

научно-технический

журнал

ISSN 2220-4245

ИЗВЕСТИЯ

№ 4(48)

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 ТADEUSZ – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
8. Гуд 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» ПТГрУ, 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. Shantaranko Sergey Georgievich – deputy chief editor, vice-rector for scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Bessonenko Sergey Anatolievich – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
5. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
6. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
7. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
8. Huda Alexander Nikolaevich – Vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
9. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer sciences» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
10. Isakov 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. Fayziybaev 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 electrotechnics» 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

- Давыдов Ю. А., Мухин О. О., Заболотный В. В. Исследование сил, действующих на защелку вакуумного выключателя ВБО-25-20/630 УХЛ1.....2
- Бакланов А. А., Шилияков А. П. Энергетическая эффективность рекуперативного торможения грузовых электровозов.....11
- Ахатов С. Т., Солоненко В. Г., Махметова Н. М. Система управления электромагнитным подвесом с обратной связью скоростного наземного транспорта.....22
- Лексутов И. С., Клюка В. П. Исследование процесса бесконтактного измерения геометрических параметров поверхностей катания колесной пары вагона при плановых видах ремонта.....29
- Соколов Д. А. Методика выбора компенсирующих устройств в системе тягового электроснабжения переменного тока.....39
- Преображенский Е. Б., Удовиченко А. В., Никифоров М. М. Мобильная система накопления электроэнергии для временного усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока.....47
- Мухамеджанов М. Ф. Моделирование процессов в скользящем контакте токоприемника и контактной подвески в условиях высокоскоростного движения.....57
- Шилин А. О., Хохрин А. С., Юсупов Р. Р. Исследование влияния гармонических помех от высоковольтной линии электропередачи на функционирование нелинейного приемного устройства автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа с корреляционным дешифратором.....66
- Михайлов М. С., Сидоров О. А., Смердин А. Н. Применение алюмоматричных композиционных материалов в конструкции токоприемников электроподвижного состава ...76
- Вильгельм А. С., Иванченко В. И., Комяков А. А., Штраухман А. А. Определение оптимальных значений эксплуатационных показателей электроподвижного состава по критерию энергоэффективности.....85
- Галиев И. И., Минжасаров М. Х., Липунов Д. В. Формирование математической модели вертикальных колебаний электровозов 2ЭС6 с учетом динамики колесно-моторных блоков.....96

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

- Ларин А. Н., Ларина И. В. Цифровизация автотранспортной и железнодорожной отраслей как ключевой элемент цифровой экономики.....109
- Кобулов Ж. Р., Баротов Ж. С. Совершенствование математической модели срока доставки груза повагонной отправки на железнодорожном транспорте.....129

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

- Краснов А. С., Ким К. К. Оценка эффекта от реализации энергосберегающих мероприятий в системах теплоснабжения.....139

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

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

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
г. Хабаровск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЗАЩЕЛКУ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ВБО-25-20/630 УХЛ1

Аннотация. Полученный опыт эксплуатации высоковольтных вакуумных выключателей ВБО-25-20/630УХЛ1 указывает на неверную оценку механического ресурса его отдельных узлов и элементов. Несмотря на неоднократное усовершенствование конструкции привода главного выключателя, применимого как в составе новых локомотивов серии «Ермак» начиная с 1000-го номера, так и в более ранних номерах серии, динамика неисправностей сохранилась до настоящего времени. Одним из наиболее важных элементов главного выключателя является защелка, предназначенная для удержания элементов механизма привода во включенном положении, выход из строя защелки влечет за собой к выходу из строя всей секции локомотива.

В статье рассмотрены три ранее предложенные заводом-изготовителем модернизации защелки, разработана кинематическая схема привода с вакуумной дугогасительной камерой выключателя, произведен расчет параметров пружин поджатия и отключения в составе привода, определены действующие в ходе эксплуатации силы. На примере последней модернизации защелки с применением метода конечных элементов в программном комплексе SolidWorks Simulation проведен прочностной расчет, по итогам которого определены возникающие в ее конструкции напряжения. В результате анализа конечно-элементной модели определены критические для конструкции силы, разработан график зависимости запаса прочности конструкции и максимального напряжения в конструкции от действующих сил. По итогам исследования определена сила, при которой обеспечивается наиболее благоприятное значение коэффициента запаса прочности, для чего предложено уменьшить критическую силу путем изменения параметров пружин поджатия и отключения привода дугогасительной камеры. Разработана диаграмма нагружения с чертежными размерами двух измененных пружин.

Ключевые слова: электропоезд, главный выключатель, высоковольтный выключатель, защелка выключателя, повышение надежности, прочностной расчет, конечно-элементная модель.

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

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

RESEARCH OF THE FORCES ACTING ON THE LATCH OF THE VACUUM SWITCH VBO-25-20/630 UHL1

Abstract. The experience gained in the operation of high-voltage vacuum circuit breakers VBO-25-20/ 630UHL1 indicates an incorrect assessment of the mechanical resource of its individual components and elements. Despite the repeated improvement of the design of the main switch drive, applicable both as part of the new «Ermak» series locomotives starting from number 1000 series, and in earlier numbers, the dynamics of malfunctions continues to persist to the present time. One of the most important elements of the main switch is a latch designed to hold the elements of the drive mechanism in the on position, the failure of the latch entails the failure of the entire section of the locomotive.

The article considers three latch upgrades previously proposed by the manufacturer, a kinematic scheme of the drive with a vacuum arc-extinguishing chamber of the switch is developed, the parameters of the preload and trip springs in the drive are calculated, the forces operating during operation are determined. On the example of the latest modernization of the latch using the finite element method in the SolidWorks Simulation software package, a strength calculation was carried out, according to the results of which the stresses arising in its design were determined. As a result of the analysis of the finite element model, the forces critical for the structure are determined, a graph of the dependence of the structural strength margin and the maximum stress in the structure on the acting forces is developed. According to the results of the study, the force at which the most favorable value of the safety factor is provided is determined, for which it is proposed to reduce the critical force by changing the parameters of the compression springs and disconnecting the drive of the arc extinguishing chamber. A loading diagram with the drawing dimensions of two modified springs has been developed.

Keywords: electric locomotive, main switch, high-voltage switch, switch latch, reliability enhancement, strength calculation, finite element model.

С момента начала эксплуатации до настоящего времени сохранилась динамика неисправностей высоковольтных вакуумных выключателей серии ВБО-25-20/630 УХЛ1 (далее – ВБО)

как у новых локомотивов 2(3, 4)ЭС5К, поставляемых в 2021 г. в рамках контракта жизненного цикла [1], так и у предшествующих серий электровозного парка, кроме того, по итогам эксплуатации новых локомотивов заводом-изготовителем ВБО внесен в реестр системных несоответствий. Одной из системных неисправностей является выход из строя (излом) защелок ВБО вследствие неверной оценки механического ресурса изделия [2, 3].

