинхай-Тибет, Сычуань-Тибет, Синьцзян-Тибет и скоростная автомагистраль Гонгюй создают базовый каркас автомобильной транспортной сети в холодном регионе Китая. По данным 30-летних наблюдений и исследований на автодороге Цинхай-Тибет проанализированы основные типы и характеристики заболеваний земляного полотна и слоев дорожной одежды в районах вечной мерзлоты в разные периоды времени. Анализ заболеваний земляного полотна выявил, что на фоне глобального потепления температура подстилающего мерзлого грунта под слоями дорожной одежды поднимается, верхняя граница мерзлого грунта опускается и в итоге мерзлый грунт деградирует и разупрочняется [7]. 528 км

трассы Цинхай-Тибет пересекает район вечной мерзлоты на Цинхай-Тибетском плато, половина протяженности этого участка подвержена периодическому неравномерному замерзанию-оттаиванию земляного полотна, вызванному эффектом «солнечно-тенистого склона», особенно в регионе Южный Танглах. Исследования показали, что до 60 % повреждений имели асимметричный характер, в основном включающий в себя неравномерную деформацию при оттаивании и продольные трещины [8]. Для снижения уровня воздействия солнечного тепла и антропогенного воздействия при строительстве земляного полотна автодороги Цинхай-Тибет использовались теплоизоляционные пенополистирольные плиты, которые способствуют сдерживанию деградации мерзлого грунта [9]. Для повышения морозоустойчивости дорожного покрытия применяются также специальные присадки к асфальтовым смесям и армирующие материалы для предотвращения появления трещин.

Как при стабилизации земляного полотна железной дороги Цинхай-Тибет, так и на одноименной автодороге применяются термосифоны для активного замораживания грунта в зимний период ниже границы сезонного оттаивания-промерзания там, где сформировались так называемые талики – области талого грунта, не замерзающего в холодное время года [10]. Термосифоны устанавливаются только на особо проблемных участках и часто несут практическую пользу и служат исследовательской базой для многих ученых. Так, группа ученых изучила влияние угла наклона установки термосифона и расстояния между термосифонами на конечный результат температурных полей земляного полотна, а также создала ряд численных прогнозных моделей изменения температурного режима земляного полотна и его основания [11]. Результаты численного моделирования показывают хорошую сходимость с натурными полевыми исследованиями. Эти результаты также свидетельствуют о том, что использование двухфазных закрытых термосифонов в сочетании с другими инженерными методами, такими как теплоизоляционные плиты, каменная наброска и т. д., может быть более эффективным инженерным решением для обеспечения стабильности земляного полотна в регионах с неравномерной деградацией вечной мерзлоты.

Синьцзян-Тибетское шоссе, соединяющее Йеченг, Синьцзян и Лхасу, протяженностью 2269 км поднимается на пять гор высотой более 5 тыс. м, на 44 ледника и проходит сотни километров по нейтральной полосе. Согласно анализу данных трудностями эксплуатации проектов в гористой местности являются сильное обледенение проезжей части, обочин и откосов земляного полотна, селевые потоки, оползни и обвалы [12]. На железных дорогах КНР также широко применяются гравитационные подпорные стены, а для решения геотехнических задач появился ряд новых удерживающих сооружений: подпорные стены с анкерными плитами, подпорные стены на свайных фундаментах, армирогрунтовые подпорные сооружения, подпорные стены с предварительно напряженными якорными канатами и укрепление откосов решетчатыми покрытиями [13]. На данных линиях удерживающие сооружения применяются в комплексе с усиленными мерами по водоотведению и снегоочистке, а также теплоизоляционными материалами на участках мерзлого грунта с угрозой деградации.

Численное моделирование изменения температурных полей насыпи с использованием каменной наброски. В качестве объекта для численного моделирования был выбран экспериментальный участок скоростной автомагистрали Ушу-Синин на Цинхай-Тибетском плато. 227,7 км этой трассы проходит в районе вечной мерзлоты, большая часть которой представляет собой высокотемпературную нестабильную вечную мерзлоту. По данным метеостанции с 1999 по 2018 г. известно, что максимальная скорость ветра составляет 34 м/с, а среднегодовая – 3,2 м/с; направление ветра в основном северо-западное; среднегодовое и максимальное годовое количество осадков составляет 323,7 и 585,5 мм соответственно [15]. Максимальная толщина снежного покрова на открытом пространстве с учетом выдувания ветром – 0,2 м. При этом основную проблему создают снежные отложения, скапливающиеся с подветренной стороны дорожной насыпи, способствующие деградации многолетнемерзлых грунтов основания земляного полотна за счет отепляющего эффекта.

Расчетная модель представляет собой насыпь высотой 3,5 м с отсыпкой земляного полотна наполнителем групп А-В по классификации грунтов КНР. Такие наполнители представляют собой качественную смесь местного крупнозернистого грунта и песка с содержанием мелких частиц размером 0,075 мм не более 15 %. Характеристики материалов, используемые при моделировании, получены из лабораторных и полевых экспериментов, проведенных научной группой Пекинского транспортного университета [16].

Рассмотрим два варианта сечения насыпи: типовая насыпь и насыпь с каменной наброской высотой 1 м и длиной 1,7 м вдоль основания, как изображено на рисунке 5. Для иллюстрации влияния снежного покрова на глубину оттаивания грунтов основания земляного полотна слева от насыпи оставлена область, свободная от снега. В таблице 1 приведены среднемесячные значения температуры воздуха, взятые из данных местной метеостанции, что в совокупности с расчетными значениями так называемых температурных поправок на солнечную радиацию дает первое граничное условие теплофизической задачи на дневной поверхности.

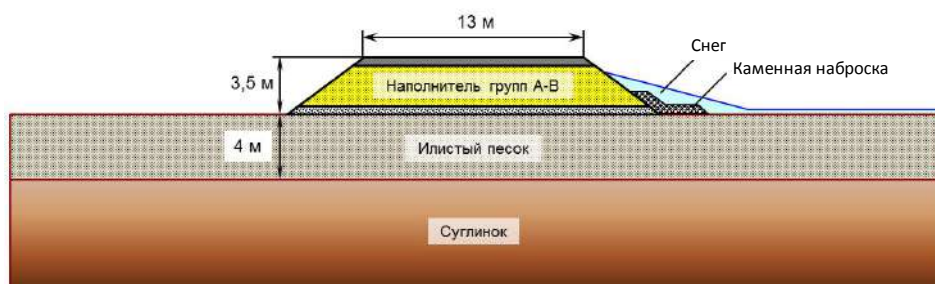


Рисунок 5 – Базовая схема насыпи с каменной наброской и снежным отложением

Таблица 1 – Среднемесячные значения температуры воздуха

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °C	-18,4	-17,7	-12,3	-7,4	-0,2	8,6	17,2	14,4	5,3	-4,9	-10,0	-15,6

Вторым граничным условием задачи является температура мерзлого грунта на глубине годовых нулевых амплитуд, которая принята равной минус 1 °C. В таблице 2 представлены следующие значения: плотность твердых частиц ρ_s , коэффициент пористости e , влажность W , удельная теплоемкость твердых частиц C_u и C_f в талом и мерзлом состоянии соответственно, а также коэффициент теплопроводности материала в талом и мерзлом состоянии λ_u и λ_f соответственно.

Таблица 2 – Теплофизические характеристики материалов модели

Наименование материала	Расчетные характеристики							
	глубина залегания, м	ρ_s , кг/м ³	e	W	C_u , Дж/(кг·°C)	C_f , Дж/(кг·°C)	λ_u , Вт/(м·°C)	λ_f , Вт/(м·°C)
Асфальтобетон и щебеночно-песчано-гравийная смесь (ЩПГС)	3,5 ~ 2,75	2200	0,6	0,04	1400	1350	1,1	1,47
Грунт группы А-В	2,75 ~ 0,5	1800	0,5	0,12	1250	1025	0,87	0,89
Щебень	0,5 ~ 0	2500	0,5	0,02	1050	1050	0,79	0,79
Илистый песок	0 ~ -4	2600	0,5	0,10	1200	1130	1,2	1,23
Суглинок	-4 ~ -7	2700	0,6	0,19	1400	1280	0,9	0,96
Каменная наброска (щебень)	1 ~ 0	2700	0,6	0,02	1050	1050	0,79	0,79

Таблица 3 – Помесячное распределение параметров снежного покрова и его толщины на открытом пространстве

Месяц	ρ , кг/м ³	λ_0 , Вт/(м·К)	h_0 , м
Ноябрь	200	0,13	0,06
Декабрь	240	0,17	0,12
Январь	280	0,21	0,14
Февраль	300	0,27	0,16
Март	360	0,33	0,2
Апрель	400	0,4	0,1

Решение задачи Стефана с подвижными границами фазовых переходов, описывающее динамику полей температуры грунта с указанными выше граничными условиями, было реализовано с помощью разработанной для этой цели программы «Freeze-Cold» [17]. На рисунке 6 представлены результаты расчета полей объемной влажности грунтов насыпи и ее основания без каменной наброски на 10-й год эксплуатации в апреле и октябре соответственно. Масштаб изображений задан координатной сеткой размером 1×1 м. Поле объемной влажности грунта, изменяющейся в пределах от 0 до 1, является наиболее информативным для наглядного представления областей талого грунта, которые отчетливо выделяются на фоне мерзлого грунта с содержанием незамерзшей воды, не превышающим 10 %. На рисунке 6 видна зона талого грунта, не замерзающая в течение всего года и образовавшаяся вследствие тепляющего действия снега в зимний период. К 10-му году эксплуатации насыпи глубина талика – области незамерзающего грунта – в течение всего года достигает 3,7 м. Зона под левым откосом насыпи, где снег отсутствует, к концу зимы не имеет участков талого грунта. Глубина сезонного оттаивания грунтов насыпи и ее основания достигает своего максимума к октябрю (рисунк 6, б).

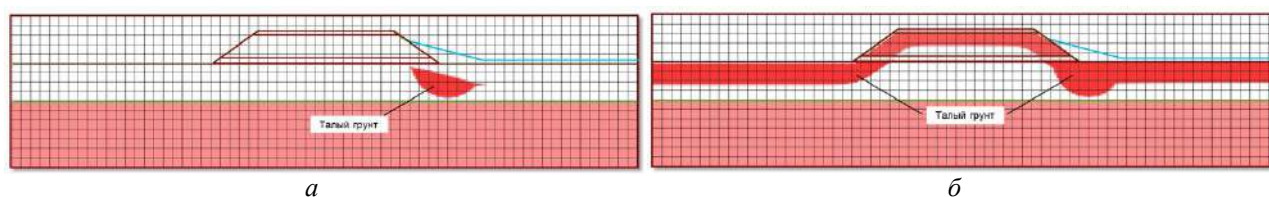


Рисунок 6 – Поле объемной влажности грунтов насыпи и ее основания без каменной наброски на 10-й год: а – состояние на 1 апреля; б – состояние на 1 октября

Наличие каменной наброски, как видно из рисунка 7, приводит к существенному снижению площади оттаивающего грунта к концу теплого сезона. Так, на 10-й год эксплуатации земляного полотна наблюдается снижение глубины оттаивания грунта под подошвой насыпи с 3,7 до 1,5 м за счет охлаждающего действия каменной наброски.

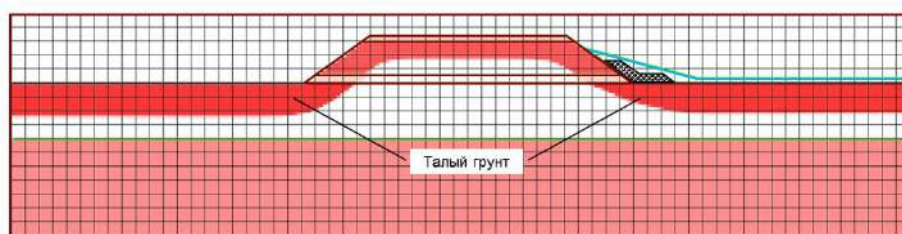


Рисунок 7 – Поле объемной влажности грунтов насыпи и ее основания с каменной наброской на 10-й год (1 октября)

На рисунках 8 и 9 представлены результаты расчетов температурных полей земляного полотна и его основания на конец теплого сезона года с каменной наброской и без нее. Из сопоставления приведенных рисунков видно, что градиент температурного поля под зоной снежных накоплений в отсутствие каменной наброски (см. рисунок 8) существенно ниже по сравнению

с другими областями, что является следствием локального опускания границы мерзлоты в этой области.

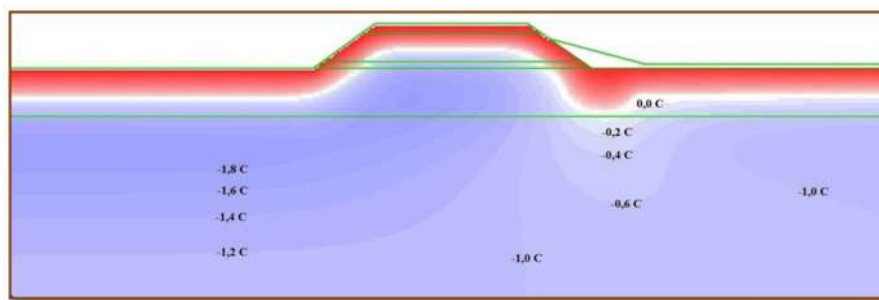


Рисунок 8 – Температурное поле грунтов насыпи и ее основания без каменной наброски на 10-й год (1 октября)

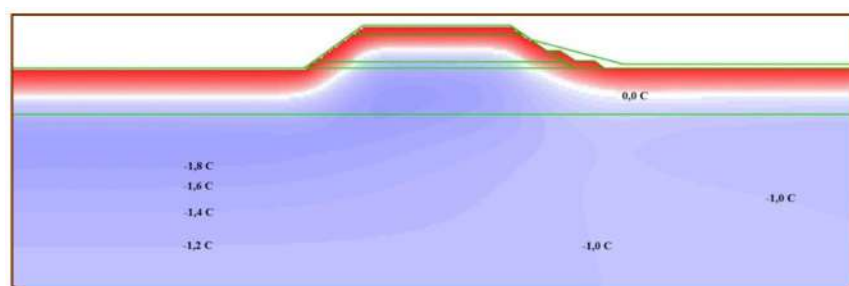


Рисунок 9 – Температурное поле грунтов насыпи и ее основания с каменной наброской на 10-й год (1 октября)

Данный расчет был выполнен по типовому сечению насыпи с каменной наброской автомагистрали экспериментального участка Ушу-Синин на Цинхай-Тибетском плато, а параметры наброски были взяты из ранее опубликованной работы [16]. Очевидно, что каменная наброска является эффективным способом стабилизации температурного режима земляного полотна и его основания, в частности, на снегозаносимых участках. Каменная наброска позволяет снизить площадь оттаивания грунта, поднимая верхнюю границу мерзлого грунта, способствуя снижению его деградации, что в итоге положительно сказывается на несущей способности всего инженерного сооружения. Применение специализированных расчетных комплексов для численного моделирования изменения температуры земляного полотна и его основания при изменяющейся внешней температуре может дать полноценную оценку температурного режима. Однако для достоверных оценок динамики водно-теплового режима любых грунтовых сооружений результаты, полученные расчетным путем, необходимо дополнять данными натурных исследований. Только в этом случае можно полноценно судить об эффективности использования конкретных методов борьбы с деградацией мерзлых грунтов, включая каменную наброску, для полной стабилизации температурного режима грунтовых сооружений в холодных регионах.

Степень эффективности применения различных способов предотвращения деградации многолетнемерзлых грунтов основания земляного полотна существенным образом зависит от конкретных условий их использования. Так, применение термосифонов как сезонно-охлаждающих устройств наиболее эффективно при наличии уже сформировавшихся областей незамерзающих грунтов (таликов), существенно удаленных от дневной поверхности. В этом случае их «промораживание» возможно в максимально короткие сроки, в то время как использо-

вание других способов потребует многих лет. Наибольшая эффективность применения каменной наброски имеет место при наличии повышенного снегонакопления с подветренной стороны земляного полотна, поскольку в этом случае она не только является охлаждающей конструкцией, но и снижает толщину снежных отложений, частично замещая собой объем снега в приподошвенной зоне откоса.