Защелка ВБО (рисунок 1, а) предназначена для удержания механизмов привода во включенном положении и участвует в процессе включения и отключения ВБО. Защелка состоит из крючка 1 для зацепления за элементы привода, рычага 2 для взаимодействия с электромагнитом при отключении выключателя, имеется также отверстие под латунное кольцо для установки в привод. Выход из строя защелки повлечет за собой выход из строя всей секции локомотива по причине невозможности подачи напряжения на силовое оборудование [2, 3].

Ранее заводом АО «Нальчикский завод высоковольтной аппаратуры» с целью повышения надежности привода выключателя были предложены две модернизации защелки (см. рисунок 1, б, в), однако данные корректирующие мероприятия не позволили полностью исключить случаи возникновения неисправностей. Таким образом, появляется необходимость в разработке действенных мер, направленных на повышение надежности привода ВБО [2, 3].

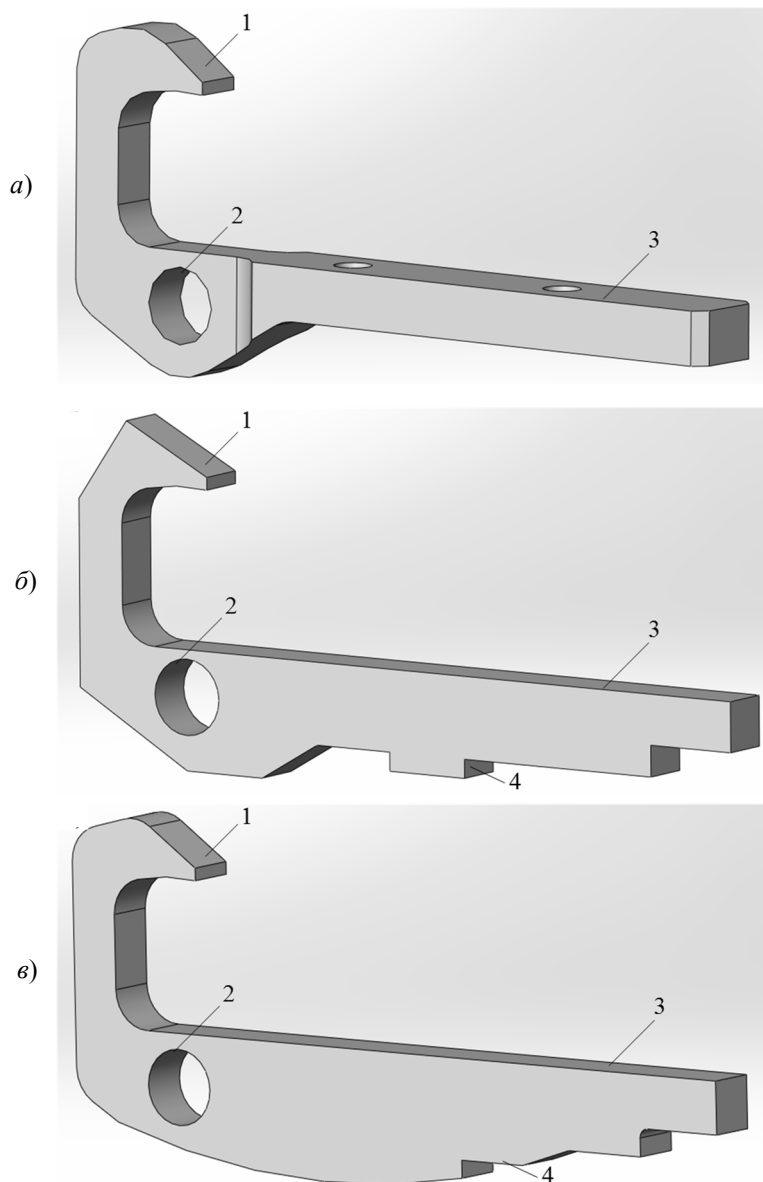


Рисунок 1 – Защелки ВБО: а – штатная защелка; б и в – первая и вторая модернизации защелки

Для исследования действующих на защелку ВБО сил авторами разработана кинематическая схема привода и вакуумной дугогасительной камеры (рисунок 2). Электрическая цепь отключается, когда якорь 8 электромагнита 9 при помощи взведенной после включения пружины 11 выбивает защелку 7 из первоначального положения, шток 12 вместе с изоляционной тягой 5 под действием пружины отключения 4 и пружины поджатия 3 перемещаются вдоль своей оси, при этом поднимают рычаг 6 из-под защелки и вращают рычаг камеры 2, заставляя контакты 1 разомкнуться (см. рисунок 2, а) [2 – 6]. Включение выключателя (рисунок 2, б) производится за счет подачи сжатого воздуха в пневмоцилиндр, после чего поршень 10 в цилиндре перемещается и при помощи рычага камеры 2, изоляционной тяги 5 и штока 12 замыкает контакты. При этом рычаг 6 опускается под защелку 7, шток 12 при помощи рычага 13 взводит пружину якоря 11 и электромагнит 9 удерживает якорь 8 в неподвижном состоянии, одновременно происходит сжатие пружины отключения 4 и пружины поджатия 3 [2 – 6].

Внешними силами являются силы пружин при их деформации, а также давление в пневмоцилиндре: F_6 – сила упругости пружины отключения, F_M – сила упругости пружины поджатия, $F_я$ – сила упругости пружины якоря, $F_п$ – сила упругости возвратной пружины поршня, $P_ц$ – сила давления в пневмоцилиндре.

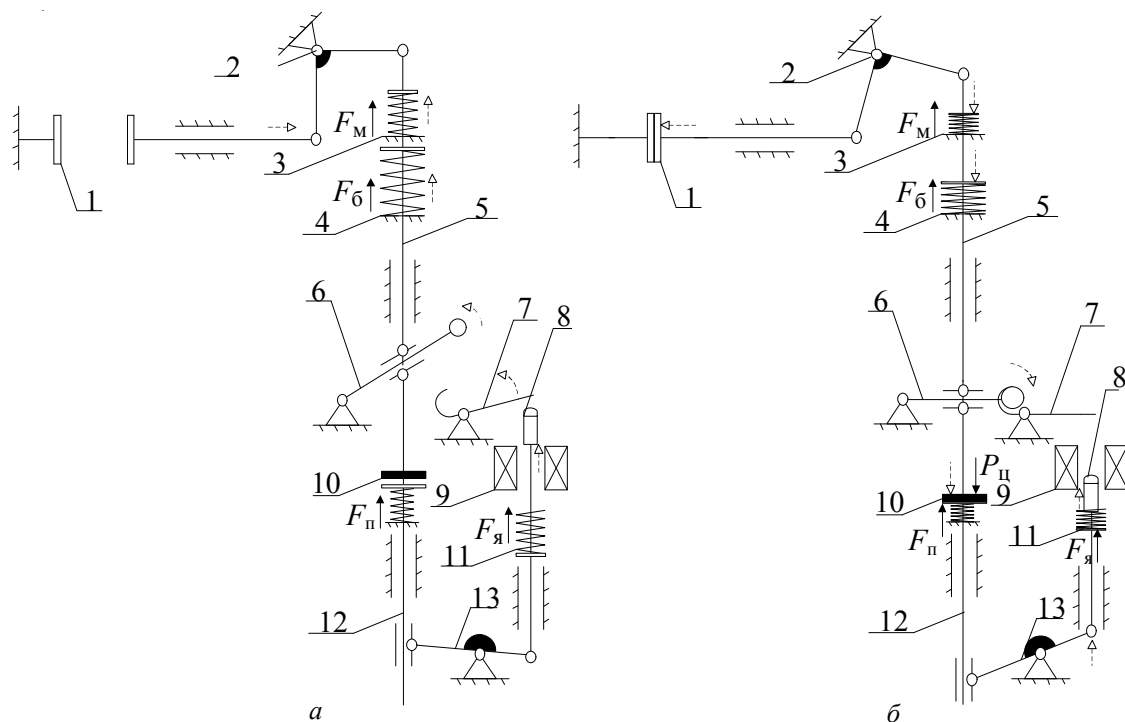


Рисунок 2 – Кинематическая схема дугогасительной камеры с приводом:

а – ВБО отключен; б – ВБО включен; 1 – контакты камеры; 2 – рычаг камеры; 3 – пружина поджатия; 4 – пружина отключения; 5 – изолирующая тяга; 6 – рычаг защелки; 7 – защелка; 8 – якорь; 9 – электромагниты; 10 – поршень; 11 – пружина якоря; 12 – шток; 13 – рычаг

Для того чтобы определить суммарную силу двух пружин дугогасительной камеры, необходимо изобразить диаграммы нагружения в одной системе координат (рисунок 3) [7, 8].

Диаграмма на рисунке 3 характеризует зависимость силы упругости F_y пружин от деформации Δx . Пружины после сборки дугогасительной камеры предварительно поджаты в свободном состоянии: большая пружина на 38 мм, малая пружина на 18 мм – незаштрихованная область на графике. Расстояние 5 мм указывает на величину провала контактов дугогасительной камеры, а расстояние 20 мм указывает на полный ход изоляционной тяги. При деформации 33 мм малой пружины происходит заклинивание ее витков и дальнейший ход штока невозможен. Рычаг посредством пружин при помощи ролика давит на крючок защелки при рабочей деформации на интервале от 0 – б [5, 9].

Коэффициент жесткости пружин определяется по формуле [8, 10]

$$C = \frac{dF_y}{d\Delta x} = \frac{Gd^4}{8D^3n}, \quad (1)$$

где Δx – значение деформация пружины, мм; F_y – сила упругости пружины, Н; G – модуль упругости, принимается 82000 МПа; n – число витков; d – диаметр витка, мм; D – диаметр пружины, мм. Тогда F_y для каждой пружины определяется так:

$$F_y = \frac{Gd^4\Delta x}{8D^3n}. \quad (2)$$

Коэффициент жесткости для большой C_6 и для малой C_m пружин определяется по формулам:

$$C_6 = \frac{dF_y}{d\Delta x} = \frac{82000 \cdot 8^4}{8 \cdot 65^3 \cdot 6} = 25,48 \text{ Н/мм};$$

$$C_m = \frac{dF_y}{d\Delta x} = \frac{82000 \cdot 6^4}{8 \cdot 48^3 \cdot 5,5} = 21,84 \text{ Н/мм}.$$

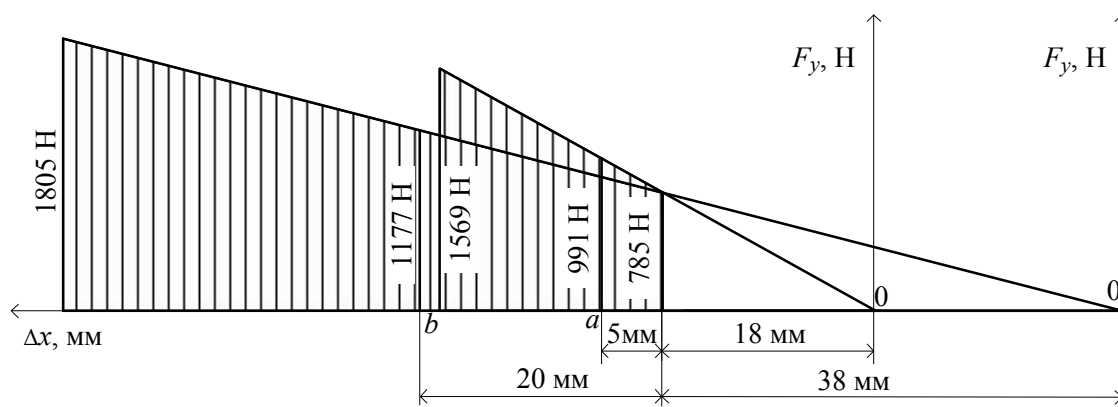


Рисунок 3 – Диаграмма нагружения двух пружин дугогасительной камеры

Распределение действующих сил на защелку при включенном ВБО представлено на рисунке 4. L является длиной рычага, равной 98 мм; F_c – суммарная действующая сила под сжатием пружин дугогасительной камеры; F_1 – проекция силы F_c , действующей на защелку; R_1, R_2 – реакции опоры в точках a и b . При расчете не учитываются силы трения в элементах ВБО, так как трение незначительно влияет на результирующую силу.

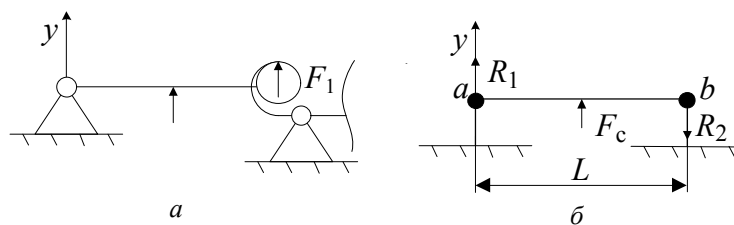


Рисунок 4 – Схема распределения действующих сил при включенном ВБО:

a – кинематическая схема зацепления защелки за рычаг; b – расчетная схема зацепления защелки за рычаг

Авторами разработана формула определения силы F_1 :

$$F_1 = R_2 = \frac{(F_6 + F_m) \cdot L}{L \cdot 2}. \quad (3)$$

При расчете действующей силы не учитывается масса элементов привода, так как сила тяжести мала и несущественно влияет на защелку [2, 3].