Список литературы

1. Су, Д. Геотехническое районирование на железных дорогах Китайской Народной Республики / Д. Су, А. А. Пиотрович. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2011. – Т. 2. – С. 166–171.
2. Shi E. Investigation of the stability of the roadway on frozen ground under the influence of train load and freeze-thaw cyclic. Doctor's thesis, Beijing Jiaotong University, Beijing, 2011, 153 p. (на китайском языке).
3. Zhan L., Sun C., Han L. Qinghai-Tibet Railway in permafrost region: construction in conditions of frozen soils. *Beijing People's Communications Publishing House*. 2011, № 3 (на китайском языке).
4. Wu Tianyi M. D. High-Altitude Medical Research in China: Importance and Relevance. High Altitude Medical Research Institute, Qinghai, China, *The American Association for the Advancement of Science*, 2012, pp. 3.
5. Wang I. Qinghai Tibet Plateau. Environmental and Wildlife Protection. *China Academic Journal Electronic Publishing House*. 2016, S863 (на китайском языке).
6. Li Y. Research of the Eco-geological Environment Along of Qinghai-Tibet Railway. Doctor's thesis, Beijing, 2014, 115 p (на китайском языке).
7. Zheng Z. Common Diseases and Prevention Methods of Subgrade in Highway Reconstruction. *Transportation World*, 2018, 31, pp. 54–55 (на китайском языке).
8. Song Y., Jin L., Peng H., Liu H. Development of thermal and deformation stability of Qinghai-Tibet Highway under sunny-shady slope effect in southern Tanglha region in recent decade. *Soils and Foundations*, 2020 60(2), pp. 342–355 (на китайском языке).
9. Bian B. Analysis and prevention of subgrade diseases in the permafrost regions of the Qinghai-Tibet plateau. *Roads and Bridges, Sichuan Cement*, 2019 (2), p. 26 (на китайском языке).
10. Природные бедствия на железных дорогах Китая и защита / Филиал Ассоциации по защите от бедствий Китая при Министерстве железных дорог КНР. – Пекин : Железные дороги Китая, 2007. – Текст : непосредственный (на китайском языке).
11. Zhang M., Lai Y., Zhang J. Numerical study on cooling characteristics of two-phase closed thermosyphon embankment in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65 (2), pp. 203–210.
12. Chen J. Diseases of Sichuan-Tibet highway and treatment measures. Maintenance and Management Department of China Road Society, 2009 (2), pp. 32–43 (на китайском языке).
13. Су, Д. Строительство железных дорог Китая: из XIX в XXI век / Д. Су, А. А. Пиотрович. – Текст : непосредственный // Новые идеи нового века : материалы междунар. науч. конф. – Хабаровск : Тихоокеанский гос. ун-т, 2013. – Т. 3. – С. 276–283.
14. Рисунок 2 // [blog.sina.com.cn](http://blog.sina.com.cn/s/blog_52ec14de01015mhj.html) : сайт. – Текст : электронный. – URL : http://blog.sina.com.cn/s/blog_52ec14de01015mhj.html (дата обращения: 28.06.2021).
15. Открытые данные метеостанции г. Мадо // [weather.com.cn](http://www.weather.com.cn/cityintro/101150506.shtml) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.weather.com.cn/cityintro/101150506.shtml> (дата обращения: 28.06.2021).
16. Tai B., Liu J., Wang T., Tian Y., Fang J. Thermal characteristics and declining permafrost table beneath three cooling embankments in warm permafrost regions, *Applied Thermal Engineering*. 2017, 123, pp. 435–447.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021611121 Российская Федерация. Программа для расчета температуры многолетнемерзлых грунтов земляного полотна «Freeze-Cold». – № 2021610134 : заявлено 11.01.2021 : опубликовано 21.01.2021 / Машуков В. И., Исаков А. Л.; заявитель и правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения». – 1 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Su D., Piotrovich A. A. Geotechnical zoning on the railways of the People's Republic of China [Geotekhnicheskoye rayonirovaniye na zheleznykh dorogakh Kitayskoy Narodnoy Respubliki]. *Nauchno-tekhnicheskoye i ekonomicheskoye sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke – Scientifically technical and economical cooperation in Asia-Pacific countries in the 21st century*, 2011, vol. 2, pp. 166–171.
2. Shi E. Investigation of the stability of the roadway on frozen ground under the influence of train load and freeze-thaw cyclic. Doctor's thesis, Beijing Jiaotong University, Beijing, 2011, 153 p. (in Chinese).
3. Zhan L., Sun C., Han L. Qinghai-Tibet Railway in permafrost region: construction in conditions of frozen soils. *Beijing People's Communications Publishing House*, 2011, № 3 (in Chinese).
4. Wu Tianyi M. D. High-Altitude Medical Research in China: Importance and Relevance. High Altitude Medical Research Institute, Qinghai, China, *The American Association for the Advancement of Science*, 2012, pp. 3.
5. Wang I. Qinghai Tibet Plateau. Environmental and Wildlife Protection. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2016, S863 (in Chinese).
6. Li Y. Research of the Eco-geological Environment Along of Qinghai-Tibet Railway. Doctor's thesis, Beijing, 2014, 115 p. (in Chinese).
7. Zheng Z. Common Diseases and Prevention Methods of Subgrade in Highway Reconstruction. *Transportation World*, 2018, 31, pp. 54–55 (in Chinese).
8. Song Y., Jin L., Peng H., Liu H. Development of thermal and deformation stability of Qinghai-Tibet Highway under sunny-shady slope effect in southern Tanglha region in recent decade. *Soils and Foundations*, 2020 60(2), pp. 342–355 (in Chinese).
9. Bian B. Analysis and prevention of subgrade diseases in the permafrost regions of the Qinghai-Tibet plateau. *Roads and Bridges, Sichuan Cement*, 2019 (2), p. 26 (in Chinese).
10. *Prirodnye bedstviia na zheleznykh dorogakh Kitaia i zashchita / Filial Assotsiatsii po zashchite ot bedstvii Kitaia pri Ministerstve zheleznykh dorog KNR* (China Railways Natural Disasters and Protection. Branch of the China Disaster Protection Association under the Ministry of Railways of the People's Republic of China). Beijing: China Railways Publ., 2007.
11. Zhang M., Lai Y., Zhang J. Numerical study on cooling characteristics of two-phase closed thermosyphon embankment in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65 (2), pp. 203–210.
12. Chen J. Diseases of Sichuan-Tibet highway and treatment measures. Maintenance and Management Department of China Road Society, 2009 (2), pp. 32–43 (in Chinese).
13. Su D., Piotrovich A. A. Construction of Chinese Railways: from the 19th to the 21st Century. [Stroitel'stvo zheleznykh dorog Kitaya: iz XIX v XXI vek]. *Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (New ideas of the new century: materials of the International scientific conference). – Khabarovsk, 2013, vol. 3, pp. 276–283.
14. Risunok 2 (Figure 2). Available at: http://blog.sina.com.cn/s/blog_52ec14de01015mhj.html (accessed 28 June 2021).
15. *Otkrytye dannye meteostantsii g. Mado* (Open data of the Maduo weather station). Available at: <http://www.weather.com.cn/cityintro/101150506.shtml> (accessed 28 June 2021).

16. Tai B., Liu J., Wang T., Tian Y., Fang J. Thermal characteristics and declining permafrost table beneath three cooling embankments in warm permafrost regions, *Applied Thermal Engineering*. 2017, 123, pp. 435–447.

17. Mashukov V. I., Isakov A. L. *Certificate of state registration of a computer software package RU 2021611121*, 21.01.2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кравченко Екатерина Александровна

Гонконгский университет науки и технологий (HKUST).

Гонконг, САР КНР.

Кандидат технических наук, постдок кафедры «Гражданское и экологическое строительство».

Тел.: +8-618-933-205-044.

E-mail: kravchienko.66@bk.ru

Исаков Александр Леонидович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Изыскания, проектирование, постройка железных и автомобильных дорог», СГУПС.

Тел.: +7-913-985-92-85.

E-mail: mylab@ngs.ru

Лю Цзянькунь

Университет имени Сунь Ятсена, г. Чжухай, 519082, КНР.

Доктор, профессор, заместитель декана школы гражданского строительства.

Тел.: +8-613-581-986-007.

E-mail: liujiank@mail.sysu.edu.cn

Ли Сю

Пекинский транспортный университет.

Шаньюань Хайдянь ул., д. 3, г. Пекин, 100044, КНР.

Доктор, профессор кафедры геотехнической инженерии.

Тел.: +8-613-466-374-338.

E-mail: xuli@bjtu.edu.cn

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Проблемы стабилизации земляного полотна железных и автомобильных дорог в холодных регионах Китая / Е. А. Кравченко, А. Л. Исаков, Ц. Лю, С. Ли. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 94 – 104.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kravchenko Ekaterina Aleksandrovna

The Hong Kong University of Science and Technology.

Hong Kong Special Administrative Region.

Ph. D. in Engineering, postdoc of the department «Civil and Environmental Engineering».

Phone: +8-618-933-205-044.

E-mail: kravchienko.66@bk.ru

Isakov Aleksandr Leonidovich

Siberian Transport University (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Survey, design and construction of railways and highways», STU.

Phone: +7-913-985-92-85.

E-mail: mylab@ngs.ru

Liu Jiankun

Sun Yat-Sen University, Zhuhai, 519082, China.

Ph. D., professor and the associate dean of the school of civil engineering.

Phone: +8-613-581-986-007.

E-mail: liujiank@mail.sysu.edu.cn

Li Xu

Beijing Jiaotong University.

3, Shangyuan Haidian, Beijing, 100044, China.

Ph. D., professor of the department of geotechnical engineering.

Phone: +8-613-466-374-338.

E-mail: xuli@bjtu.edu.cn

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kravchenko E. A., Isakov A. L., Liu J., Li X. Problems of stabilizing the subgrade of railways and highways in cold regions of China. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 94 – 104 (In Russian).

З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева, Э. А. Асатов

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

К ВОПРОСУ О РАЗВИТИИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ УЗБЕКИСТАНА

Аннотация. Цель работы – проанализировать и дать оценку структуры экономического развития и влияния «экономического пространства» на железнодорожный транспорт Узбекистана, рассмотреть применение технологии контейнерного блок-трейна. Применяются научные методы анализа и синтеза, классификации, математической статистики, экономического анализа, математического технического моделирования. Получены следующие результаты. Дана оценка динамики развития грузоперевозок в Узбекистане на основе данных ВВП. Рассмотрен объем предоставленных транспортных перевозок и использования видов транспорта по объему отгружаемой продукции. Из них количество отгруженных товаров в Узбекистане с железнодорожного транспорта, динамика объемов перевозок отдельных видов грузов в контейнерах. По динамике роста грузоперевозок было выявлено снижение роста, приходящееся на 2020 г. и связанное с пандемией, но в целом имеются устойчивые темпы роста. Сделан вывод о том, что наряду с проводимыми работами по обновлению и реконструкции железнодорожных путей необходимо принять меры по оптимизации всей цепочки организации грузоперевозок путем контейнеризации, т. е. применение технологии блок-трейн. Практическая значимость результатов исследования вытекает из того, что анализ развития транспортной инфраструктуры выявил резкое снижение результатов работы транспорта на конец 2019 – 2020 гг. в связи с пандемией, но в то же время наблюдается сокращение «экономического пространства» путем улучшения транспортной инфраструктуры, упрощения процедур транзита и таможенной очистки, увеличения объемов транзита и региональной торговли, поэтому рынок логистических перевозок в республике в ближайшие годы будет расти ускоренными темпами. Массовое применение контейнеров с применением технологии блок-трейн, т. е. сбор контейнеров с припортовых тыловых терминалов, в которых происходит формирование партий контейнеров, и их накопление в необходимых покупателю объемах для перевозки по железной дороге может также стать решением выявленных проблем.

Ключевые слова: инфраструктура, грузоперевозки, экспорт, импорт, ВВП, транзит, транспортная услуга, блок-трейн.

Ziyoda G. Muhamedova, Zakhro V. Ergasheva, Ergash A. Asatov

Tashkent State Transport University (TSTU), Republic of Uzbekistan

ON THE DEVELOPMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN UZBEKISTAN

Abstract. The purpose of the work is to analyze and assess the structure of economic development and the impact of the «economic space» on railway transport in Uzbekistan, to consider the use of container block train technology. Scientific methods of analysis and synthesis, classification, mathematical statistics, economic analysis, mathematical technical modeling are used. The following results were obtained. The dynamics of the development of cargo transportation in Uzbekistan is assessed on the basis of GDP data. The volume of provided transportation and the use of modes of transport by the volume of shipped products is considered. Of these, the number of goods shipped in Uzbekistan from railway transport, the dynamics of the volume of transportation of certain types of cargo in containers. According to the dynamics of the growth of cargo transportation, a decrease in growth was revealed in 2020 and associated with the pandemic, but in general there are steady growth rates. It is concluded that along with the ongoing work on the renovation and reconstruction of railway tracks, it is necessary to take measures to optimize the entire chain of cargo transportation by containerization, so the use of block train technology. The practical significance of the results of the study follows from the fact that the analysis of the development of transport infrastructure revealed a sharp decline in the results of transport at the end of 2019 – 2020 due to the pandemic, but at the same time, there is a reduction in the «economic space» by improving transport infrastructure, simplifying transit and customs clearance procedures, increasing transit volumes and regional trade, therefore, the logistics transportation market in the republic will grow at an accelerated pace in the coming years. Mass use of containers with the use of block train technology, so. the collection of containers from the port rear terminals, where the formation of batches of containers takes place, and their accumulation in the volumes required by the buyer for transportation by rail can also be a solution to the identified problems.

Keywords: infrastructure, cargo transportation, export, import, GDP, transit, transport service, block train.

Одни из приоритетных вопросов государственной политики Центральной Азии – становление системы торговой и транспортной логистики и вхождение во всемирную систему цепочки поставок грузов [1].

Медленное экономическое развитие стран бывших советских республик, включая Узбекистан, связано со сложностями торговых и транспортных компаний стран в результате значительного «экономического расстояния» (расстояние перевозки товаров, на котором его ценность не будет перекрыта транспортными расходами) до международных товарных рынков.

«Экономическое расстояние» можно значительно сократить как путем улучшения состояния инфраструктурных объектов физически, так и посредством создания благоприятных условий, в частности, упрощая процедуры транзита и таможенной очистки, предоставляя возможности открытого и свободного доступа к информационным источникам, осуществляя пресечение неофициальных платежей на границе [1].

Следует отметить, что создание и развитие транспортной железнодорожной инфраструктуры – фактор развития торговли, устойчивого экономического роста и создания новых рабочих мест.

Узбекистан расположен далеко от морских путей, что приводит к необходимости преодолевать территорию двух стран для выхода к морю узбекским товарам, а это соответственно ведет к повышению доли транспортных расходов в стоимости экспортных товаров [1].

Для оценки динамики развития грузоперевозок в Узбекистане рассмотрим темп роста ВВП Узбекистана в отрасли грузовых перевозок в проценте к периоду предыдущего года (рисунок 1).

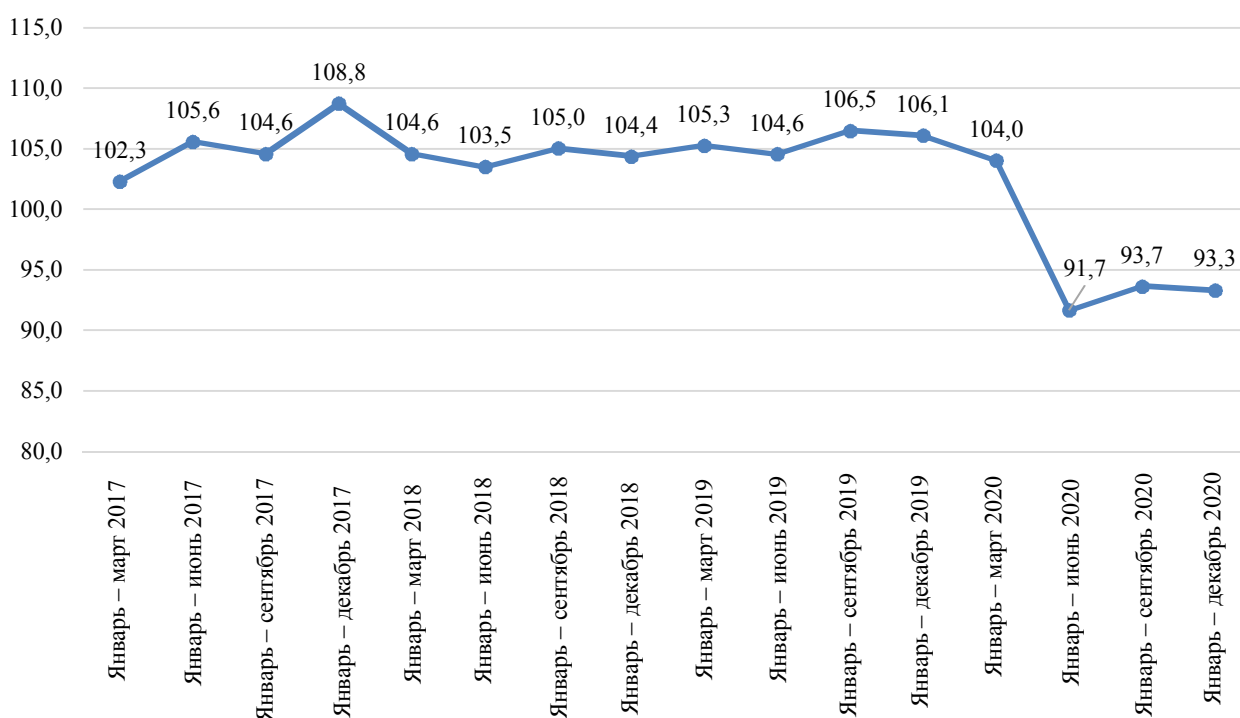


Рисунок 1 – Темп роста ВВП Узбекистана в отрасли перевозок, % к периоду предыдущего года¹

Резкое снижение результатов работы транспорта (транспортных перевозок в стоимостном выражении) приходится на конец 2019 – 2020 гг. в связи с распространением COVID-19. Пандемию следует рассматривать как внешний шок для экономики Узбекистана. В отрасли международных грузоперевозок железнодорожным транспортом значительно снизилось коли-

¹ Построено авторами по данным официальной статистики.

чество как импортируемых, так и экспортируемых товаров, что в итоге отрицательно сказалось на торговом балансе страны [1]. В дальнейшем (по итогам 2021 г.) можно будет ожидать увеличение прироста ВВП страны за счет грузоперевозок.

Анализ структуры развития экономики Узбекистана показывает, что в связи с улучшением и развитием транспортной инфраструктуры, увеличением объемов транзита и региональной торговли рынок логистических перевозок в республике в ближайшие годы будет расти ускоренными темпами [1]. Сегодня национальные транспортные и логистические компании хотят воспользоваться этой возможностью и развить свой бизнес, повысить уровень предоставляемых логистических перевозок до уровня международных стандартов.

Рассмотрим объем транспортных перевозок по регионам Узбекистана (таблица 1).

Объем транспортных перевозок по всем регионам до 2020 г. устойчиво возрастал, что указывает на общее экономическое развитие, укрепление торговых связей, наращивание экспорто-импортных операций [1].

Каждый день через территорию Казахстана и России осуществляется транзит узбекских товаров. Внешнеторговые грузоперевозки из Узбекистана осуществляются по основным транспортным коридорам. Одним из таких коридоров, связывающих Узбекистан и Казахстан с ответвлениями в Китай и Туркменистан, является коридор А-40 в виде асфальтобетонной магистрали, пересекающей регион с востока на запад. Для осуществления перевозки грузов через казахско-китайскую границу существует также единственный железнодорожный коридор в Китай, проходящий через пункт «Достык».