На рисунке 5 представлена схема распределения действующих сил при включении ВБО: F_2 – проекция силы на защелку; $F_{ц}$ – сила, вызванная давлением в пневмоцилиндре, которая определяется по формуле, разработанной авторами:

$$F_{ц} = \frac{P_{ц} \pi D^2}{4} - F_{м} - F_{б} - F_{п}, \quad (4)$$

где $P_{ц}$ – давление в цилиндре, МПа, в интервале от 0,4 до 0,6 МПа; D – диаметр поршня, равный 100 мм; $F_{п}$ – сила упругости возвратной пружины поршня, Н, в соответствии с руководством по эксплуатации эта сила при рабочем ходе равняется 88,29 Н [5].

Тогда F_2 определяется как

$$F_2 = \left(\frac{P_{ц} \pi D^2}{4} - F_{м} - F_{б} - F_{п} \right) \cdot \left(\frac{L/2}{L} \right). \quad (5)$$

Далее произведен расчет значений сил F_1 и F_2 при максимальном ходе пружин дугогасительной камеры по формулам (3) и (5):

$$F_1 = - \frac{(50 \cdot 25,48 + 30 \cdot 21,84) \cdot 98}{98 \cdot 2} = 964,58 \text{ Н};$$

$$F_2 = \left(\frac{0,6 \cdot 3,14 \cdot 100^2}{4} - 50 \cdot 25,48 - 30 \cdot 21,84 - 88,29 \right) \cdot \left(\frac{98/2}{98} \right) = 1346,27 \text{ Н}.$$

На рисунке 6 представлена схема воздействия якоря на защелку. F_3 согласно руководству по эксплуатации при полном взводе пружины якоря составляет 147,84 Н [5].

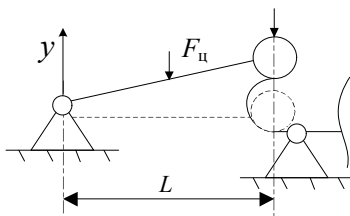


Рисунок 5 – Схема распределения действующих сил при включении ВБО-25

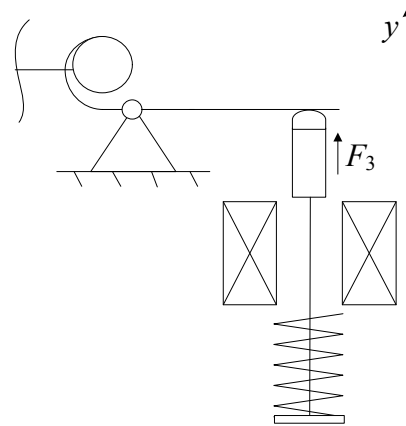


Рисунок 6 – Схема воздействия якоря на защелку

Получены значения трех сил, действующих на защелку: F_1 – 964,58 Н; F_2 – 1346,27 Н; F_3 – 147,84 Н.

На примере третьей модернизации защелки ВБО выполнен прочностной расчет по методу конечных элементов с применением программного комплекса *SolidWorks Simulation* (рисунок 7) [11, 12]. Материал, используемый при расчетах, – сталь 40Х.

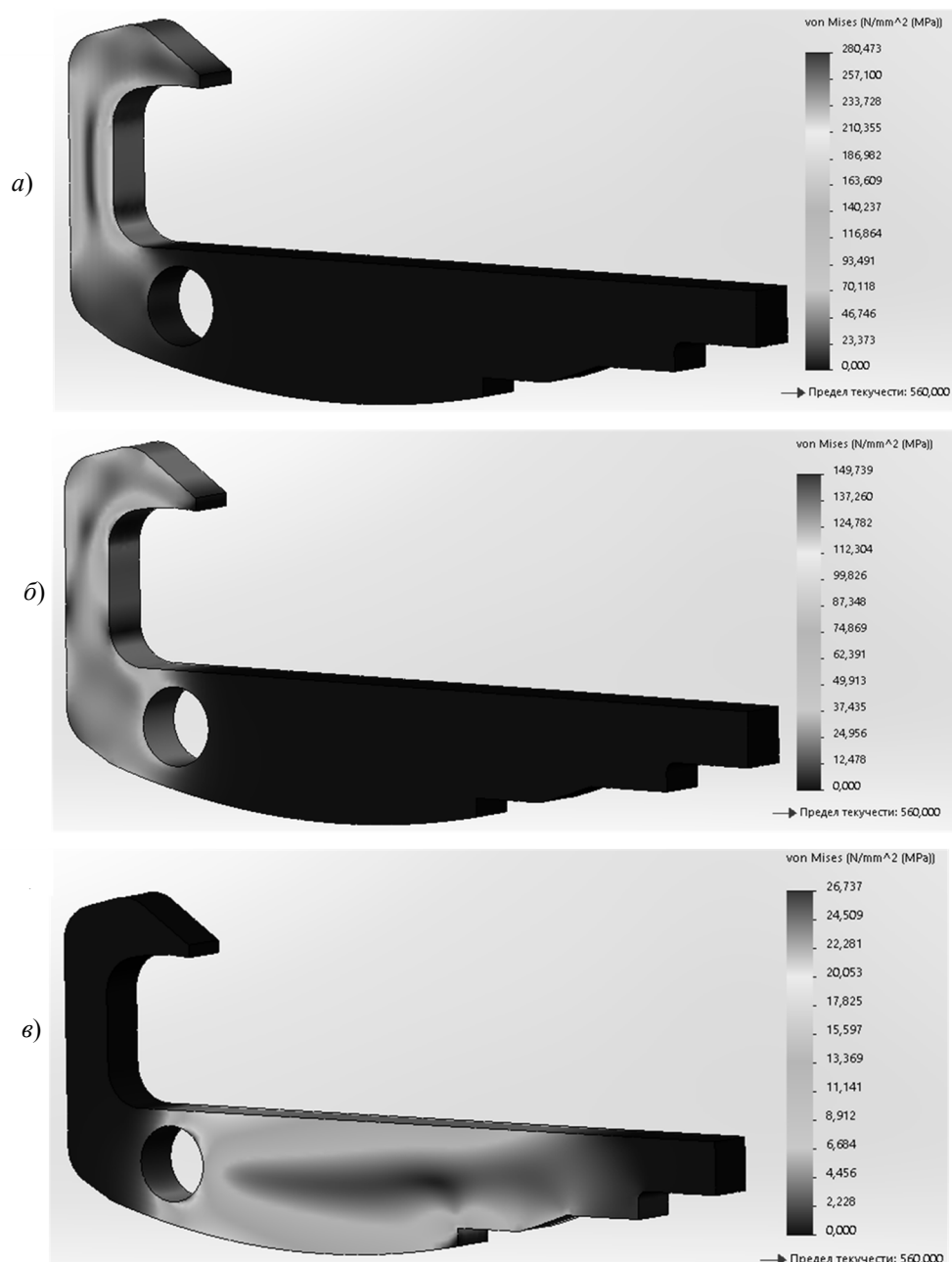


Рисунок 7 – Графики концентрации напряжения в конструкции третьей модернизации защелки:
а – при силе F_1 ; б – при силе F_2 ; в – при силе F_3

Получены следующие результаты:

- при силе F_1 максимальное напряжение 280,473 МПа, запас прочности 1,99;
- при силе F_2 – 149,739 МПа, 3,74;
- при силе F_3 – 26,737 МПа, 20,95.