Таблица 1 – Объем транспортных перевозок по регионам (в млрд сум)

Регион	Год						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Республика Узбекистан	4385,9	9003,5	13335,2	15185,2	19566,6	24563,2	28466,7
Республика Каракалпакстан	124,3	249,4	377,6	434,8	556,8	718,5	883,5
Андижан	169,5	345,8	534,8	599,5	802	1073,4	1272,2
Бухара	157,0	323,3	501,6	561,9	729	962,5	1131,9
Джизак	55,4	113,1	173,5	196,6	271,7	358,6	424,4
Кашкадарья	155,5	317,9	480,2	504,1	659,7	995,7	1135,5
Навои	68,5	137,4	210,7	226,3	341	453,6	539,7
Наманган	118	248,2	372,6	400,3	534,2	709,5	836,2
Самарканд	244,5	498,9	770,7	833,4	1131,6	1489,4	1760,6
Сурхандарья	92,5	189,7	289	300,8	408,4	546,3	646,3
Сырдарья	35,7	72,8	112,1	122,2	165,5	226,4	266,5
Ташкент	272,6	561,3	855,7	896,0	1264,7	1684,8	1990,1
Фергана	190,0	358,8	595,7	652,3	864,8	1153,7	1359,3
Хорезм	111,8	228,1	350,4	374,9	510,2	692,5	821,7
Город Ташкент	577,6	1157,5	1782,4	1978,9	2817,1	3619,6	4119,9

Объем предоставленных транспортных перевозок в Узбекистане показан на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, рост транспортных перевозок в Узбекистане до 2020 г. носил равномерный характер, возрастая в среднем на 5 тыс. млрд сум в год. Однако по итогам 2020 г. темп прироста упал на 10 % (о чем можно судить по рисунку 3).

Можно отметить, что рост объема транспортных перевозок происходил в результате роста как внутренних, так и внешних грузо- и пассажироперевозок [1]. Увеличение объема международных грузоперевозок связано, с одной стороны, с налаживанием экспорто-импортных потоков, где экспортные потоки представлены в основном энергетическими ресурсами и металлами, с другой стороны, с улучшением автомагистралей и строительством дополнительных железнодорожных путей.

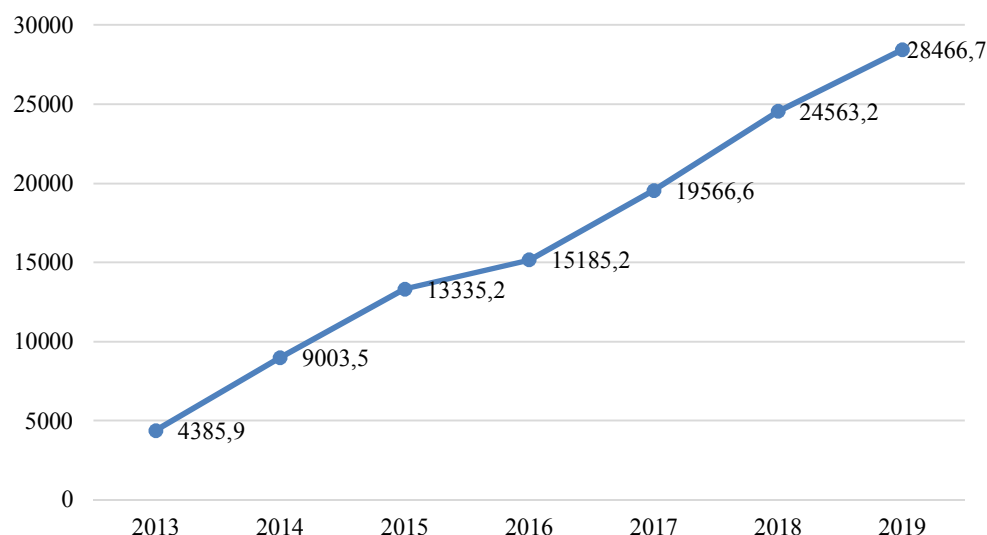


Рисунок 2 – Объем предоставленных транспортных перевозок в Узбекистане, млрд сум²

Объем транспортных перевозок по регионам Узбекистана по данным 2019 г. показан на рисунке 3.

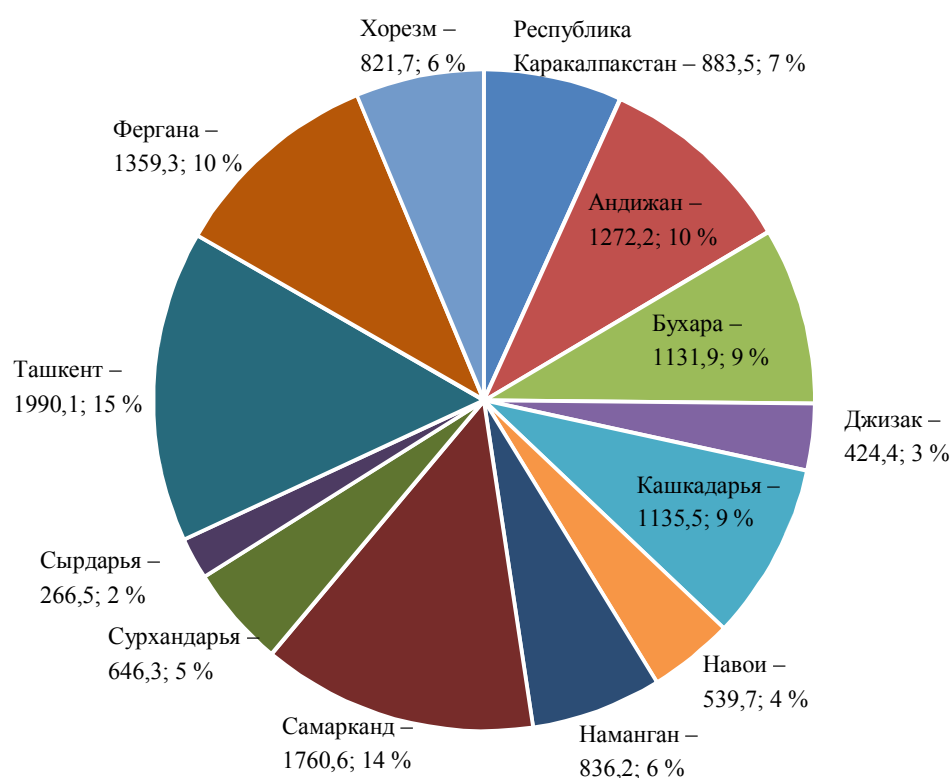


Рисунок 3 – Объем транспортных перевозок по регионам Узбекистана в 2019 г., млрд сум / %³

Как видно из рисунка 3, наибольший объем транспортных перевозок приходится на столицу Узбекистана Ташкент. Можно выделить также Самарканд, Фергану и Андижан.

Структура использования видов транспорта (трубопроводный, воздушный, железнодорожный и автомобильный) в Узбекистане по объему отгруженной продукции по данным на начало 2020 г. представлена на рисунке 4.

^{2,3} Построено авторами по данным официальной статистики.

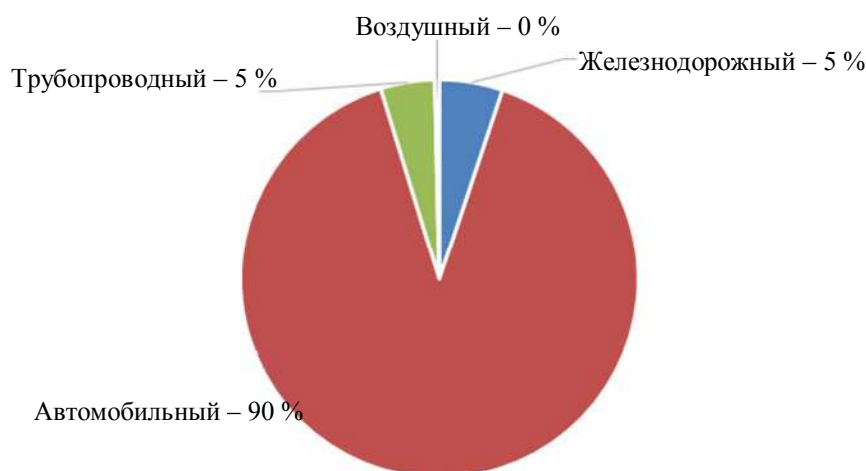


Рисунок 4 – Структура использования видов транспорта в Узбекистане по объему отгруженной продукции в 2020 г., %⁴

Как видно из рисунка 4, на автомобильный транспорт приходится наибольшая доля транспортных перевозок (90 %). На трубопроводный и железнодорожный транспорт приходится по 5 % отгруженной продукции. Грузоперевозки воздушным транспортом не осуществлялись [1].

Можно отметить, что в Центральной Азии сеть дорог обширна и в основном является достаточной для удовлетворения потребностей пользователей [1]. Но все-таки большой процент автомобильных дорог в регионе находится в плачевном состоянии, что свидетельствует об отсутствии надлежащего технического обслуживания.

Для торговых компаний при перевозке грузов помимо больших расстояний до мировых рынков насущной проблемой являются физические барьеры, такие как задержка сроков поставки и неофициальные выплаты (взятки представителям таможенных органов).

В таблице 2 показан объем отгруженных товаров железнодорожным транспортом по видам грузов в Узбекистане, тыс. т.

Таблица 2 – Объем отгруженных товаров железнодорожным транспортом по видам грузов в Узбекистане, тыс. т

Индикаторы	Год		
	2017	2018	2019
Отгружено грузов – всего, тыс. т:	17093,6	34093,7	51874,2
зерно	385,5	824,4	1341,1
каменный уголь	1229,4	1855,8	3040,7
нефть	1550,6	2920	4330
различные руды	1598	3268,7	4887,3
черные металлы	255,1	537,6	805,8
черный металлолом	188,3	318,4	446,9
древесина	19,04	11,08	16
химические и минеральные удобрения	976,4	2053,5	3177,9
строительные материалы	988,1	2194,8	3128,8
цемент	1113	2341,5	3815,7
картофель, дыни и свежие фрукты	50,4	157,9	166,4
хлопковое волокно	36,1	49	81,1
другие грузы	8703,2	17560,3	26636,5

Как видно из таблицы 2, имело место увеличение объемов отгруженных товаров по всем представленным видам грузов кроме лесных грузов (древесины). Значительно по сравнению с 2017 г. увеличился объем цемента и строительных материалов в целом [1]. Существенно возросло количество отгружаемого зерна. Существенными темпами возрастают также объемы руды, металлов, каменного угля.

⁴ Построено авторами по данным официальной статистики.

Рассмотрим структуру отгруженных товаров в Узбекистане с железнодорожного транспорта (рисунок 5).

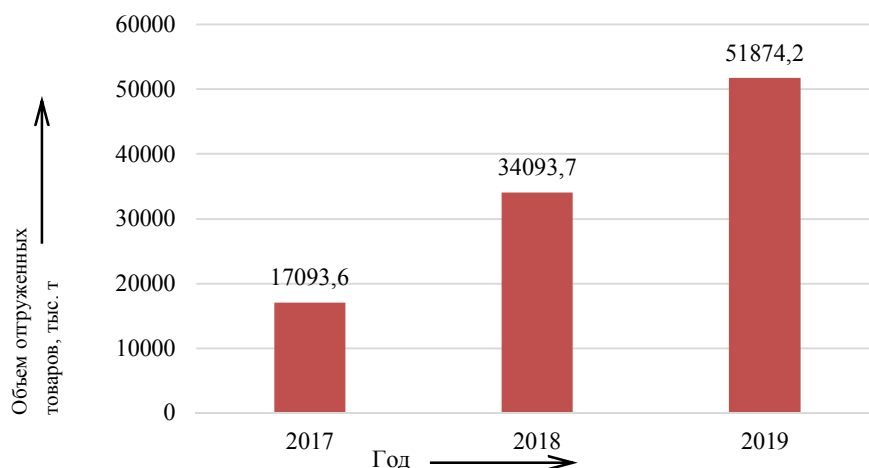


Рисунок 5 – Отгружено грузов в Узбекистане с железнодорожного транспорта всего, тыс. т⁵

До 2020 г. отгрузка товаров в Узбекистане с железнодорожного транспорта возрастала устойчивыми высокими темпами [1]. Во многом этому способствовали введение в эксплуатацию дополнительных железнодорожных составов, предназначенных для перевозки грузов, и увеличение железнодорожных путей. Однако существуют сложности с хранением грузов из-за необходимости их перевозок на длительные расстояния, прежде всего это касается быстропортящейся продукции – фруктов, овощей, зерна [1].

Несмотря на снижение объемов отгруженной продукции по итогам 2020 г. в дальнейшем объемы перевозимых товаров железнодорожным транспортом при прочих равных условиях будут возрастать, что потребует технологически свежих решений их организации и обслуживания.

Рассмотрим структуру отгруженных товаров с железнодорожного транспорта в Узбекистане в 2019 г. (рисунок 6).

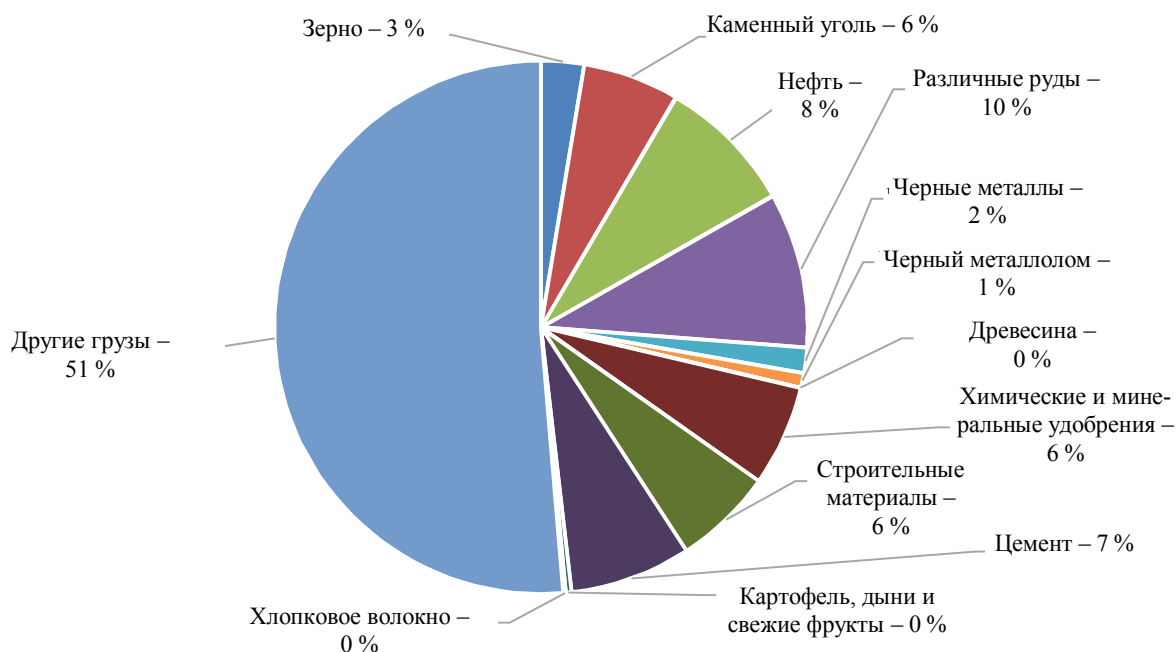


Рисунок 6 – Отгружено тонн грузов в Узбекистане с железнодорожного транспорта в 2019 г., %⁶

^{5, 6} Построено авторами по данным официальной статистики.

Среди представленных видов грузов наибольшую долю составляет руда. Существенную долю составляют нефть, цемент, каменный уголь, химические и минеральные удобрения, строительные материалы [1]. В целом виды перевозимых товаров довольно многообразны, но существенную долю составляют сырьевые ресурсы.

В таблице 3 показаны основные показатели грузооборота железнодорожного транспорта в Узбекистане за 2019 – 2021 гг., млн т.

Таблица 3 – Основные показатели грузооборота железнодорожного транспорта в Узбекистане за 2019 – 2021 гг., млн т

Вид транспорта	Год								
	2019			2020			2021 (прогноз)		
	общий объем перевозок, млн т	объем контейнерных перевозок, млн т	удельный вес, %	общий объем перевозок, млн т	объем контейнерных перевозок, млн т	удельный вес, %	общий объем перевозок, млн т	объем контейнерных перевозок, млн т	удельный вес, %
Железнодорожный	70,14	0,49	0,69	70,46	0,89	1,26	70,78	1,29	1,82

Анализируя данные таблицы 3, можно сказать, что общий объем перевозок железнодорожным транспортом увеличился к 2020 г. с 70,14 до 70,46 млн т, в процентном соотношении – на 0,46 %. Помимо этого по прогнозам в 2021 г. общий объем грузооборота составит 70,78 млн т. Таким образом, число транспортировок контейнерами также увеличилось с 0,49 до 0,89 млн т, увеличение составило 82 %.

На рисунке 7 показана динамика объемов перевозок в тысячах двадцатифутового эквивалента (тыс. TEU) по отдельным видам грузов в контейнерах за период 2019 – 2020 гг.

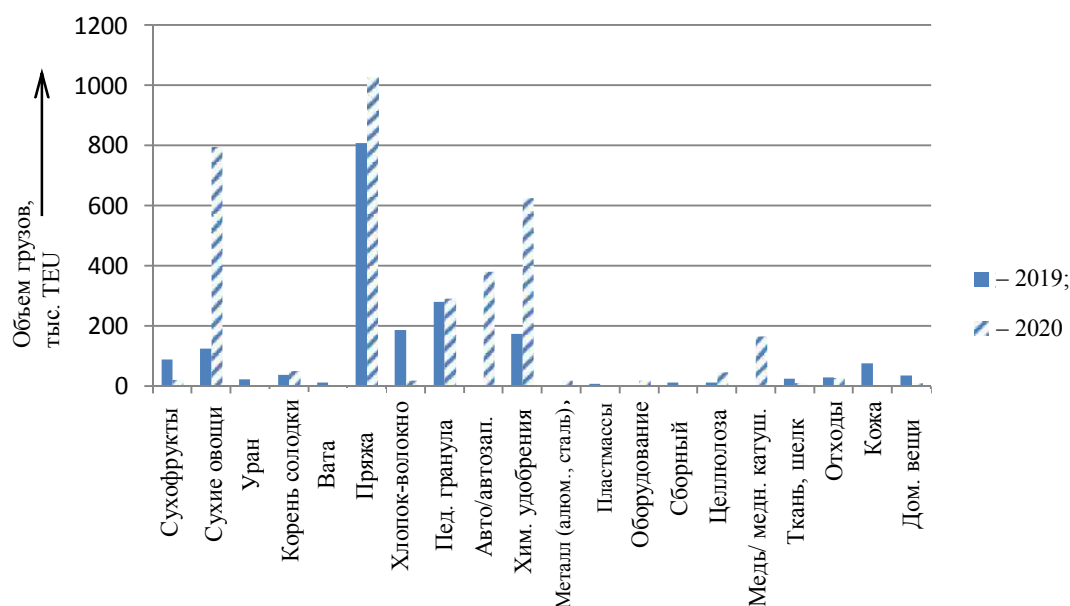


Рисунок 7 – Динамика объемов перевозок отдельных видов грузов в контейнерах

Если говорить об отдельных номенклатурах, то нельзя не отметить, что в 2020 г. объем перевозок пряжи в груженных контейнерах увеличился примерно на 27 % и составил 1028 тыс. TEU. Благодаря современным технологиям и новым видам упаковок значительно расширился перечень перевозимых в контейнерах грузов, традиционно причисляемых как к насыпным, так и к наливным. Наблюдается тенденция по увеличению точечных контейнерных поставок потребителям таких грузов, как зерно, удобрения и различные масла. Однако на текущий момент доля таких отправок в объеме перевозок удобрений все еще очень мала.

К лидерам продуктов, которые транспортируются данным способом, относятся химикаты – объем их перевозок увеличился на 257 %, пед. гранулы (гранулированного полипропилена – на 3 %, целлюлозы – на 348 %, сухих овощей – на 500 %. Наилучшую положительную динамику продемонстрировали также перевозки металла (рост более чем в 20 раз), авто / автозапчастей (рост более чем в 120 раз), оборудования (в 18 раз). С таким увеличением перевозок грузов необходимо появление маршрутов контейнерных поездов.

Таким образом, объемы грузоперевозок в Узбекистане затормозились в 2020 г. за счет влияния режима пандемии, но в целом имеют устойчивые темпы роста, что требует обеспечения соответствующей инфраструктурой. Наибольший процент грузоперевозок составляют автомобильные перевозки, однако железнодорожным транспортом за счет снижения транспортных издержек перевозка грузов была бы более выгодной. В связи с удаленностью Узбекистана от международных рынков и морских путей требуется создать специальные условия, обеспечивающие сохранность грузов во время транспортировки, и сократить время на грузоперевозки.

Медленное экономическое развитие стран бывших советских республик, включая Узбекистан, связано со сложностями транспортировки грузов транспортными и торговыми компаниями страны в результате значительного «экономического пространства» [1]. Для функционирования экономического пространства большое значение имеют расстояния между его элементами – так называемая связанность. «Экономическое расстояние» в отличие от физического, измеряемого километрами, милями и т. п., характеризуется прежде всего транспортными и транзакционными издержками на преодоление физического расстояния, поэтому «экономическое расстояние» между одними и теми же географическими точками оказывается неодинаковым для разных перемещаемых товаров, услуг.

На железнодорожный транспорт приходится по 5 % отгруженной продукции.

Общая протяженность железных дорог Узбекистана, по состоянию на 2020 г. превышает 7 тыс. км. Из них электрифицированы около 2500 км. Постоянное обновление путей и закупка современного подвижного состава позволяют электропоездам развивать скорость до 150 км/ч.

Объем транспортных перевозок по всем регионам до 2020 г. устойчиво возрастал, что указывает на общее экономическое развитие, укрепление торговых связей, наращивание экспорто-импортных операций. Резкое снижение результатов работы транспорта (транспортных перевозок в стоимостном выражении) приходится на конец 2019 – 2020 г. в связи с распространением COVID-19.

При решении вопросов развития железнодорожного транспорта следует исходить из интересов покупателей транспортных услуг, т. е. юридических и физических лиц, организующих доставку грузов. Необходимо одновременно с проводимыми работами по обновлению и реконструкции железнодорожных путей принять меры по усовершенствованию всей цепочки организации грузоперевозок.

Массовое применение контейнеров с применением технологии блок-трейн, т. е. сбор контейнеров с припортовых тыловых терминалов, в которых происходит формирование партий контейнеров, и их накопление в необходимых покупателю объемах для перевозки по железной дороге может также стать решением этих проблем.

Список литературы

1. Государственный комитет республики Узбекистан по статистике // Stat.uz : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://stat.uz/ru/> (дата обращения: 13.07.2021).
2. Ashrafian A., Pettersen O.-G., Kuntze K.N., Franke J., Alfnes E., Henriksen K. F., Spone J., Full-Scale Discrete Event Simulation of an Automated Modular Conveyor System for Warehouse Logistic». *International Conference on Advances in Production Management Systems*, APMS, 2019, pp. 35–42.
3. Baruffaldi G., Accorsi R., Manzini R. Warehouse management system customization and information availability in 3pl companies: A decision-support tool. *Industrial Management & Data Systems*, 119 (2), 2019, pp. 251–273.

4. Brenner B., Hummel V. Digital Twin as Enabler for an Innovative Digital Shopfloor Management System in the ESB Logistics Learning Factory at Reutlingen – University. *Procedia Manufacturing*, 9, 2017, pp. 198–205.
5. Bučková M., Skokan R., Fusko M., Hodoň R. Designing of logistics systems with using of computer simulation and emulation, *13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport, Transcom*, 2019, pp. 978–985.
6. Defraeye T., Tagliavini G., Wu W., Prawiranto K., Schudel S., Assefa Kerisima M., Verboven P., Bühlmann A. Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, pp. 778–794.
7. Digital-стратегии победителей. Трансформация фармацевтической отрасли // Союзфарма : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://sojuzpharma.ru/news/6120-digital-strategii_pobeditelei_transfor-maciya_farmacevticheskoi_otrasli (дата обращения: 13.07.2021).
8. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies, *EEE MultiMedia*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 87–92.
9. Grau M., Gresens C., Vettermann S., Wagner L. Enabling the digital thread for shipbuilding and shipping. *Royal Institution of Naval Architects – 19th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, 1, 2019, pp. 72–78.
10. Harrison R. Dynamically Integrating Manufacturing Automation with Logistics, *24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, 2019, pp. 21–22.
11. Hostmann B., Rayner N. Gartner RAS Core Research Note. Gartner's Business Intelligence: Analytics and Performance Framework, *Gareth Herschel*, 19 October, 2019, p. 71.
12. Kaewunruen S., Lian Q. Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. *Journal of Cleaner Production*, 2019, pp. 1537–1551.
13. Kavka L., Kodym O., Cempírek V. Smart units in control of logistics processes, *18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM*, 2018, pp. 701–708.
14. Mukhamedova Z. G. Analysis and assessment of power efficiency of special self-propelled railway rolling stock, *ACTA OF Turin polytechnic university in Tashkent*, 2019, no. 3, pp. 104–109.
15. Mukhamedova Z. G. Modelling of fluctuations in the main bearing frame of railcar, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48–53.

References

1. Gosudarstvennyi komitet respublik Uzbekistan po statistike (State Committee of the Republic of Uzbekistan on Statistics). Available at: <https://stat.uz/ru/> (accessed 13 July 2021).
2. Ashrafian A., Pettersen O.-G., Kuntze K.N., Franke J., Alfnes E., Henriksen K. F., Spone J., Full-Scale Discrete Event Simulation of an Automated Modular Conveyor System for Warehouse Logistic». *International Conference on Advances in Production Management Systems, APMS*, 2019, pp. 35–42.
3. Baruffaldi G., Accorsi R., Manzini R. Warehouse management system customization and information availability in 3pl companies: A decision-support tool. *Industrial Management & Data Systems*, 119 (2), 2019, pp. 251–273.
4. Brenner B., Hummel V. Digital Twin as Enabler for an Innovative Digital Shopfloor Management System in the ESB Logistics Learning Factory at Reutlingen – University. *Procedia Manufacturing*, 9, 2017, pp. 198–205.
5. Bučková M., Skokan R., Fusko M., Hodoň R. Designing of logistics systems with using of computer simulation and emulation, *13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport, Transcom*, 2019, pp. 978–985.
6. Defraeye T., Tagliavini G., Wu W., Prawiranto K., Schudel S., Assefa Kerisima M., Verboven P., Bühlmann A. Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, pp. 778–794.
7. Digital-strategii pobeditelei. Transformatsiia farmatsevticheskoi otrasli (Digital strategies of the winners. Transformation of the pharmaceutical industry). Available at: https://sojuzpharma.ru/news/6120-digital-strategii_pobeditelei_transfor-maciya_farmacevticheskoi_otrasli (accessed 13 July 2021).

8. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies, *EEE MultiMedia*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 87–92.
9. Grau M., Gresens C., Vettermann S., Wagner L. Enabling the digital thread for shipbuilding and shipping. *Royal Institution of Naval Architects – 19th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, 1, 2019, pp. 72–78.
10. Harrison R. Dynamically Integrating Manufacturing Automation with Logistics, *24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, 2019, pp. 21–22.
11. Hostmann B., Rayner N. Gartner RAS Core Research Note. Gartner's Business Intelligence: Analytics and Performance Framework, *Gareth Herschel*, 19 October, 2019, p. 71.
12. Kaewunruen S., Lian Q. Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. *Journal of Cleaner Production*, 2019, pp. 1537–1551.
13. Kavka L., Kodym O., Cempírek V. Smart units in control of logistics processes, *18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM*, 2018, pp. 701–708.
14. Mukhamedova Z. G. Analysis and assessment of power efficiency of special self-propelled railway rolling stock, *ACTA OF Turin polytechnic university in Tashkent*, 2019, no. 3, pp. 104–109.
15. Mukhamedova Z. G. Modelling of fluctuations in the main bearing frame of railcar, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48–53.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мухамедова Зиёда Гафурджановна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Мирабадский район, ул. Темирийўлчилар, д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, доцент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998(90)329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Эргашева Захро Валижонова

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Мирабадский район, ул. Темирийўлчилар, д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Ассистент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998(97)716-23-22.

E-mail: zahro2@yandex.ru

Асатов Эргаш Ахадович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Мирабадский район, ул. Темирийўлчилар, д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Студент магистратуры по направлению «Логистика (на железнодорожном транспорте)», ТГТрУ.

Тел.: +998(97)470-08-07.

E-mail: ergashasatov1997@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мухамедова, З. Г. К вопросу о развитии транспортной инфраструктуры Узбекистана / З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева, Э. А. Асатов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 105 – 114.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mukhamedova Ziyoda Gafurdjanovna

Tashkent State of Transport University (TSTU).

Mirabad distarict, Temir st., 1, Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Doctor of Sciences in Engineering, Associate dotcent of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: +998(90)329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Ergasheva Zakhro Valijonovna

Tashkent State of Transport University (TSTU).

Mirabad distarict, Temir st., 1, Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Assistant of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: +998(97)716-23-22.

E-mail: zahro2@yandex.ru

Asatov Ergash Akhadovich

Tashkent State of Transport University (TSTU).

Mirabad distarict, Temir st., 1, Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Master's student in Logistics (in railway transport), TSTU.

Phone: +998(97)470-08-07.

E-mail: ergashasatov1997@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mukhamedova Z. G., Ergasheva Z. V., Asatov E. A. On the development of transport infrastructure in Uzbekistan. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 105 – 114 (In Russian).

А. С. Гусаров

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

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕПЛОМ ПОТРЕБЛЕНИИ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИКАЦИИ

Аннотация. В статье на основе термодинамического анализа рабочего процесса в турбине представлена методика определения выработки электроэнергии на тепловом потреблении и сделано предположение о возможности инструментального измерения величины выработки и осуществления учета в реальных условиях эксплуатации паровой турбины. Этот показатель может стать важным индикатором в системе теплофикации и автоматического регулирования отпуска тепловой энергии, такая постановка проблемы в системе теплофикации сделана впервые и требует дополнительных исследований. В настоящей работе рассмотрено влияние выработки электроэнергии на тепловом потреблении на эффективность работы энергетической системы теплофикации. Получены зависимости выработки электроэнергии на тепловом потреблении от доли пара, направляемого в теплофикационный отбор. Определена удельная выработка электроэнергии с учетом регенерации.

Ключевые слова: комбинированный цикл, теплофикация, паротурбинная установка.

Artem S. Gusarov

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

TO THE QUESTION OF DETERMINING ELECTRIC POWER GENERATION AT THERMAL CONSUMPTION UNDER THE CONDITIONS OF OPERATION OF THE AUTOMATED CYCLE CENTRAL HEATING COGENERATION SYSTEM

Abstract. In the article, on the basis of the thermodynamic analysis of the working process in the turbine, a method is presented for determining the generation of electricity based on heat consumption and an assumption is made about the possibility of instrumental measurement of the amount of generation and the implementation of accounting in real operating conditions of the steam turbine. This indicator can become an important indicator in the district heating system and automatic regulation of heat energy supply, such a statement of the problem in the district heating system was made for the first time and requires additional research. The article discusses the influence of electricity generation on thermal consumption on the efficiency of the power system of district heating. Dependences of electricity generation based on heat consumption on the share of steam supplied to the heating extraction are obtained. Specific power generation has been determined taking into account regeneration.

Keywords: combined cycle, central heating, steam turbine plant.

Каждая паротурбинная установка (ПТУ) снабжается системой регенеративного подогрева питательной воды паром из регенеративных отборов из проточной части турбины. Применение регенеративного подогрева на ТЭС увеличивает КПД конденсационных турбоустановок [1, 2], позволяет повышать выработку электрической энергии на тепловом потреблении в теплофикационных установках. Величина выработки электроэнергии вычисляется по формулам Рыжкина В. Я. и Соколова Е. Я. [3], в данной работе предлагается уточненный метод определения этого параметра с учетом конкретной схемы ТЭЦ – систем регенерации, теплофикации, промышленных отборов и в зависимости от доли общего пара, проходящего через турбину. Актуальность исследования и важность достоверного учета выработки электроэнергии на тепловом потреблении заключается в том, что затраты тепла пара на выработку энергии при комбинированном способе меньше, чем затраты тепла при выработке энергии раздельным способом, следовательно, на основе этого параметра работы теплофикационной системы станции возможна экономия топлива за счет оптимального перераспределения нагрузок между турбоустановками и загрузки их теплофикационных отборов.

Вопрос определения выработки электроэнергии на тепловом потреблении в теплофикационной системе касается взаимного влияния расходов пара из теплофикационных регенеративных отборов турбины, суммарно создающих эффект этой выработки. Оценить и учесть эти взаимосвязи и является целью предлагаемых результатов исследований.

В качестве примера рассмотрим в структурном виде (рисунок 1) схему теплофикационной паротурбинной установки, имеющей один отбор пара для целей теплофикации № 1 в точке 7 с долей расхода пара $\gamma = \frac{D_1}{D_0}$, и три отбора пара на регенерацию – в точках 3, 4, 5 с соответствующими долями расхода $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

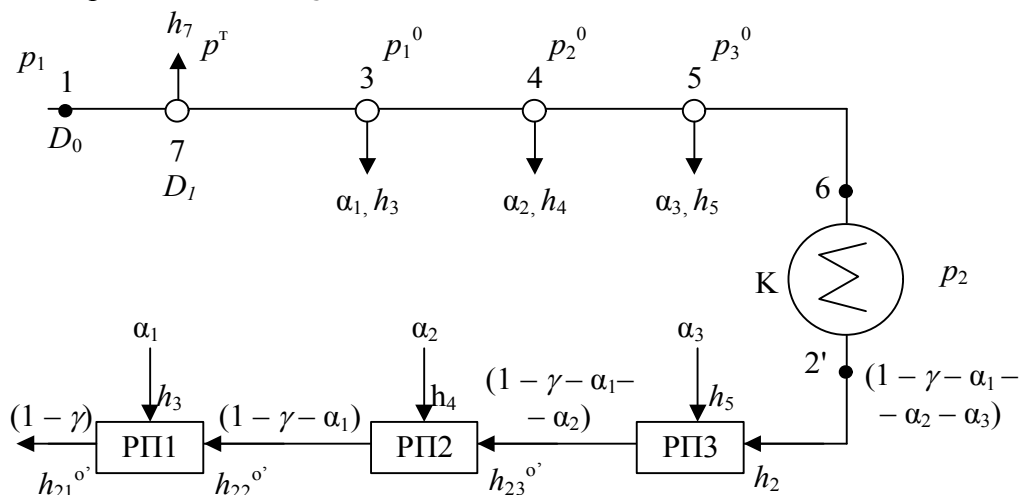


Рисунок 1 – Схема теплофикационной паротурбинной установки

На рисунке 1 обозначено: точка 1 – исходное состояние перегретого пара с параметрами p_1, T_1 и расходом D_0 ; точка 7 – отбор пара с энтальпией h_7 на теплофикацию с расходом D_1 ; точки 3, 4, 5 – регенеративные отборы пара с соответствующими энтальпиями h_3, h_4, h_5 , направляемые в регенеративные подогреватели РП1, РП2, РП3 соответственно; точка 6 – состояние пара перед конденсатором К; точка 2' – состояние теплоносителя после конденсатора.