Наименьший запас прочности защелки обеспечен при действии силы F_1 , когда ВБО включен. Под действием F_1 существует риск возникновения неисправности привода ВБО.

Проведен ряд прочностных расчетов при различных значениях F_1 , результаты представлены на рисунке 8, кривая $f(\sigma) = n$ характеризует зависимость запаса прочности от приложенной силы, кривая $f(F_1) = \sigma$ характеризует зависимость приложенной силы от напряжения в конструкции. Форма кривой $f(\sigma) = n$ указывает на гиперболический рост запаса прочности при уменьшении значения F_1 . При выборе наиболее оптимального значения действующей силы упругости необходимо учитывать, что при снижении силы уменьшается скорость отключения ВБО и, как следствие, снижаются его коммутационные свойства. Предлагается использовать

пружины поджатия и отключения с результирующей силой F_1 , равной 600 Н, коэффициент запаса прочности при этом составляет 5, что в 2,5 раза выше, чем при использовании штатных пружин.

С целью повышения надежности защелки ВБО, исключения ее излома необходимо уменьшить результирующую силу упругости пружин поджатия и отключения путем изменения диаметра витков. Проведен расчет параметров двух пружин в соответствии с ГОСТ 13765–86 [10], диаграммы нагружения представлены на рисунке 9.

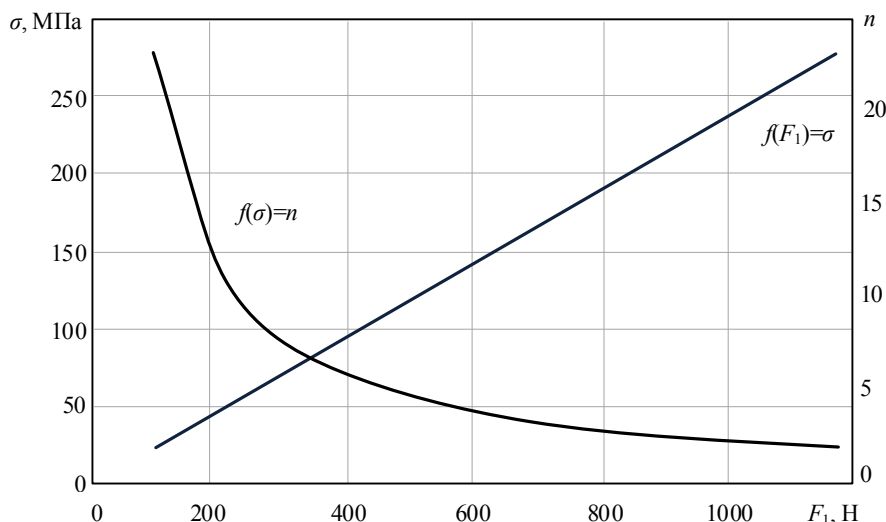


Рисунок 8 – Графики $f(\sigma) = n$ и $f(F_1) = \sigma$

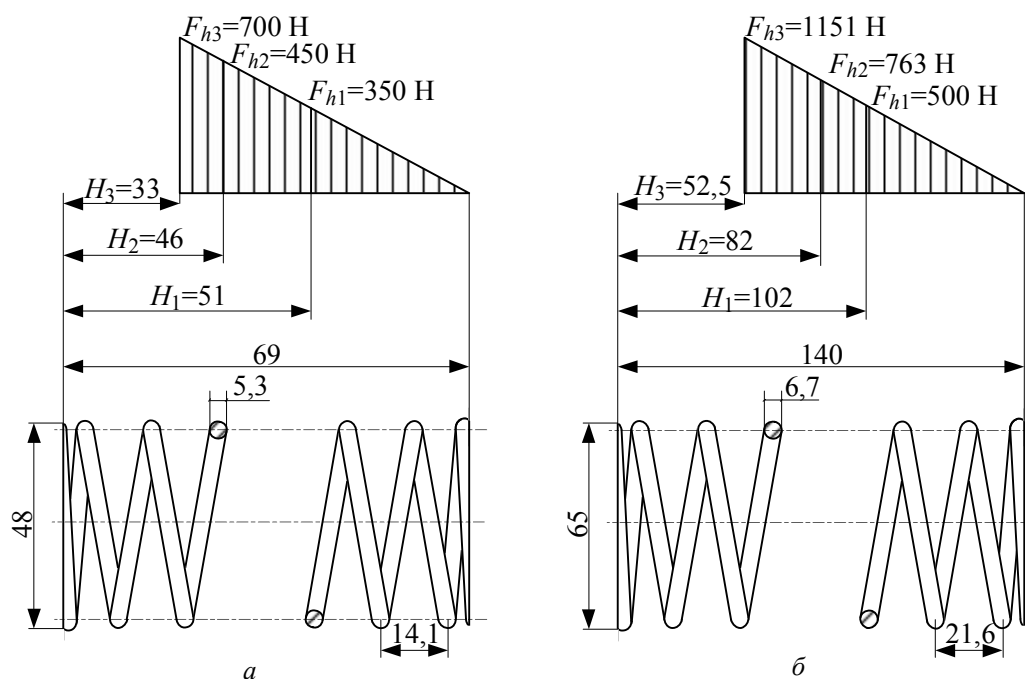


Рисунок 9 – Диаграммы нагружения модернизированных пружин:
а – малая пружина поджатия; б – большая пружина отключения

Таким образом, для обеспечения силы F_1 , равной 600 Н, требующийся диаметр витка для пружины поджатия должен соответствовать 5,3 мм, а отключения – 6,7 мм, что позволит снизить вероятность возникновения отказов главного выключателя электровозов серии 2(3, 4) ЭС5К.