В соответствии с обозначениями приведем рабочий процесс ПТУ в координатах Т-S (рисунок 2). Точка 2 соответствует состоянию пара перед конденсатором, если бы рабочий процесс расширения пара в турбине проходил изоэнтропийно. Действительное состояние пара в конце рабочего процесса в турбине соответствует точке 6, процесс конденсации проходит по линии 6-2-2'.

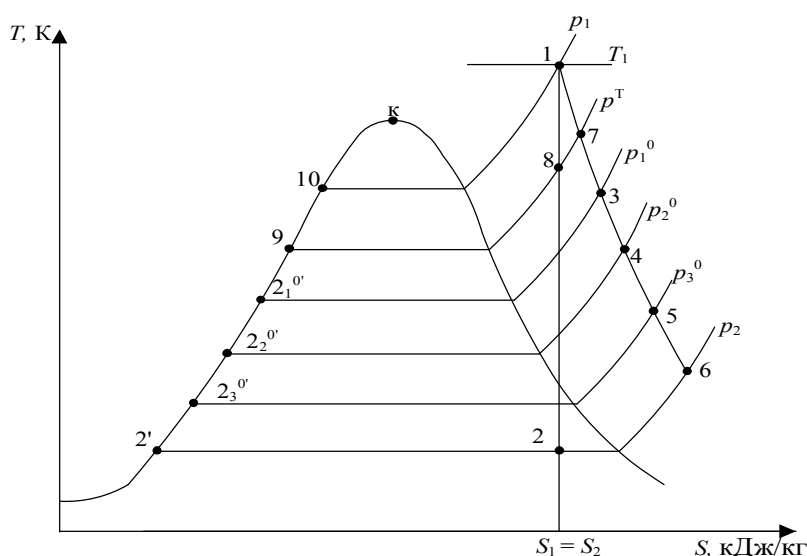


Рисунок 2 – TS-диаграмма с указанием отборов пара турбины

На рисунке 2 показаны условные состояния пара в соответствующих точках в осях T - S : T (абсолютная температура, К) и S (энтропия, кДж/кг) – параметры водяного пара, которые определяют его термодинамическое состояние. Значение T задается в зависимости от турбоустановки или определяется по показаниям датчика, значение S определяется по диаграмме в зависимости от значений параметров p и T . На рисунке приведены также изобары с соответствующими давлениями p_1 – абсолютное давление перегретого пара на входе в ПТУ, p^T – абсолютное давление пара теплофикационного отбора; p_1^0, p_2^0, p_3^0 – абсолютные давления пара регенеративных отборов; p_2 – абсолютное давление в конденсаторе. Точки $2_3^{o'}$, $2_2^{o'}$, $2_1^{o'}$ – состояние конденсатов после соответствующих регенеративных подогревателей РПЗ, РП2, РП1; точка 9 – состояние конденсата после сетевого подогревателя; точка 10 – состояние кипящей воды при исходном давлении пара p_1 ; точка 8 – состояние пара при изоэнтروпийном расширении пара в турбине до давления теплофикационного отбора; точка 2 – конечное состояние пара при изоэнтропийном расширении пара в ПТУ до давления в конденсаторе p_2 .

Общий расход пара в долях соответствует условию: $1 = \gamma + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$.

Составлены тепловые балансы смешивающих подогревателей и определены доли расхода пара из регенеративных отборов в эти подогреватели, которые вычисляются по формулам [4, 5]:

а) для регенеративного подогревателя РП1 –

$$\alpha_1 = \frac{(1 - \gamma)(h_{21}^{o'} - h_{22}^{o'})}{h_3 - h_{21}^{o'} - h_{22}^{o'}}; \quad (1)$$

б) для регенеративного подогревателя РП2 –

$$\alpha_2 = \frac{(1 - \gamma - \alpha_1)(h_{22}^{o'} - h_{23}^{o'})}{h_4 - h_{22}^{o'} - h_{23}^{o'}}; \quad (2)$$

в) для регенеративного подогревателя РП3 –

$$\alpha_3 = \frac{(1 - \gamma - \alpha_1 - \alpha_2)(h_{23}^{o'} - h_{21})}{h_5 - h_{23}^{o'} - h_2}. \quad (3)$$

В формулах (1) – (3) принимаются энтальпии кипящей воды при давлении регенеративных отборов p_1^0, p_2^0, p_3^0 в соответствии с тепловыми балансами подогревателей РП1, РП2, РП3: h_2' – энтальпия перед подогревателем РП3; $h_{23}^{o'}$ – энтальпия перед подогревателем РП2 после РП3; $h_{22}^{o'}$ – энтальпия перед подогревателем РП1 после РП2; $h_{21}^{o'}$ – энтальпия после подогревателя РП1 (см. рисунок 1).

При заданных начальных параметрах пара и давлении отборов, принятом приближенно, в соответствии со средними значениями в действующих системах $p^T = 0,8$ МПа; $p_1^0 = 0,6$ МПа; $p = 0,4$ МПа; $p_3^0 = 0,1$ МПа. Расчетные результаты сведены в таблицу 1.

Данные таблицы 1 показывают, что с ростом расхода пара в теплофикационный отбор снижаются расходы пара в регенеративные отборы [6]. Снижается и доля пропуска пара в конденсатор.

С помощью диаграмм для водяного пара выполнены вычисления термодинамических параметров в характерных точках цикла, приведенного на рисунке 2. При вычислении значение относительного внутреннего КПД каждой ступени турбины принято для упрощения расчетов одинаковым и равным 0,82. Рабочий процесс истечения пара в турбине 1 – 6 (см. рисунок 2)

представляет собой термодинамический политропный процесс как совокупность ряда политропных процессов, зависящий от того, как реализована тепловая схема турбины.

Таблица 1 – Изменение долей регенеративных отборов пара

Доля отбора пара на теплофикацию γ	Доля отборов пара в регенеративные подогреватели			Доля пара – пропуск в конденсатор $\alpha_k = 1 - (\gamma + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)$
	α_1	α_2	α_3	
0	0,0422	0,1024	0,1295	$1 - 0,2741 = 0,7259$
0,1	0,0380	0,0921	0,1111	$1 - 0,3412 = 0,6588$
0,2	0,0338	0,0819	0,0987	$1 - 0,4144 = 0,5856$
0,3	0,0296	0,0717	0,0864	$1 - 0,4877 = 0,5123$
0,4	0,0253	0,0614	0,0741	$1 - 0,5608 = 0,4392$
0,5	0,0211	0,0512	0,0617	$1 - 0,6340 = 0,3660$
0,6	0,0169	0,0410	0,0494	$1 - 0,7073 = 0,2927$

В расчетной схеме приняты один отбор пара на теплофикационные нужды (поток пара в процессе 1 – 7 с долей отбора γ) и три отбора пара на регенеративный подогрев питательной воды (потоки пара в процессах 1 – 3, 1 – 4, 1 – 5 с соответствующими долями отборов α_1 , α_2 , α_3). Оставшийся поток пара направляется в конденсатор турбины с долей $1 - (\gamma + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)$ в процессе 1 – 6.

В каждом указанном процессе выполняется полезная работа, входящая частично в совокупный эффект выработки электроэнергии турбоагрегатом.

Значение полезной работы в каждом политропном процессе определялось в соответствии с законами термодинамики [1, 7, 8]. Расширение 1 кг пара в процессе 1 – 7 описывается формулой

$$l_{1-7} = q_{1-7} - \Delta u_{1-7}. \quad (4)$$

Формула (4) выражает уравнение первого закона термодинамики: q_{1-7} – тепло в политропном процессе расширения пара 1 – 7, кДж/кг; l_{1-7} – работа пара в процессе 1 – 7, кДж/кг; Δu_{1-7} – изменение внутренней энергии пара, кДж/кг.

$$q_{1-7} = \frac{T_1 + T_7}{2} (S_7 - S_1); \quad (5)$$

$$\Delta u_{1-7} = (h_7 - h_1) - (p_7 v_7 - p_1 v_1), \quad (6)$$

где T_1 , T_7 и S_1 и S_7 – абсолютные температуры и энтропии пара в начале и в конце процесса расширения пара 1 – 7 в соответствии со вторым законом термодинамики; h_1 , h_7 , p_1 , p_7 , v_1 , v_7 – соответственно энтальпии, абсолютные давления и удельные объемы пара в процессе 1 – 7.

Приведенные формулы для процесса 1 – 7 будут аналогичны для всех указанных процессов, характеризующих отборы в турбине.

Работа пара в процессе теплофикации:

$$l_T = \gamma l_{1-7}. \quad (7)$$

Работа пара в процессе регенерации, кДж/кг:

$$l_p = \alpha_1 l_{1-3} + \alpha_2 l_{1-4} + \alpha_3 l_{1-5}. \quad (8)$$

Работа в процессе пропуска пара в конденсатор, кДж/кг:

$$l_k = \alpha_k l_{1-6}. \quad (9)$$

Суммарная работа в цикле, кДж/кг, вычисляется по формуле:

$$l_{\Sigma} = l_{т+р} + l_k = \gamma l_{1-7} + \alpha_1 l_{1-3} + \alpha_2 l_{1-4} + \alpha_3 l_{1-5} + \alpha_k l_{1-6}, \quad (10)$$

где $l_{т+р}$ – работа пара на тепловом потреблении (теплофикация и регенерация), кДж/кг.

Подведенное количество тепла в приведенном цикле, кДж/кг, определяется по формуле:

$$q_1 = h_1 - h_{21}^{o'} = 3454 - 721,1 = 2732,9 \text{ кДж/кг}, \quad (11)$$

где q_1 – подведенное тепло в комбинированном цикле как разность энтальпий свежего пара h_1 и энтальпии питательной воды после регенеративного подогревателя $h_{21}^{o'}$ РП1 (определены по hS-диаграмме состояния воды и водяного пара). В формуле (11) приведены числовые значения энтальпии исходного состояния водяного пара и энтальпии кипящей воды при давлении p_2 в конденсаторе. Они определены по термодинамическим таблицам воды и водяного пара в соответствии с данными задания рассмотренного в статье примера.

Тогда термический КПД цикла η_t определяется как отношение полезной работы l_{Σ} к подведенному количеству тепла [9]:

$$\eta_t = \frac{l_{\Sigma}}{q_1}. \quad (12)$$

На рисунках 3 – 5 приведены зависимости энергетических показателей теплофикационной системы при заданных значениях загрузки теплофикационного отбора γ : термический КПД цикла; выработка электроэнергии на тепловом потреблении $\mathcal{E}_{т+р}$, общая выработка электроэнергии $\mathcal{E}_{\Sigma}$ с учетом электромеханического КПД $\eta_{эм} = 0,96$ на 1 кг расходуемого пара; доля выработки электроэнергии на тепловом потреблении от общей выработки.

Графики построены по результатам расчетов, которые приведены в таблице 2.

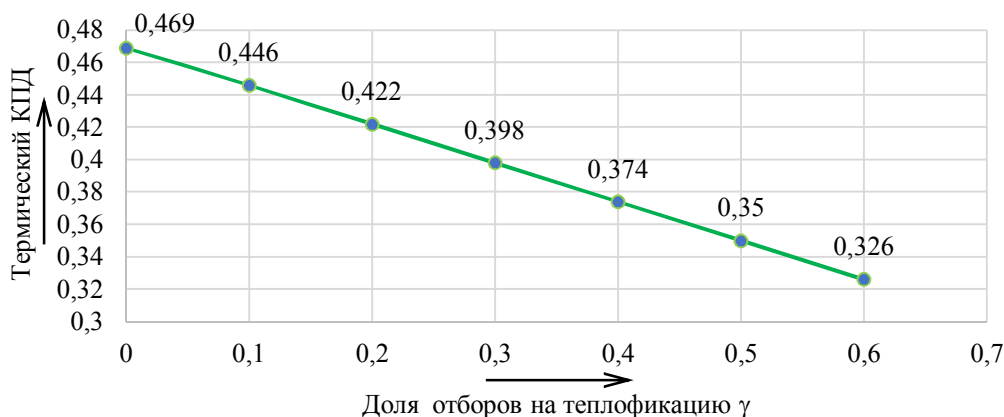


Рисунок 3 – Зависимость термического КПД от доли отборов пара на теплофикацию

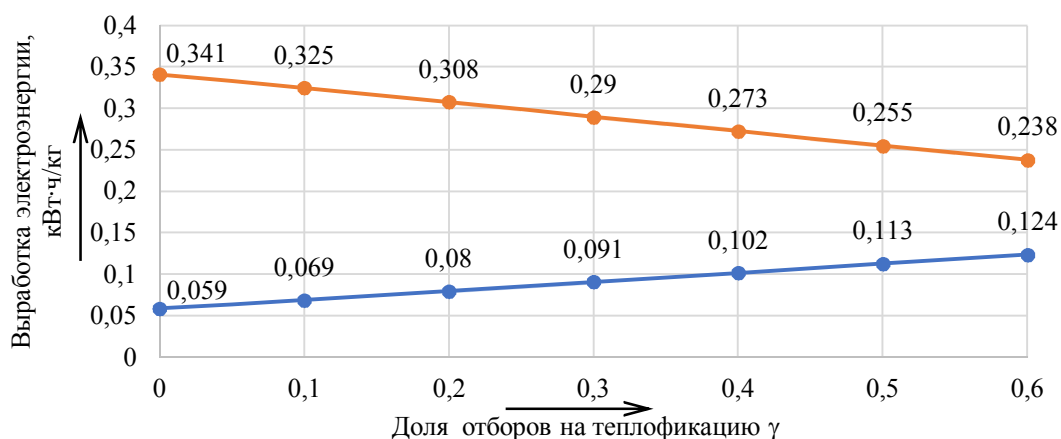


Рисунок 4 – Зависимость общей выработки электроэнергии $\mathcal{E}_{\Sigma}$ и выработки электроэнергии на тепловом потреблении $\mathcal{E}_{т+р}$ от доли отборов пара на теплофикацию

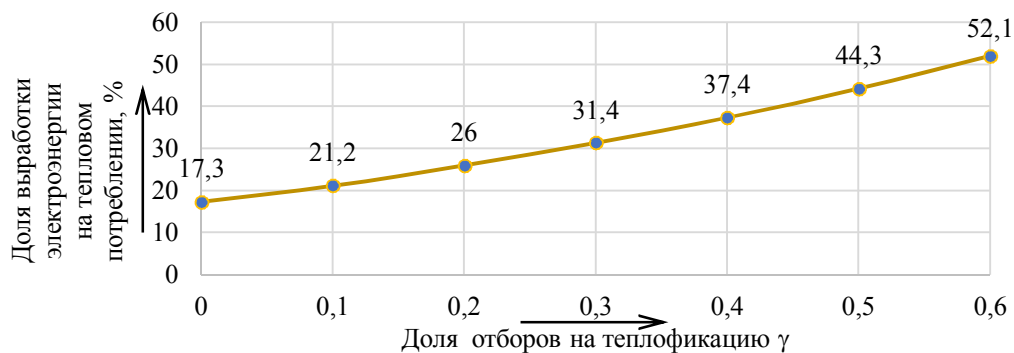


Рисунок 5 – Зависимость доли выработки электроэнергии на тепловом потреблении относительно общей выработки электроэнергии от доли отборов пара на теплофикацию

Таблица 2 – Энергетические показатели работы теплофикационной системы, рассмотренной в расчетном примере

Доля отбора пара на теплофикацию, γ	Полезная работа в процессах 1 – 7, 1 – 3, 1 – 4, 1 – 5, взятая соответствующими долями, кДж/кг				Суммарная полезная работа от отборов пара: $l_{т+р} = \gamma l_{1-7} + \alpha_1 l_{1-3} + \alpha_2 l_{1-4} + \alpha_3 l_{1-5}$, кДж/кг	Полезная работа от пропуска в конденсатор: $l_{\kappa} = \alpha_{\kappa} l_{1-6}$, кДж/кг	Вся полезная работа в цикле: $l_{\Sigma} = l_{т+р} + l_{\kappa}$, кДж/кг	Термический КПД цикла: $\eta_t = \frac{l_{\Sigma}}{q_1}$
	работа пара теплофикационного отбора γl_{1-7}	работа пара регенеративных отборов						
		$\alpha_1 l_{1-3}$	$\alpha_2 l_{1-4}$	$\alpha_3 l_{1-5}$				
0	0	28,7	76,9	117,0	222,7	1058,9	1281,7	0,469
0,1	62,7	25,8	69,2	100,4	258,2	961,1	1219,3	0,446
0,2	125,5	22,9	61,5	89,2	299,2	854,3	1153,5	0,422
0,3	188,2	20,1	53,9	78,1	340,3	747,4	1087,7	0,398
0,4	250,9	17,2	46,1	66,9	381,3	640,7	1022,0	0,374
0,5	313,7	14,3	38,5	55,7	422,3	533,9	956,2	0,350
0,6	376,5	11,4	30,8	44,6	463,4	427,0	890,4	0,326

Вычисление величины выработки электроэнергии в процессе теплофикации, кВт·ч/кг:

$$\mathcal{E}_t = \frac{(\gamma l_{1-7}) \cdot \eta_{эм}}{3600} = \frac{l_t \cdot \eta_{эм}}{3600}. \quad (13)$$

Вычисление величины выработки электроэнергии в процессе регенерации, кВт·ч/кг:

$$\mathcal{E}_p = \frac{(\alpha_1 l_{1-3} + \alpha_2 l_{1-4} + \alpha_3 l_{1-5}) \cdot \eta_{эм}}{3600} = \frac{l_p \cdot \eta_{эм}}{3600}. \quad (14)$$

Вычисление величины выработки электроэнергии на тепловом потреблении (на теплофикацию и регенерацию), кВт·ч/кг:

$$\mathcal{E}_{\text{т+р}} = \frac{(\gamma l_{1-7} + \alpha_1 l_{1-3} + \alpha_2 l_{1-4} + \alpha_3 l_{1-5}) \cdot \eta_{\text{эм}}}{3600} = \frac{l_{\text{т+р}} \cdot \eta_{\text{эм}}}{3600} = \mathcal{E}_{\text{т}} + \mathcal{E}_{\text{р}}. \quad (15)$$

Вычисление величины выработки электроэнергии от пропуска пара в конденсатор, кВт·ч/кг:

$$\mathcal{E}_{\text{к}} = \frac{(\alpha_{\text{к}} l_{1-6}) \cdot \eta_{\text{эм}}}{3600} = \frac{l_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{эм}}}{3600}. \quad (16)$$

Общая выработка электроэнергии (на теплофикацию, регенерацию и от пропуска пара в конденсатор):

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \frac{(l_{\text{т+р}} + l_{\text{к}}) \cdot \eta_{\text{эм}}}{3600} = \frac{l_{\Sigma} \cdot \eta_{\text{эм}}}{3600} = \mathcal{E}_{\text{т+р}} + \mathcal{E}_{\text{к}}. \quad (17)$$

Таблица 3 – Результаты расчетов общей выработки электроэнергии и выработки электроэнергии на тепловом потреблении

Доля отбора пара на теплофикацию γ	Выработка электроэнергии от отбора на теплофикацию $\mathcal{E}_{\text{т}}$, кВт·ч/кг	Выработка электроэнергии от отбора на регенерацию $\mathcal{E}_{\text{р}}$, кВт·ч/кг	Выработка электроэнергии на тепловом потреблении $\mathcal{E}_{\text{т+р}}$, Вт·ч/кг	Выработка электроэнергии от пропуска пара в конденсатор $\mathcal{E}_{\text{к}}$, кВт·ч/кг	Общая выработка электроэнергии $\mathcal{E}_{\Sigma}$, кВт·ч/кг	Доля выработки $\frac{\mathcal{E}_{\text{т+р}}}{\mathcal{E}_{\Sigma}} \cdot 100$, %
0	0	0,059	0,059	0,282	0,341	17,3
0,1	0,017	0,052	0,069	0,256	0,325	21,2
0,2	0,034	0,046	0,080	0,228	0,308	26,0
0,3	0,050	0,035	0,091	0,199	0,290	31,4
0,4	0,067	0,030	0,102	0,171	0,273	37,4
0,5	0,084	0,030	0,113	0,142	0,255	44,3
0,6	0,100	0,023	0,124	0,114	0,238	52,1

Из приведенных на рисунках 3 – 5 графических зависимостей следует, что с ростом теплофикационного отбора γ снижается термический КПД цикла $\eta_{\text{т}}$. Выработка электроэнергии на тепловом потреблении с увеличением доли теплофикационного отбора γ возрастает (см. рисунок 4).

При отсутствии теплофикационного отбора ($\gamma = 0$) доля выработки электроэнергии на тепловом потреблении от общей выработки составляет 17,3 %, что достигается за счет отбора пара на регенерацию (см. рисунок 5).

Более информативной величиной процесса преобразования энергии в системе теплофикации в условиях работы ПТУ является выработка электроэнергии q , приходящаяся на единицу тепловой энергии отборного пара (1 ГДж) [3, 8, 10].

Удельные значения выработки электроэнергии на тепловом потреблении вычисляются по формулам, кВт·ч/ГДж:

с учетом теплофикационного отбора, но без учета регенеративных отборов –

$$\mathcal{E}_{\text{т}}^q = \frac{\gamma l_{1-7} \cdot \eta_{\text{эм}}}{Q_{\text{т}}} \cdot \frac{10^6}{3600} = \frac{\mathcal{E}_{\text{т}} \cdot 10^6}{Q_{\text{т}}}, \quad (18)$$

с учетом теплофикационного отбора и регенеративных отборов –

$$\mathcal{E}_{\text{т+р}}^q = \frac{l_{\text{т+р}} \cdot \eta_{\text{эм}}}{Q_{\text{т}} + Q_{\text{р}}} \cdot \frac{10^6}{3600} = \frac{\mathcal{E}_{\text{т+р}} \cdot 10^6}{Q_{\text{т}} + Q_{\text{р}}}; \quad (19)$$

где Q_T – количество теплоты пара, расходуемого в теплофикационный отбор, кДж/кг,
 Q_p – количество теплоты пара, расходуемого в регенеративные отборы, кДж/кг.

Если пар на регенерацию расходуется в трех регенеративных отборах (РП1, РП2, РП3), то суммарное количество тепла определяется как $Q_p = \alpha_1 Q_{p1} + \alpha_2 Q_{p2} + \alpha_3 Q_{p3} = \alpha_1 (h_3 - h_{21}'') + \alpha_2 (h_4 - h_{22}'') + \alpha_3 (h_5 - h_{23}'')$ с соответствующими долями пара в отборы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. Тепло теплофикационного отбора $Q_T = \gamma (h_7 - h_9)$. В таблицу 4 занесены результаты расчетов количества тепла на тепловое потребление $Q_\Sigma = Q_T + Q_p$ и значения удельной выработки электроэнергии.

В таблице 4 приведены результаты расчетов изменения распределения тепловых потоков пара, расходуемого на ПТУ в зависимости от изменения отбора пара на теплофикацию.

Таблица 4 – Результаты расчетов удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении

Доля отбора пара на теплофикацию γ	Количество тепла из регенеративных отборов, кДж/кг				Q_T , кДж/кг	Q_Σ , кДж/кг	$\mathcal{E}_T^q$, кВт·ч/ГДж	$\mathcal{E}_{T+p}^q$, кВт·ч/ГДж
	РП1 $\alpha_1 (h_3 - h_{21}'')$	РП2 $\alpha_2 (h_4 - h_{22}'')$	РП3 $\alpha_3 (h_5 - h_{23}'')$	Q_p				
0	91,2	222,1	281,3	594,6	0	594,6	0	99,90
0,1	82,1	199,7	241,3	523,2	215,6	738,8	77,46	93,26
0,2	73,1	177,6	214,4	465,1	431,2	896,3	77,69	89,03
0,3	64,0	155,5	187,7	407,2	646,8	1054,0	77,61	86,15
0,4	54,7	133,2	161,0	348,8	862,4	1211,2	77,58	84,05
0,5	45,6	111,0	134,0	290,7	1008,0	1298,7	77,55	82,27
0,6	36,5	89,9	107,3	232,8	1293,6	1526,4	77,61	80,98

Значения величины $\mathcal{E}_T^q$ удельной выработки электроэнергии на 1 ГДж отбираемого тепла постоянны, так как параметры пара на теплофикационный отбор постоянны и не зависят от доли отбора γ . Значения $\mathcal{E}_{T+p}^q$ удельной выработки с учетом пара на теплофикацию и регенерацию снижаются с ростом γ , так как меньше пара поступает в регенеративные отборы, т. е. снижаются доли $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

На рисунке 6 показано, как изменяется структура распределения тепловых потоков пара по мере роста доли отбора на теплофикацию γ .

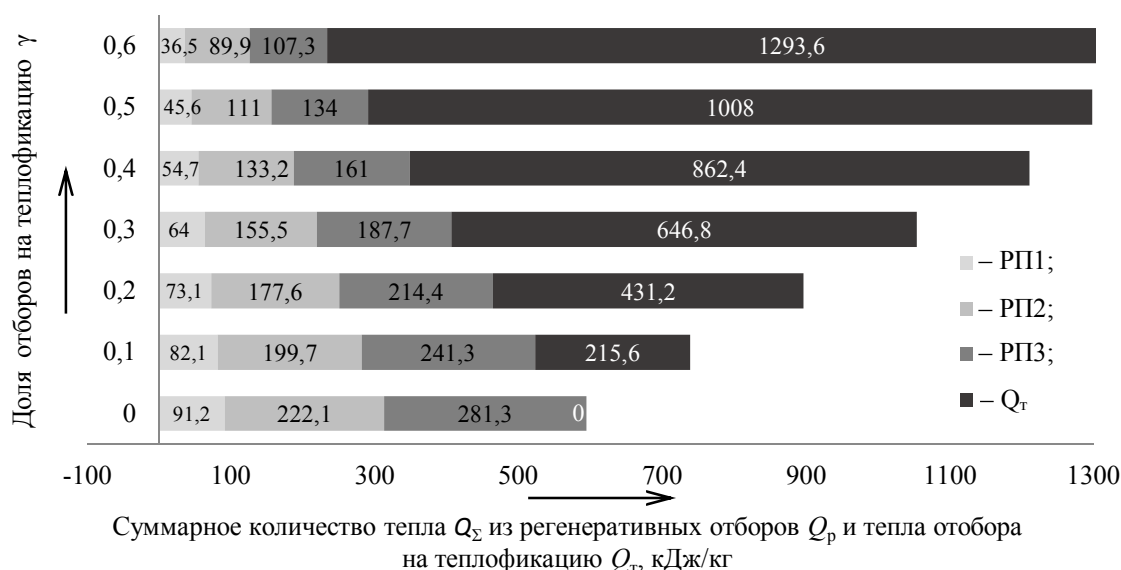


Рисунок 6 – Изменение распределения тепловых потоков пара при росте отбора на теплофикацию

Подробный анализ потоков пара требуется для определения удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении и оценки эффективности работы цикла теплофикационной турбины.

На основании изложенного сделаем выводы.

1. Найден способ определения энергетических показателей системы теплофикации с учетом действительной технологической схемы, в том числе удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

2. Удельная выработка электроэнергии на 1 ГДж тепловой энергии пара, используемой для теплофикации, не зависит от величины доли его отбора.

3. Полученный способ определения выработки электроэнергии на тепловом потреблении в условиях работы автоматизированной системы теплофикации может быть использован для создания алгоритма работы автоматизированного процесса учета и анализа выработки электроэнергии в реальных условиях работы турбоустановок в системах теплоснабжения.

Список литературы

1. Вукалович, М. П. Техническая термодинамика : учебное пособие / М. П. Вукалович, И. И. Новиков. – Москва-Ленинград : Гос. энергет. изд-во, 1952. – 568 с. – Текст : непосредственный.

2. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика : учебник / В. А. Кириллин. – Москва : МЭИ, 2019. – Текст : электронный // ЭБС «Консультант студента» : сайт. – URL : <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383011560.html> (дата обращения: 10.07.2021).

3. Рыжкин, В. Я. Тепловые электрические станции : учебник / В. Я. Рыжкин; под ред. В. Я. Гиришфельда. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 328 с. – Текст : непосредственный.

4. Назмеев, Ю. Г. Теплообменные аппараты ТЭС : учебное пособие / Ю. Г. Назмеев, В. М. Лавыгин. – Москва : МЭИ, 2002. – 260 с. – Текст : непосредственный.

5. Гусаров, А. С. Повышение эффективности управления паротурбинной установкой при выработке электрической энергии на ТЭС / А. С. Гусаров, В. В. Овсянников. – Текст : непосредственный // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы международной научно-практической конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 258–264.

6. Лебедев, В. М. Источники и системы теплоснабжения предприятий : монография / В. М. Лебедев, С. В. Приходько. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 232 с. – Текст : непосредственный.

7. Луканин, В. Н. Теплотехника : учебник / В. Н. Луканин. – Москва : Высшая школа, 2005. – 671 с. – Текст : непосредственный.

8. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети : учебник / Е. Я. Соколов. – Москва : МЭИ, 2001. – 472 с. – Текст : непосредственный.

9. Гусаров, А. С. Оценка эффективности теплофикационного цикла паротурбинной установки с регенеративным отбором пара / А. С. Гусаров, В. В. Овсянников. – Текст : непосредственный // Повышение энергоэффективности объектов и систем теплоснабжения : материалы всероссийской научно-технической конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 45–53.

10. Трухний, А. Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки : учебное пособие / А. Д. Трухний, Б. В. Ломакин. – Москва : МЭИ, 2002. – 539 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Vukalovich M. P. *Tekhnicheskaja termodinamika: uchebnoe posobie* (Technical thermodynamics: a tutorial). Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo Publ., 1952, 568 p.

2. Kirillin V. A. *Tekhnicheskaya termodinamika: uchebnik* (Technical thermodynamics: textbook). Moscow: MPEI Publ., 2019. Available at: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383011560.html> (accessed 10 July 2021).
3. Ryzhkin V. Ya., ed. Girshfel'd V. Ia. *Teplovye elektricheskie stantsii: uchebnik* (Thermal power stations: textbook). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1987, 328 p.
4. Nazmeev Yu. G., Lavygin V. M. *Teploobmennye apparaty TES: uchebnoe posobie* (Heat exchangers of thermal power plants: textbook). Moscow: MPEI Publ., 2002, 260 p.
5. Gusarov A. S., Ovsyannikov V. V. Increasing the efficiency of control of a steam turbine plant when generating electric power at thermal power plants [Povyshenie effektivnosti upravleniya paroturbinnoi ustanovki pri vyrabotke elektricheskoi energii na TES]. *Razrabotka i ekspluatatsiya elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Development and operation of electrotechnical complexes and systems of power engineering and ground transport: materials of the international scientific and practical conference). – Omsk, 2020, pp. 258–264.
6. Lebedev V. M., Prihodko S. V. *Istochniki i sistemy teplosnabzheniya predpriyatii: monografiya* (Sources and systems of heat supply of enterprises: monograph). Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2010, 232 p.
7. Lukanin V. N. *Teploekhnika: uchebnik* (Heat engineering: textbook). Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2005, 671 p.
8. Sokolov E. Ya. *Teplofikatsiya i teplovye seti: uchebnik* (Heating and heating networks: textbook). Moscow: MPEI Publ., 2001, 472 p.
9. Gusarov A. S., Ovsyannikov V. V. Assessment of efficiency of the heating cycle of steam-turbine installation with regenerative selection of steam [Otsenka effektivnosti teplofikatsionnogo tsikla paroturbinnoi ustanovki s regenerativnym otborom para]. *Povyshenie energoeffektivnosti ob"ektov i sistem teplosnabzheniya: materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (Increasing the energy efficiency of heat supply facilities and systems: materials of the All-Russian scientific and technical conference). – Omsk, 2019, pp. 45–53.
10. Trukhny A. D., Lomakin B. V. *Teplofikatsionnye parovye turbiny i turbostanovki: uchebnoe posobie* (Heating steam turbines and turbine installations: textbook). Moscow: MPEI Publ., 2002, 539 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гусаров Артем Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: henaro9812@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gusarov Artem Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Lecturer of the department «Thermal engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: henaro9812@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гусаров, А. С. К вопросу определения выработки электроэнергии на тепловом потреблении в условиях работы автоматизированной системы теплофикации / А. С. Гусаров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 115 – 124.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gusarov A. S. To the question of determining electric power generation at thermal consumption under the conditions of operation of the automated cycle central heating co-generation system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 115 – 124 (In Russian).

К. С. Петров, В. В. Петров

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

АСТИГМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛА МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ОСЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ПОДХОДА

Аннотация. Для повышения точности диагностирования технического состояния подвижного состава необходимо разрабатывать новые алгоритмы для цифровой обработки сигналов, поступающих от датчиков в момент прохождения осей колесных пар вагонных тележек в процессе равномерного движения поезда по прямолинейному участку железнодорожного пути. Применение современных математических пакетов прикладных программ для моделирования алгоритмов обработки данных на основе цифровых технологий позволяют сократить затраты и время на разработку автоматизированных систем для диагностирования технического состояния тележек подвижного состава железнодорожного транспорта. Для оценки точности фиксации магнитоиндукционным датчиком момента прохождения осей колесных пар в работе предложена астигматическая модель, позволяющая исследовать не только энергетические свойства датчика, но и форму выходного сигнала с учетом реальных габаритных размеров его магнитного сердечника. Разработанная модель позволяет классифицировать порядок астигматизма модели магнитоиндукционного датчика на основе набора дискретных виртуальных датчиков.

Ключевые слова: астигматическая модель, электромеханическая система, моделирование, подвижной состав, ось, колесная пара, дискретизация, автоматизация, магнитоиндукционный датчик, виртуализация.

Konstantin S. Petrov, Vladimir V. Petrov

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

ASTHIGMATIC MODEL OF MAGNETOINDUCTION SIGNAL OF ROLLING STOCK AXIS OF RAILWAY TRANSPORT BASED ON DISCRETE APPROACH

Abstract. To improve the accuracy of the diagnosis of the technical condition of rolling stock, it is necessary to develop new algorithms for the digital processing of signals coming from sensors at the time of the passage of the axes of wheeled pairs of wagon carts during the uniform movement of the train on the straight section of the railway track. The use of modern mathematical application software packages to model digital-based data processing algorithms reduces the cost and time of developing automated systems to diagnose the technical condition of the rolling stock of railways. To assess the accuracy of the fixation by the magneto-induction sensor of the moment of passage of wheel pairs axly, an asthigmatic model is proposed, allowing to investigate not only the energy properties of the sensor, but also the shape of the output signal, taking into account the real dimensions of its magnetic core. The developed model allows you to classify the pore. The developed model allows to classify the order of astigmatism model magnetoinduction sensor based on a set of discrete virtual sensors

Keywords: asthigmatic model, electromechanical system, simulation, rolling stock, axis, wheeled steam, discrete, automation, magnetoduction sensor, virtualization.

Автоматизация измерений, регистрации и обработки кинематических параметров тележек подвижного состава в процессе равномерного движения поезда по прямолинейному рельсовому пути обеспечивает оперативность и достоверность диагностирования технического состояния железнодорожного транспорта, что повышает безопасность и эффективность процесса его эксплуатации [1 – 3]. Основу любых автоматизированных систем диагностирования составляют первичные измерительные преобразователи различных геометрических параметров подвижных единиц железнодорожного транспорта, точность и надежность которых определяет основные характеристики любых информационных систем. На железнодорожном транспорте точечные датчики прохождения осей подвижного состава закреплены на кронштейнах вдоль рельсового пути, которые находятся в наиболее жестких и суровых условиях эксплуатации как от механических, так и от различных климатических воздействий. В работах

[4 – 6] рассмотрены математические модели точечных магнитоиндукционных датчиков, размеры магнитной системы которых значительно меньше по сравнению с радиусом колеса железнодорожного вагона, что позволило реализовать эти модели на основе стигматического подхода. Реализация точечной (стигматической) модели позволяет оценить только энергетические параметры сигнала на выходе магнитоиндукционного датчика, но не дает возможности описать форму выходного сигнала, которая несет намного больше информации о свойствах исследуемого объекта, чем точечная модель.