1. Всерьез и надолго – Train and Brain // trainandbrain.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: [https:// trainandbrain.ru/maintheme/vseriezinadolgo](https://trainandbrain.ru/maintheme/vseriezinadolgo) (дата обращения: 10.08.2021).
2. Мухин, О. О. Модернизация защелки вакуумного выключателя ВБО-25 / О. О. Мухин, Э. Г. Бородавицин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2020. – № 3 (759). – С. 30–31.
3. Давыдов, Ю. А. Модернизация защелки вакуумного выключателя ВБО-25 электровоза серии 2,3,4ЭС5К / Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин, О. О. Мухин. – Текст : непосредственный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 3 (20). – С. 6–9.
4. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К, 4ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы. – Новочеркасск : ВЭЛНИИ, 2006. – 251 с. – Текст : непосредственный.
5. Выключатель вакуумный однополюсной ВБО-25-20/630 УХЛ1. Руководство по эксплуатации. – Нальчик : ОАО «НЗВА», 2009 – 56 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ Р 52565–2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2007. – 104 с. – www.docs.cntd.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200046288> (дата обращения: 10.08.2021).
7. ГОСТ 2.721–74. Обозначения условные графические в схемах элементов кинематики. – Москва : Стандартинформ, 2007. – 15 с. – www.docs.cntd.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007023> (дата обращения: 10.08.2021).
8. Петров, М. С. Пружины в узлах привода: учебное пособие / М. С. Петров, В. А. Рябов, О. А. Чихачева. – Москва : МАМИ, 2001. – 28 с. – Текст : непосредственный.
9. ГОСТ 30631–99. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации. – Москва : Стандартинформ, 1999. – 36 с. – Текст : непосредственный.
10. ГОСТ 13765–86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. – Москва : Стандартинформ, 1999. – 26 с. – www.docs.cntd.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200011952> (дата обращения: 10.08.2021).
11. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – Москва : Мир, 1979. – 392 с. – Текст : непосредственный.
12. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – Москва : Мир, 1986. – 320 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Vser'yez i nadolgo – Train and Brain* (Seriously and for a long time – Train and Brain). Available at: <http://static.government.ru/media/files/klnxiLOfYHPRsEe6cD9NsI0KM32LMacz.pdf> 1200097621 (accessed 10 August 2021).
2. Mukhin O. O., Borodavitsin E. G. Modernization of the latch of the vacuum circuit breaker VBO-25 [Modernizatsiya zashchelki vakuumnogo vyklyuchatelya VBO-25]. *Lokomotiv – The Locomotive*, 2020, no. 3 (759), pp. 30 – 31.
3. Davydov Yu. A., Plyaskin A. K., Mukhin O. O. Modernization of the latch of the VBO-25 vacuum circuit breaker for an electric locomotive of the 2,3,4ES5K series [Modernizatsiya zashchelki vakuumnogo vyklyuchatelya VBO-25 elektrovoza serii 2,3,4ES5K]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona – Transport of the Asia-Pacific region*, 2019, no. 3 (20), pp. 6 – 9.
4. *Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 1. Opisanie i rabota. Elektricheskiye skhemy* [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). Manual. Book 1. Description and work. Electrical diagrams]. Novocherkassk: VEINII Publ., 2006, 251 p.

5. *Vyklyuchatel' vakuumnyy odnopolynusnoy VBO-25-20/630 UKHL1. Rukovodstvo po ekspluatatsii* (Vacuum switch single-pole VBO-25-20/630 UHL1. Operation manual). Nalchik, JSC «NZVA» Publ., 2009, 56 p.

6. *Vyklyuchateli peremennogo toka na napryazheniya ot 3 do 750 kV. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya, GOST R 52565-2006* (Alternating-current circuit-breakers for voltages from 3 to 750 kV. General specifications, National Standart R 52565-2006). Moscow, Standardinform, 2007, 104 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200046288> (accessed 10 August 2021).

7. *Oboznacheniya uslovnyye graficheskkiye v skhemakh elementy kinematiki GOST 2.721-74* (Unified system for design documentation. Graphical designations in schemes. Graphical symbols of general use National Standart 2.721-74). Moscow, Standardinform, 2007, 104 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200007023> (accessed 10 August 2021), 2007, 15 p.

8. Petrov M. S., Ryabov V. A., Chikhacheva O. A. *Pruzhiny v uzlakh privoda* (Springs in drive units). Moscow, MAMI Publ., 2001, 28 p.

9. *Obshchiye trebovaniya k mashinam, priboram i drugim tekhnicheskim izdeliyam v chasti stoykosti k mekhanicheskim vneshnim vozhdeystviyushchim faktoram pri ekspluatatsii, GOST 30631-99* [General requirements for machines, devices and other technical products in terms of resistance to mechanical external factors during operation, National Standart 30631-99]. Moscow, Standardinform, 1999, 36 p.

10. *Pruzhiny vintovyye tsilindricheskkiye szhatiya i rastyazheniya iz stali kruglogo secheniya, GOST 13765-86* (Springs are helical cylindrical compression and tension from steel of round section National Standart 13765-86). Moscow, Standardinform, 1999, 26 p.

11. Segerlind L. *Primeneniye metoda konechnykh elementov* (Application of the finite element method). Moscow: Mir Publ., 1979, 392 p.

12. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnyye elementy i approksimatsiya* (Finite elements and approximation). Moscow: Mir Publ., 1986, 320 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Давыдов Юрий Анатольевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

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

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

Тел.: +7 (4212) 407-356.

E-mail: puch@festu.khv.ru

Мухин Олег Олегович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

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

Аспирант кафедры «Транспорт железных дорог».

Тел.: +7 914 405-30-94.

E-mail: muhinoo@mail.ru

Заболотный Владимир Владимирович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

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

Аспирант кафедры «Транспорт железных дорог».

Тел.: +7-914-546-22-99.

E-mail: zabolotnyy_vv@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Davydov Yuri Anatolyevich

Far Eastern State Transport University(FESTU).

Serysheva st., 47, Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor of the department «Railway transport».

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

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

Mukhin Oleg Olegovich

Far Eastern State Transport University(FESTU).

Serysheva st., 47, Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Railway transport».

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

E-mail: muhinoo@mail.ru.

Zabolotny Vladimir Vladimirovich

Far Eastern State Transport University(FESTU).

Serysheva st., 47, Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Railway transport».

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

E-mail: zabolotnyy_vv@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Давыдов, Ю. А. Исследование сил, действующих на защелку вакуумного выключателя ВБО-25-20/630 УХЛ1 / Ю. А. Давыдов, О. О. Мухин, В. В. Заболотный. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 2 – 11.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Davydov Yu. A., Mukhin O. O., Zabolotny V. V. Research of the forces acting on the latch of the vacuum switch VBO-25-20/630 UHL1. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 4 (48), pp. 2 – 11 (In Russian).

УДК 629.423:621.311.004.18

А. А. Бакланов, А. П. Шиликов

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

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Аннотация. Целью работы является исследование и оценка энергетической эффективности рекуперативного торможения электровоза при движении грузового поезда с неустановившейся и установившейся скоростью, определение степени влияния на возврат электроэнергии различных факторов, прежде всего массы поезда, скорости движения, сопротивления движению, крутизны уклона профиля пути, условий движения, КПД тяговых электродвигателей и собственных нужд электровоза. Цель исследования заключается также в разработке рекомендаций по повышению энергетической эффективности рекуперативного торможения грузового электровоза.

Использованы методы математического анализа, методы тяговых расчетов и энергетического баланса.