Похожая задача возникала у разработчиков радиолокационных станций, в первых образцах которых была реализована точечная (стигматическая) модель объекта. При этом на экране радара высвечивались только отдельные точки, соответствующие положению объектов в контролируемом пространстве, что не позволяло идентифицировать форму и тип объекта. Для решения этой проблемы в настоящее время применяются в качестве датчиков сигналов фазированные антенные решетки, представляющие собой большое количество одинаковых антенн, равномерно распределенных на определенной площади. Благодаря этому имеется возможность определять групповые цели, форму или даже тип конкретного объекта. В такой системе каждая из многих антенн представляет собой реальный датчик, а в предлагаемой астигматической модели применяются виртуальные точечные датчики, так как магнитоиндукционный датчик имеет монолитный магнитный сердечник, который невозможно разделить на отдельные физические части.

В данной работе дискретная астигматическая модель датчика рассматривается как совокупность нескольких точечных виртуальных датчиков (набора независимых стигматических моделей датчиков), результирующий сигнал которых формируется на основе алгоритма, вычисляющего среднее значение выходных сигналов дискретных виртуальных датчиков. Влияние длины магнитного сердечника датчика (протяженность вдоль рельса) для конкретной математической модели будем оценивать по значению скорости изменения сигнала в момент прохождения оси колесной пары над датчиком. При условии незначительного рассеивания магнитного поля в системе и отсутствия насыщения ферромагнитных элементов в магнитной цепи датчика модель такой системы можно считать практически линейной. Поэтому в процессе разработки предлагаемой астигматической модели применение метода суперпозиции сигналов независимых точечных виртуальных датчиков вполне допустимо.

Предлагаемый дискретный подход позволяет описать порядок астигматизма системы по числу дискретных виртуальных стигматических датчиков, входящих в состав астигматической модели, что напоминает порядок цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой. В таком случае астигматическая модель нулевого порядка будет являться обычной стигматической (точечной) моделью, т. е. без вычисления среднего значения. Такой дискретный подход к реализации астигматической модели позволяет реализовать широкие возможности современных компьютерных систем математического моделирования и цифровой обработки сигналов [7] для исследования параметров и формы выходных сигналов магнитоиндукционных датчиков, имеющих заданные свойства и габариты магнитных сердечников.

Основной целью данной работы является исследование формы выходного сигнала магнитоиндукционного датчика осей колесных пар подвижных единиц на основе предложенных моделей различного порядка астигматизма и заданных параметров датчика для сравнительного анализа эффективности различных алгоритмов, фиксирующих моменты прохождения осей колесных пар над этим датчиком с учетом его реальных размеров.

Таким образом, астигматическая модель представляет собой совокупность виртуальных датчиков, каждый из которых описывается точечной (стигматической) моделью, причем порядок астигматизма определяется числом стигматических моделей, входящих в состав астигматической модели. Основное назначение астигматической модели – описание формы импульсного выходного сигнала в зависимости от конкретных физических параметров магнитоиндукционного датчика.

Для разработки математической модели предварительно необходимо найти зависимость от времени значений воздушных зазоров в системе «колесо – датчик» между различными точками на поверхности сердечника магнитоиндукционного датчика (т. е. между точечными виртуальными датчиками) и гребнем железнодорожного колеса. Схема исследуемой электро-механической системы для анализа взаимного расположения дискретных виртуальных датчиков (точек на поверхности сердечника датчика) и гребня колеса изображена на рисунке 1.

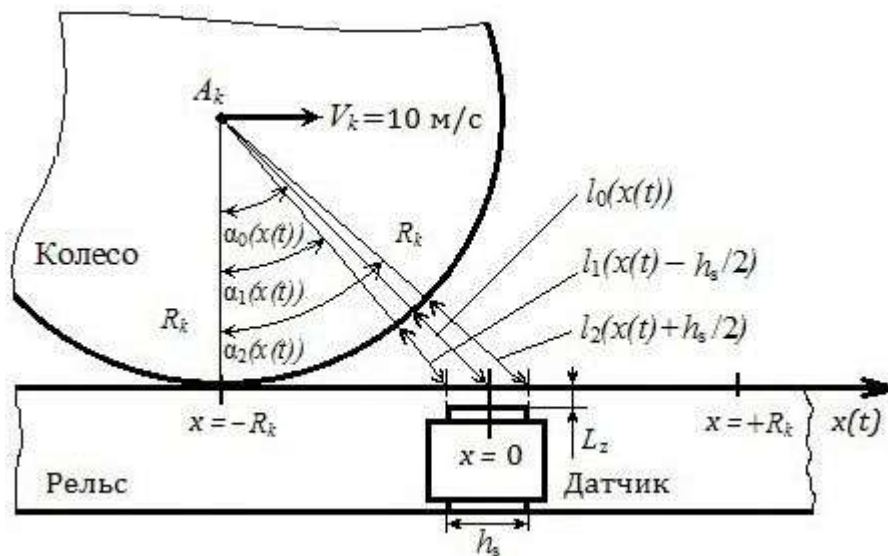


Рисунок 1 – Схема приближения колеса к магнитоиндукционному путевому датчику

На рисунке 1 приняты обозначения: R_k – радиус колеса с учетом гребня; $V_k = 10$ м/с – постоянная скорость движения колеса; $x(t)$ – координата движения колеса, определяющая пройденный путь; $l_0(x(t))$, $l_1(x(t) - h_s/2)$, $l_2(x(t) + h_s/2)$ – значения воздушных зазоров между указанными точками сердечника датчика и гребнем колеса; h_s – длина магнитного сердечника датчика (размер вдоль рельсового пути); $\alpha_0(x(t))$, $\alpha_1(x(t))$, $\alpha_2(x(t))$ – углы между нормалью к рельсу и лучами, выходящими из точки A_k (ось колеса) по направлению к дискретным точкам, расположенным на верхней поверхности головки рельса напротив магнитного сердечника датчика; L_z – минимальное значение воздушного зазора между гребнем колеса, находящегося над поверхностью сердечника датчика (в окрестности точки $x(t) = 0$).

Ось колеса движется вдоль рельсового пути с постоянной скоростью, т. е. изменение координаты во времени определяется как $x(t) = V_k \cdot t$. Исследование процесса приближения и удаления колеса относительно датчика осуществляется в пределах от $-R_k$ до $+R_k$. При этом ось симметрии магнитного сердечника совпадает с координатой $x(t) = 0$ при $t = 0$. Углы $\alpha_m(t)$ между нормалью к рельсу и лучами, определяющими кратчайшие расстояния центра колеса относительно различных дискретных точек магнитного сердечника, можно определить в общем виде так

$$\alpha_m(t) = \tan^{-1} \left[\frac{1}{R_k} \left(x(t) + m \frac{h_s}{2} \right) \right], \quad (1)$$

причем в рассматриваемом случае виртуальные дискретные датчики с номерами $m = 0, 1, 2$ расположены в центре и по краям реального датчика:

$$\alpha_0(t) = \tan^{-1} \left[\frac{1}{R_k} x(t) \right] \quad \text{при } m = 0 \text{ (в центре);} \quad (2)$$

$$\alpha_1(t) = \tan^{-1} \left[\frac{1}{R_k} \left(x(t) - \frac{h_s}{2} \right) \right] \quad \text{при } m = 1 \text{ (слева от центра);} \quad (3)$$

$$\alpha_2(t) = \tan^{-1} \left[\frac{1}{R_k} \left(x(t) + \frac{h_s}{2} \right) \right] \quad \text{при } m = 2 \text{ (справа от центра).} \quad (4)$$

Кратчайшие расстояния (воздушных зазоров) от гребня колеса до указанных дискретных точек (виртуальных точечных магнитоиндукционных датчиков) на поверхности сердечника датчика, с учетом минимального значения эффективного воздушного зазора и диапазона изменения угла $-\pi/4 \leq \alpha_m(t) \leq +\pi/4$ при $-R_k \leq x(t) \leq +R_k$ можно найти в общем виде по выражению:

$$l_{(m)vk}(t) = \frac{R_k}{\cos[\alpha_m(t)]} - R_k + L_z. \quad (5)$$

Таким образом, кратчайшие расстояния от гребня до центра и краев датчика соответственно равны:

$$l_{0vk}(t) = \frac{R_k}{\cos[\alpha_0(t)]} - R_k + L_z \quad \text{при } m = 0; \quad (6)$$

$$l_{1vk}(t) = \frac{R_k}{\cos[\alpha_1(t)]} - R_k + L_z \quad \text{при } m = 1; \quad (7)$$

$$l_{2vk}(t) = \frac{R_k}{\cos[\alpha_2(t)]} - R_k + L_z \quad \text{при } m = 2. \quad (8)$$

Упрощенная схема размещения датчика в поперечном сечении рельсового пути и соответствующая эквивалентная схема двухконтурной магнитной цепи с путями прохождения магнитных потоков для моделирования выходного сигнала магнитоиндукционного датчика изображены на рисунке 2, где приняты следующие обозначения: $e_a(t)$ – электродвижущая сила (ЭДС) на выходе обмотки датчика, возникающая из-за магнитоиндукционного эффекта; $S-N$ – полюсы постоянного магнита, вокруг которого находится обмотка датчика с числом витков w , $\Phi_k(t)$ – обобщенный магнитный поток, проходящий через воздушный зазор $l_{vk}(t)$, величина которого зависит от перемещения гребня колеса относительно датчика; D_s – ширина полюса постоянного магнита датчика; Φ_{vr} – магнитный поток, проходящий через воздушный зазор L_{vr} между магнитным сердечником и головкой рельса, при отсутствии гребня колеса над датчиком; β – угол между нормалью к плоскости поверхности магнитного сердечника датчика и линией между серединами поперечного сечения магнита и боковой поверхности головки рельса.

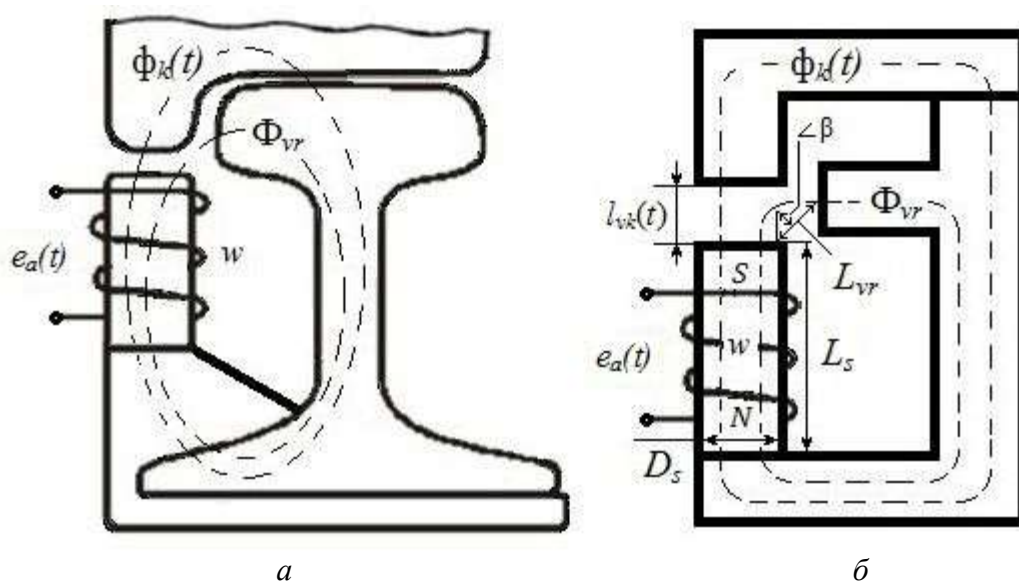


Рисунок 2 – Схемы прохождения магнитных потоков:

a – схема магнитных потоков в системе «датчик – рельс – колесо»; b – эквивалентная двухконтурная схема замещения этой же магнитной цепи для расчета ЭДС выходного сигнала датчика

Эффективная площадь, через которую проходит векторный магнитный поток в воздушном зазоре между постоянным магнитом датчика и гребнем колеса, с учетом влияния изменяющегося угла наклона $\alpha_m(t)$, определяется в общем виде выражением:

$$s_{(m)vk}(t) = D_s h_s \cos[\alpha_m(t)]; \quad (9)$$

при $m = 0, 1, 2$ эти значения площади в каждый момент времени соответственно равны:

$$s_{0vk}(t) = D_s \cdot h_s \cdot \cos[\alpha_0(t)]; \quad (10)$$

$$s_{1vk}(t) = D_s \cdot h_s \cdot \cos[\alpha_1(t)]; \quad (11)$$

$$s_{2vk}(t) = D_s \cdot h_s \cdot \cos[\alpha_2(t)], \quad (12)$$

здесь h_s – длина постоянного магнита датчика (протяженность магнитного сердечника датчика вдоль рельса); D_s – ширина сердечника постоянного магнита (протяженность магнитного сердечника датчика в поперечном направлении к рельсу), создающего магнитный поток в системе «колесо – датчик – рельс».

Эффективная площадь, через которую проходит магнитный поток Φ_{vr} в воздушном зазоре между постоянным магнитом датчика и головкой рельса, с учетом угла наклона вектора этого магнитного потока (при $\beta = \pi/4$) определяется выражением:

$$S_{vr} = D_s h_s \cos(\beta). \quad (13)$$

Для нахождения зависимости магнитного потока от времени сначала необходимо найти магнитные сопротивления всех участков магнитной цепи. Магнитное сопротивление воздушного промежутка между поверхностью сердечника датчика и боковой поверхностью головки рельса

$$R_{vr} = \frac{L_{vr}}{\mu_0 S_{vr}}. \quad (14)$$

Магнитное сопротивление воздушного промежутка между гребнем колеса и различными дискретными точками датчика с учетом выражений (1) – (13)

$$r_{(m)vk}(t) = \frac{l_{(m)vk}(t)}{\mu_0 S_{(m)vk}(t)} \text{ при } m = 0, 1, 2. \quad (15)$$

Магнитное сопротивление сердечника датчика с учетом относительной магнитной проницаемости

$$R_s = \frac{L_s}{\mu_0 \mu_s S_s}. \quad (16)$$

Общее магнитное сопротивление воздушных промежутков между гребнем колеса, головкой рельса и различными дискретными точками датчика с учетом параллельного взаимодействия двух контуров магнитной цепи (см. рисунок 2)

$$r_{(m)v}(t) = \frac{L_{vr} l_{(m)vk}(t)}{L_{vr} S_{(m)vk}(t) + S_{vr} l_{(m)vk}(t)}. \quad (17)$$

Суммарное магнитное сопротивление воздушных промежутков между гребнем колеса и различными дискретными точками датчика с учетом последовательного сопротивления ферромагнитного участка сердечника в контуре магнитной цепи

$$r_{(m)}(t) = R_s + r_{(m)v}(t). \quad (18)$$

Магнитодвижущая сила (МДС) постоянного магнита [8] датчика с учетом величины L_s и магнитной индукции B_s сердечника

$$F_s = B_s L_s. \quad (19)$$

Зависимость магнитного потока от времени в процессе движения колеса над m -м виртуальным датчиком астигматической модели

$$\Phi_{(m)s}(t) = \frac{F_s}{r_{(m)}(t)}. \quad (20)$$

Данная модель предназначена для реализации ее на основе численных методов в любой современной среде программирования, которая не требует большой вычислительной мощности. В выражениях (1) – (20) переменная m определяет порядок астигматизма модели, в которой используется соответствующее число дискретных виртуальных датчиков, входящих в состав астигматической модели. Причем чем выше порядок астигматизма, тем более адекватной будет данная астигматическая модель на основе дискретного подхода (в этом случае уместна аналогия с порядком дифференциального уравнения, описывающего свойства динамического объекта).

Рассмотрим предложенную дискретную модель для трех частных случаев. Первый вариант (при $m = 0$): формируется астигматическая модель нулевого порядка, в которой используется переменная $x_{0s} = x_0$, определяющая местонахождение единственного точечного датчика на оси x . Нулевой порядок астигматизма предполагает, что в системе имеется только один стигматический виртуальный датчик x_{0s} , находящийся в точке с координатой $x_0 = 0$ (см. рисунок 1), через который проходит магнитный поток $\Phi_{0s}(t, m)$. Таким образом, значение $m = 0$ означает реализацию простой стигматической (точечной) модели, т. е. отсутствие астигматизма:

$$\Phi_{cp0}(t, m = 0) = \Phi_{0s}(t, x_{0s} = x_0). \quad (21)$$

Второй вариант реализуется при $m = 1$, т. е. формируется астигматическая модель первого порядка, в которой используется два стигматических датчика с номерами $2m - 1$ (слева от центра сердечника) и $2m$ (справа от центра сердечника), а виртуальный дискретный датчик в центре магнитного сердечника астигматической модели первого порядка отсутствует. В этой модели формируется среднее значение двух дискретных точечных моделей, находящихся в крайних точках сердечника датчика со следующими координатами: $x_{1s} = x_0 - h_s/2$ и $x_{2s} = x_0 + h_s/2$:

$$\Phi_{cp1}(t, m = 1) = \frac{1}{2} \left(\Phi_{(2m-1)s}(t, x_{(2m-1)s} = x_0 - \frac{h_s}{2}) + \Phi_{(2m)s}(t, x_{(2m)s} = x_0 + \frac{h_s}{2}) \right), \quad (22)$$

что означает для стороннего наблюдателя эффект раздвоения одного объекта.