Рассмотрены уравнения энергетического баланса движения грузового поезда и его составляющих в режиме рекуперативного торможения, позволяющие выявить основные факторы, влияющие на возврат электроэнергии при неустановившейся и установившейся скорости движения. Получены расчетные зависимости возврата электроэнергии при рекуперативном торможении электровоза с грузовыми груженым и порожним поездами, состоящими из 71 четырехосного вагона, при движении со снижением скорости и неизменной скоростью на участках пути с уклонами различной крутизны, характеризующие влияние отдельных факторов на возврат электроэнергии при рекуперативном торможении электровоза. Показано, что удельный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении электровоза с грузовым груженым поездом массой 7100 т при движении со снижением скорости на участке пути с нулевым профилем получается примерно такой же, как при установившейся скорости движения на спусках крутизной 6...7 ‰. Удельный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении электровоза с грузовым порожним поездом массой 1775 т при движении со снижением скорости на участке пути с нулевым профилем получается примерно такой же, как при установившейся скоростью движения на спусках крутизной 11 ‰ и более.

Определены условия, при которых достигается максимальный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении грузовых электровозов. Разработаны рекомендации по повышению энергетической эффективности рекуперативного торможения грузовых электровозов.

Ключевые слова: грузовой электровоз, масса поезда, скорость движения, рекуперативное торможение, возврат электроэнергии.

Alexander A. Baklanov, Andrey P. Shilyakov

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

ENERGY EFFICIENCY REGENERATIVE BRAKING FREIGHT ELECTRIC LOCOMOTIVES

Abstract. The aim of the work is to study and evaluate the energy efficiency of regenerative braking of an electric locomotive when a freight train is moving at an unsteady and steady speed, to determine the degree of influence on the return of electricity of various factors, first of all, the mass of the train, the speed of movement, resistance to movement, the steepness of the slope of the track profile, driving conditions, the efficiency of traction motors and the needs of an electric locomotive own needs. Also, the purpose of the study is to develop recommendations for improving the energy efficiency of regenerative braking of an electric freight locomotive.

Methods used: mathematical analysis, methods of traction calculations and energy balance.

The equations of the energy balance of the movement of a freight train and its components in the mode of regenerative braking are considered, which make it possible to identify the main factors affecting the return of electricity at unsteady and steady speed. The calculated dependences of the return of electricity during regenerative braking of an electric locomotive with loaded and empty freight trains consisting of 71 four-axle cars, when moving with reduced speed and constant speed on sections of track with slopes of different steepness, characterizing the influence of individual factors on the return of electricity during regenerative braking of an electric locomotive, are obtained. It is shown that the specific return of electricity during regenerative braking of an electric locomotive with a loaded freight train weighing 7100 tons when moving with a decrease in speed on a track section with a zero profile is approximately the same as with a steady speed of movement on descents with a steepness of 6...7 ‰. The specific return of electricity during regenerative braking of an electric locomotive with an empty freight train weighing 1775 tons when moving with a decrease in speed on a track section with a zero profile is approximately the same as with a steady speed on descents with a steepness of 11 ‰ or more.

The conditions under which the maximum return of electricity is achieved during regenerative braking of electric freight locomotives are determined. Recommendations have been developed to improve the energy efficiency of regenerative braking of electric freight locomotives.

Keywords: electric freight locomotive, train weight, speed of movement, regenerative braking, return of electricity.

В «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» и в «Энергетической стратегии ОАО «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года» указано, что одним из важнейших направлений снижения энергозатрат является энергосбережение. Из всей потребляемой железнодорожным транспортом электроэнергии свыше 85 % расходуют электрифицированные железные дороги, поэтому сокращение расхода электроэнергии на тягу поездов имеет первостепенное значение.

Электроподвижной состав (ЭПС), как известно, благодаря свойству обратимости электрических машин – тяговых электродвигателей (ТЭД) – обладает возможностью электрического торможения, при котором механическая энергия преобразуется в электрическую. Из двух видов электрического торможения на ЭПС – рекуперативного и реостатного – первое используется предпочтительнее при вождении грузовых поездов и чаще прежде всего в связи возможностью сокращения потребления электроэнергии в целом на тягу.

Из практики известно, что наибольшую эффективность имеет рекуперативное торможение (РТ) грузовых электровозов. Поэтому изначально практически все грузовые электровозы постоянного тока оснащаются системами рекуперативного торможения. После освоения промышленностью выпуска управляемых силовых полупроводниковых вентилей (тиристоров), позволяющих создавать управляемые силовые преобразователи, системами рекуперативного торможения стали оснащаться грузовые и пассажирские электровозы переменного тока [1 – 4]. Перспективным представляется оборудование системами рекуперативного торможения пассажирских электровозов постоянного тока, которое также позволит повысить их энергетическую эффективность [5].

Опытные поездки с грузовыми электровозами и отчетные данные локомотивных депо показывают, что рекуперативное торможение с грузовыми поездами, особенно груженными на участках с холмистым профилем пути, позволяет возвращать в тяговую сеть до половины и более потребленной электроэнергии. Так, во время испытаний нового грузового электровоза переменного тока 2ЭС5С, оснащенного бесколлекторным асинхронным тяговым электроприводом, на участке Артышта II – Алтайская с грузовым поездом повышенной массы 7100 т возврат электроэнергии в режиме рекуперативного торможения достигал 53 %. В эксплуатационных локомотивных депо, бригады которых работают на участках с благоприятным для применения рекуперативного торможения профилем пути, суммарный возврат электроэнергии в тяговую сеть достигает 20 % и более от потребленной энергии.

С целью повышения эффективности рекуперативного торможения на грузовых электровозах необходимо четко представлять факторы, влияющие на возврат электроэнергии, условия максимального возврата энергии, пути увеличения возврата электроэнергии и т. п. Эти и другие вопросы рекуперативного торможения грузовых электровозов будут рассмотрены ниже.

Энергетическую эффективность рекуперативного торможения в эксплуатации оценивают разными показателями, основными из них являются полный и удельный возврат электроэнергии, коэффициент возврата энергии [1, 6]. Для более детального рассмотрения этих показателей и оценки влияния на них различных эксплуатационных факторов запишем уравнение баланса энергии в режиме рекуперативного торможения грузового электровоза [7, 8]:

$$A_3 = A_{эд} + A_{с.н} = A_{д.д} + A_{с.н} = (A_k + A_{п} + A_{с.о} + A_{с.кр})\eta_d + A_{с.н}, \quad (1)$$

где $A_{эд}$ – электрическая энергия, выработанная ТЭД электровоза;

$A_{д.д}$ – механическая энергия, преобразуемая ТЭД в электрическую энергию;

$A_k, A_{п}$ – изменения кинетической и потенциальной энергии поезда;

$A_{с.о}, A_{с.кр}$ – затраты энергии на преодоление основного и дополнительного от кривых сопротивления движению;

η_d – КПД ТЭД электровоза в режиме рекуперативного торможения;

$A_{с.н}$ – затраты энергии на собственные нужды электровоза.