В третьем частном случае (при $m = 2$) реализуется астигматическая модель второго порядка, в которой дополнительно к выражению (22) используется третий точечный датчик $x_{s0} = x_0$, находящийся в центре сердечника. В этой модели вычисляется среднее значение магнитных потоков трех стигматических моделей виртуальных датчиков как в центре магнитного сердечника, так и в крайних точках магнитного сердечника датчика, имеющих, соответственно, следующие координаты: $x_{1s} = x_0 - h_s/2$ (слева от центра), $x_{0s} = x_0$ (в центре датчика) и $x_{2s} = x_0 + h_s/2$ (справа от центра):

$$\begin{aligned} \Phi_{cp2}(t, m = 2) = & \frac{1}{3} \Phi_{(2(m-\gamma)-1)s}(t, x_{(2(m-\gamma)-1)s} = x_0 - \frac{h_s}{2}) + \frac{1}{3} \Phi_{0s}(t, x_{0s} = x_0) + \\ & + \frac{1}{3} \Phi_{(2(m-\gamma))s}(t, x_{(2(m-\gamma))s} = x_0 + \frac{h_s}{2}) \quad \text{при } \gamma = \text{rem}\left(\frac{m+1}{2}\right), \end{aligned} \quad (23)$$

где $x_{(m)s}$ – координаты виртуальных дискретных точечных датчиков на оси x (см. рисунок 1); $\Phi_{cp2}(t, m)$ – результирующее значение магнитного потока, который вычисляется на основе алгоритма нахождения среднего значения магнитных потоков дискретных стигматических моделей датчиков с нечетным номером $(2(m - \gamma) - 1)$, находящихся слева от центра сердечника, и с четным номером $2(m - \gamma)$ – датчики справа от центра, входящие в состав астигматической модели; $\gamma = \text{rem}(y/x)$ – это результат операции деления в языках программирования [9, 10],

который возвращает функция нахождения остатка от деления целочисленных переменных, например, $\text{rem}((m+1)/2) = 1$ при $m = 2$. В данном случае один объект для стороннего наблюдателя как бы разделяется на три.

Электродвижущая сила на выходе обмотки m -го дискретного виртуального датчика определяется согласно закону электромагнитной индукции:

$$e_{(m)s}(t) = -N_w \frac{d\phi_{(m)s}(t)}{dt}, \quad (24)$$

где N_w – число витков обмотки магнитоиндукционного датчика; $\phi_{(m)s}(t)$ – магнитный поток m -го дискретного виртуального датчика, величина которого зависит от времени при перемещении гребня колеса относительно каждого стигматического датчика.

Используя выражения (1) – (20) и подставляя результаты вычислений в уравнение (24), можно найти значения ЭДС на выходах виртуальных магнитоиндукционных датчиков предлагаемой астигматической модели системы, состоящей из m точечных датчиков:

$$e_{0s}(t) = -N_w \frac{d\phi_{0s}(t)}{dt}; \quad e_{1s}(t) = -N_w \frac{d\phi_{1s}(t)}{dt}; \quad e_{2s}(t) = -N_w \frac{d\phi_{2s}(t)}{dt}, \quad (25)$$

кроме того, можно найти выражения для ЭДС на выходах стигматической модели (21) и двух вариантов астигматических моделей (22) и (23):

$$e_{a0}(t) = -N_w \frac{d\phi_{cp0}(t)}{dt}; \quad e_{a1}(t) = -N_w \frac{d\phi_{cp1}(t)}{dt}; \quad e_{a2}(t) = -N_w \frac{d\phi_{cp2}(t)}{dt}. \quad (26)$$

Для примера применения разработанной астигматической модели в среде MatLab используем следующие основные параметры системы «колесо – датчик – рельс»:

- $V_k = 10$ м/с – скорость движения колеса по прямолинейному рельсовому пути;
- $R_k = 0,5$ м – радиус колеса подвижной единицы;
- $L_z = 0,01$ м – минимальный воздушный зазор между датчиком и гребнем колеса;
- $L_{vr} = 0,03$ м – постоянный воздушный зазор между сердечником датчика и боковой поверхностью головки рельса;

– $\beta = \pi/4$ – угол между нормалью к плоскости магнитного сердечника датчика и линией между серединами поперечного сечения магнита и боковой поверхности головки рельса;

- $B_s = 0,7$ Тл – индукция магнитотвердого сердечника датчика;
- $N_w = 5000$ витков – катушка датчика.

Габаритные размеры магнитного сердечника датчика:

- $h_s = 0,06$ м – длина сердечника (в горизонтальном направлении вдоль рельсового пути);
- $D_s = 0,06$ м – ширина сердечника (в поперечном направлении к рельсовому пути);
- $L_s = 0,07$ м – высота сердечника датчика (в вертикальном направлении).

Графики средних значений магнитных потоков $\phi_{cp0}(t)$, $\phi_{cp1}(t)$, $\phi_{cp2}(t)$ при различном порядке астигматизма ($m = 0, 1, 2$) и различных значениях h_s магнитного сердечника показаны на рисунке 3.

На рисунке 4 изображены графики средних значений ЭДС $e_{a0}(t)$, $e_{a1}(t)$, $e_{a2}(t)$, полученные на основе представленных вариантов моделей (21) – (23) и (26) магнитоиндукционного датчика.

Предложенные астигматические модели позволяют описать процесс формирования выходного сигнала магнитоиндукционного датчика при прохождении над ним железнодорожного колеса на основе применения наборов дискретных виртуальных стигматических датчиков для исследования влияния конструктивных параметров системы «колесо – датчик – рельс» на форму выходного сигнала и, следовательно, на процедуру фиксации момента прохождения оси колесной пары над датчиком.

Графики на рисунках 3 и 4 иллюстрируют только качественную картину применения астигматической модели, для количественных оценок влияния ширины магнитного сердечника на форму выходного сигнала при заданных параметрах магнитной системы использованы выражения (21) – (26).

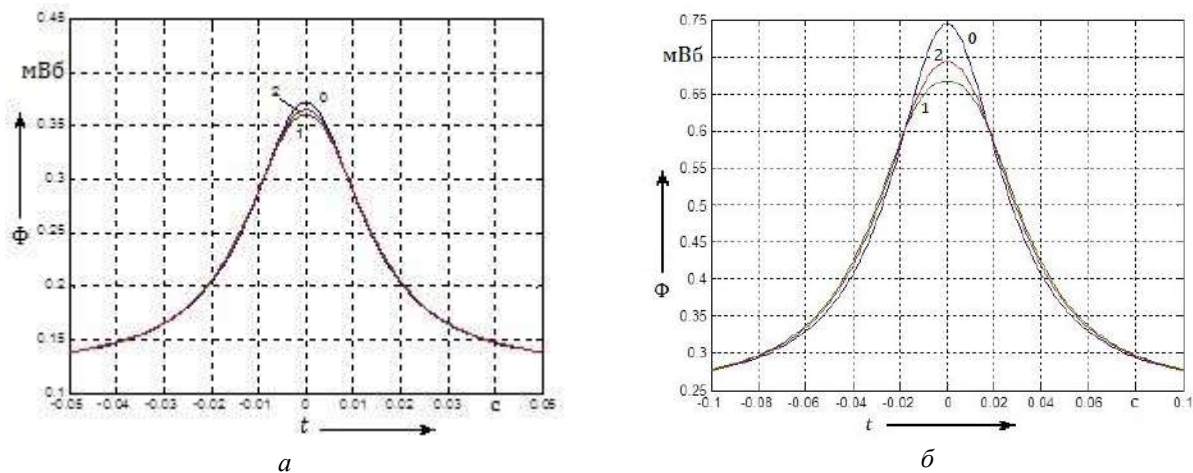


Рисунок 3 – Графики средних значений магнитных потоков $\Phi_{cp(m)}(t)$ при различном порядке астигматизма модели (т. е. $m = 0, 1, 2$): а – средние значения магнитных потоков виртуальных датчиков при $h_s = 0,06$ м; б – средние значения магнитных потоков виртуальных датчиков при $h_s = 0,12$ м

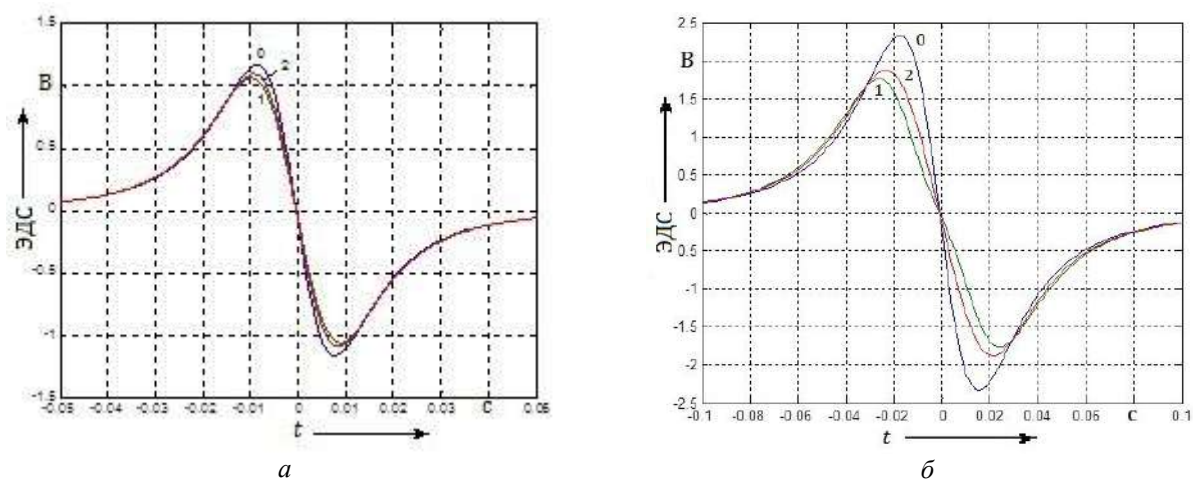


Рисунок 4 – Графики $e_{a(m)}(t)$, вычисленные на основе астигматической модели (для $m = 0, 1, 2$): а – значения ЭДС на выходе датчика при $h_s = 0,06$ м; б – ЭДС на выходе датчика при $h_s = 0,12$ м

Для исследования влияния формы сигнала на точность фиксации момента прохождения колеса над датчиком можно использовать значение коэффициента чувствительности магнитоиндукционного датчика в зависимости от различных параметров, которое вычисляется на основе линейной аппроксимации процесса изменения амплитуды выходного сигнала датчика при постоянной скорости движения состава. Так как форма сигнала носит центрально-симметричный характер, то приближенно этот коэффициент можно определить как отношение амплитуды импульса (Δ_A) на выходе датчика к интервалу времени между его максимальным и нулевым значениями (Δ_T):

$$K_{\Delta e} = \frac{\Delta_A}{\Delta_T}. \quad (27)$$

Результаты расчетов на основе разработанных моделей для оценки и анализа влияния параметров элементов системы на форму выходного сигнала представлены в таблице.

Влияние порядка астигматизма модели (m) на скорость изменения сигнала в момент прохождения гребня колеса над датчиком с постоянной скоростью 10 м/с

Параметр датчика	Порядок астигматизма модели					
	$n = 0$		$n = 1$		$n = 2$	
Длина сердечника h_s , м	0,060	0,120	0,060	0,120	0,060	0,120
Амплитуда сигнала Δ_A , В	1,165	2,331	1,063	1,764	1,093	1,871
Длительность сигнала Δ_T , с	0,008	0,008	0,009	0,012	0,008	0,011
Скорость изменения $K_{\Delta e}$, В/с	145,7	291,4	118,1	147,0	136,6	170,1

Полученные результаты вычислений параметров сигналов магнитоиндукционных датчиков с различной длиной магнитного сердечника на основе разработанной астигматической математической модели позволяют сделать следующие выводы.

1. Предложенная модель позволяет использовать порядок астигматизма в системе «колесо – датчик – рельс» для исследования влияния отдельных ее параметров на амплитуду и форму выходного сигнала датчика.

2. Увеличение длины сердечника постоянного магнита в конструкции магнитоиндукционного датчика повышает амплитуду выходных импульсов и среднюю скорость изменения сигнала, но возникает эффект низкочастотной фильтрации, что снижает чувствительность датчика в момент прохождения колеса над ним по сравнению с точечным датчиком.

3. Уменьшение длины сердечника датчика при сохранении МДС на основе применения редкоземельных материалов увеличивает скорость изменения выходного сигнала датчика и повышает его чувствительность для фиксации момента прохождения над ним гребня колеса.

4. Увеличение числа дискретных виртуальных точечных датчиков в составе модели (т. е. увеличение порядка ее астигматизма) улучшает адекватность астигматической модели с точки зрения влияния параметров магнитного сердечника на амплитуду и форму выходного сигнала магнитоиндукционного датчика.

5. Применение предложенной астигматической модели позволяет осуществлять обоснованный выбор параметров магнитоиндукционных датчиков для повышения надежности систем диагностирования технического состояния тележек подвижного состава на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1. Панов, Ю. Л. Кинематика колесных пар вагонной тележки / Ю. Л. Панов, А. Ю. Панов. – Текст : непосредственный // Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского. – 2013. – № 4 (1). – С. 180–185.
2. Капустина, Е. П. Влияние технических характеристик и их отклонений на устойчивость движения порожнего подвижного состава / Е. П. Капустина, Е. Г. Леоненко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 2 (38). – С. 16–23.
3. Петров, В. В. Интегральная оценка для диагностирования отклонений кинематических параметров вагонной тележки и колесных пар движущегося состава / В. В. Петров, К. С. Петров, С. А. Ступаков. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 113–123.
4. Петров, В. В. Математическая модель выходного сигнала магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе стигматического подхода / К. С. Петров, А. С. Окишев, В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 131–140.
5. Петров, В. В. Энергетические аспекты магнитоиндукционных датчиков осей подвижного состава железнодорожного транспорта / В. В. Петров, А. С. Окишев, К. С. Петров. –

Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 32–39.

6. Петров, В. В. Математическая модель для оценки влияния отклонений конструктивных параметров вагонной тележки от номинальных значений на ее кинематические свойства / В. В. Петров, К. С. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 2 (38). – С. 55–65.

7. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – Москва : Техносфера, 2009. – 856 с. – Текст : непосредственный.

8. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – Москва : Наука, 1979. – 944 с. – Текст : непосредственный.

9. Керниган, Б. Язык программирования Си / Б. Керниган, Д. Ритчи. – Санкт-Петербург : Невский диалект, 2001. – 352 с. – Текст : непосредственный.

10. Дьяконов, В. П. MatLab / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2012. – 768 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Panov Yu. L., Panov A. Yu. Kinematics of vagon bogie wheel sets [Kinematika kolesnykh par vagonnoy telezhki]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo – Vestnik of Lobachevsky university of Nizhni Novgorod*, 2013, no. 4 (1), pp. 180–185.

2. Kapustina E. P., Leonenko E. G. Influence of technical characteristics and their definitions on the stability of the movement of empty rolling stock [Vliianie tekhnicheskikh kharakteristik i ikh otklonenii na ustoichivost' dvizheniia porozhnogo podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 2 (38), pp. 16–23.

3. Petrov V. V., Petrov K. S., Stupakov S. A. Integral estimation for diagnosing deviations of kinematic parameters of bogie and wheel pairs of a moving train [Integral'naya otsenka dlya diagnostirovaniya otkloneniy kinematicheskikh parametrov vagonnoy telezhki i kolesnykh par dvizhushchegosya sostava]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Technological support of repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock materials of the All-Russian scientific and technical conference with international participation). – Omsk, 2017, pp. 113–123.

4. Petrov K. S., Okishev A. S., Petrov V. V. Mathematical model of the output signal of the magnetic induction sensor for rolling stock axes of railway transport based on the stigmatic approach [Matematicheskaya model' vykhodnogo signala magnitoinduksionnogo datchika osey podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta na osnove stigmaticheskogo podkhoda]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 131–140.

5. Petrov V. V., Okishev A. S., Petrov K. S. Energy aspects of the magnetic induction sensors of the axles of rolling stock railway transport [Energeticheskiye aspekty magnitoinduksionnykh datchikov osey podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta]. *Innovatsionnye projekty i tekhnologii mashinostroitel'nykh proizvodstv: materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Innovative projects and technologies of machine-building industries: materials of the All-Russian scientific and technical conference with international participation). – Omsk, 2019, pp. 32–39.

6. Petrov V. V., Petrov K. S. Mathematical model for assessing the impact deviations of design parameters of bogie from the nominal values at its kinematical properties [Matematicheskaya model' dlia otsenki vliianiia otklonenii konstruktivnykh parametrov vagonnoi telezhki ot nominal'nykh znachenii na ee kinematicheskie svoystva]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 2 (38), pp. 55–65.

7. Oppengeym A., Shafer R. *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Discrete-Time signal processing). Moscow: Tekhnosfera Publ., 2009, 856 p.

8. Yavorskiy B. M., Detlaf A. A. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov* (Physics Handbook for Engineers and Students). Moscow: Nauka Publ., 1979, 944 p.
9. Kernigan B., Ritchi D. *Yazyk programmirovaniia Si* (The C Programming Language). Saint-Petersburg: Nevskii dialekt Publ., 2001, 352 p.
10. Dyakonov V. P. *MatLab* (MatLab). Moscow: DMK Press Publ., 2012, 768 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Константин Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студент ОмГУПСа.

Тел.: +7 (3812) 31-04-09.

E-mail: iatit@omgups.ru

Петров Владимир Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Петров, К. С. Астигматическая модель сигнала магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе дискретного подхода / К. С. Петров, В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 125 – 135.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Konstantin Sergeevich

Omsk State Transport Univirsity (OSTU).

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

The student of OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-04-09.

E-mail: iatit@omgups.ru

Petrov Vladimir Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, chief scientific worker, associate professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petrov K. S., Petrov V. V. Astigmatic model of magnetoinduction signal of rolling stock axis of railway transport based on discrete approach. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 2 (46), pp. 125 – 135 (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.

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, подрисуночные подписи 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 Р 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»

№ 2 (46) 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 общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

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, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 15.10.2021.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 22.10.2021.