Из уравнения (1) видно, что количество механической энергии, которое может быть преобразовано в электрическую в процессе торможения, определяется изменениями кинетической и потенциальной энергии поезда и затратами энергии на преодоление основного и дополнительного от кривых сопротивления движению, характеризуемых выражениями:

$$A_k = m k_u \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}; \quad (2)$$

$$A_{п} = m g i L, \quad (3)$$

$$A_{с.о} = m g w_o L; \quad (4)$$

$$A_{с.кр} = m g w_{кр} L, \quad (5)$$

где $m = m_{л} + n_{в} m_{в}$ – масса поезда;

$m_{л}, m_{в}$ – массы локомотива и вагона;

$n_{в}$ – число вагонов в составе поезда;

k_u – коэффициент инерции вращающихся частей поезда [9];

V_1, V_2 – начальная и конечная скорости на участке рекуперативного торможения;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

i, L – крутизна уклона и длина участка рекуперативного торможения;

$w_o, w_{кр}$ – удельные основное и дополнительное от кривых сопротивления движению.

Затраты энергии на собственные нужды электровоза определяются их мощностью $P_{с.н}$ и временем движения T в режиме рекуперативного торможения:

$$A_{с.н} = P_{с.н} T. \quad (6)$$

Удельные значения отдельных составляющих, характеризуемых выражениями (2) – (6), и возврата электроэнергии в целом для электровоза в режиме РТ определяются по формуле, кВт·ч/10⁴ ткм:

$$a_3 = \frac{A_3 \cdot 10^4}{m_c L}, \quad (7)$$

где $m_c = m_{в} n_{в}$ – масса состава вагонов, т.

Относительным показателем эффективности РТ является коэффициент возврата электроэнергии, который оценивают для одной поездки или для всей совокупности поездок на данном участке по формуле:

$$k_p = \frac{A_{\text{эп}}}{A_{\text{эт}}}, \quad (8)$$

где $A_{\text{эп}}$ – полный возврат электроэнергии в режиме РТ;

$A_{\text{эт}}$ – полное потребление электроэнергии в режиме тяги.

С использованием формул (1) – (8) выполнены многочисленные расчеты параметров рекуперативного торможения разных электропоездов с грузовыми поездами разной массы при различных условиях движения. В качестве примера рассмотрим применение РТ с грузовыми груженным и порожним поездами для снижения скорости и поддержания заданной скорости движения на спусках. В первом случае РТ производится от начальной скорости до достижения некоторой минимальной скорости, ограниченной какими-либо условиями, во втором случае РТ на спуске реализуется обычно при постоянной скорости движения.

Для оценки возврата электроэнергии при движении электропоезда постоянного тока 2ЭС6 в режиме РТ с грузовым поездом для случая снижения скорости от максимального значения до минимального примем следующие исходные данные: участок пути прямой с нулевым уклоном; путь бесстыковой; диапазон изменения скорости движения $V = 120 \dots 15$ км/ч; масса электропоезда $m_{\text{л}} = 200$ т; КПД тяговых двигателей в режиме РТ $\eta_{\text{д}} = 0,8$; мощность собственных нужд электропоезда $P_{\text{с.н}} = 120$ кВт; коэффициент инерции вращающихся частей поезда $k_{\text{и}} = 1,06$; масса состава груженных вагонов $m_{\text{г}} = 7100$ т; масса состава порожних вагонов $m_{\text{п}} = 1775$ т; количество вагонов $n_{\text{в}} = 71$; грузовые вагоны 4-осные на подшипниках качения.

Максимальная тормозная сила электропоезда ограничивается сцеплением колес с рельсами и характеризуется выражением [9, 10]

$$B_{\text{к.сц}} = m_{\text{л}} g \psi_{\text{к.р}}, \quad (9)$$

где $\psi_{\text{к.р}}$ – коэффициент сцепления колес электропоезда с рельсами.

Согласно Правилам [10, 11] в режиме РТ коэффициент сцепления принимается равным 0,8 от коэффициента сцепления в режиме тяги, т. е. $\psi_{\text{к.р}} = 0,8\psi_{\text{к}}$. Применительно к грузовому электропоезду постоянного тока серии 2ЭС6 с рекуперативным торможением коэффициент сцепления в режиме тяги определяется по формуле

$$\psi_{\text{к}} = 0,28 + \frac{3}{50 + 20V} - 0,0007V. \quad (10)$$

Тогда при начальной скорости торможения 120 км/ч коэффициент сцепления в режиме РТ $\psi_{\text{кр}} = 0,8 \cdot 0,196 = 0,157$ и максимальная тормозная сила электропоезда, ограниченная сцеплением колес с рельсами, $B_{\text{к.сц}} = 308,3$ кН. При заданной минимальной скорости 15 км/ч в режиме РТ коэффициент сцепления $\psi_{\text{к.р}} = 0,8 \cdot 0,272 = 0,218$ и максимальная тормозная сила электропоезда $B_{\text{к.сц}} = 427,5$ кН. Следовательно, максимальная тормозная сила электропоезда не превышает допустимое значение 500 кН, рекомендуемое по условиям безопасности движения для предотвращения выжимания вагонов.

Кривые движения и энергетические показатели электропоезда постоянного тока 2ЭС6 с грузовыми груженным поездом массой 7100 т и порожним поездом массой 1775 т в режиме РТ при снижении скорости движения от 120 км/ч до 15 км/ч на прямом участке с нулевым профилем пути приведены на рисунке 1. В расчетах использованы максимальная тормозная сила электропоезда по условиям сцепления колес с рельсами, а также формулы для определения удельного основного сопротивления движению подвижного состава на бесстыковом пути, взятые из Правил тяговых расчетов [10].

Анализ полученных кривых движения показывает, что в режиме РТ грузового электропоезда при снижении скорости от 120 до 15 км/ч на участке пути с нулевым уклоном пройденный путь составляет с поездом массой 7100 т $L = 8807$ м и массой 1775 т – $L = 2579$ м; время движения – соответственно $T = 468,6$ с = 7,8 мин и $T = 137,2$ с = 2,3 мин; средняя скорость – соответственно $V_{\text{ср}} = 68,7$ км/ч и $V_{\text{ср}} = 67,7$ км/ч; ускорение (замедление) поезда –

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

соответственно в диапазоне $u = -0,061 \dots -0,065$ м/с² и $u = -0,21 \dots -0,22$ м/с². Полный возврат электроэнергии электровоза в тяговую сеть составляет с поездом массой 7100 т $A_3 = 676,3$ кВт · ч и массой 1775 т – $A_3 = 198,0$ кВт · ч; удельный возврат электроэнергии – соответственно в диапазоне $a_3 = 95 \dots 125$ кВт · ч/10⁴ ткм и $a_3 = 382 \dots 501$ кВт · ч/10⁴ ткм; расход электроэнергии на собственные нужды электровоза – соответственно $A_{с.н} = 15,6$ кВт · ч и $A_{с.н} = 4,6$ кВт · ч.

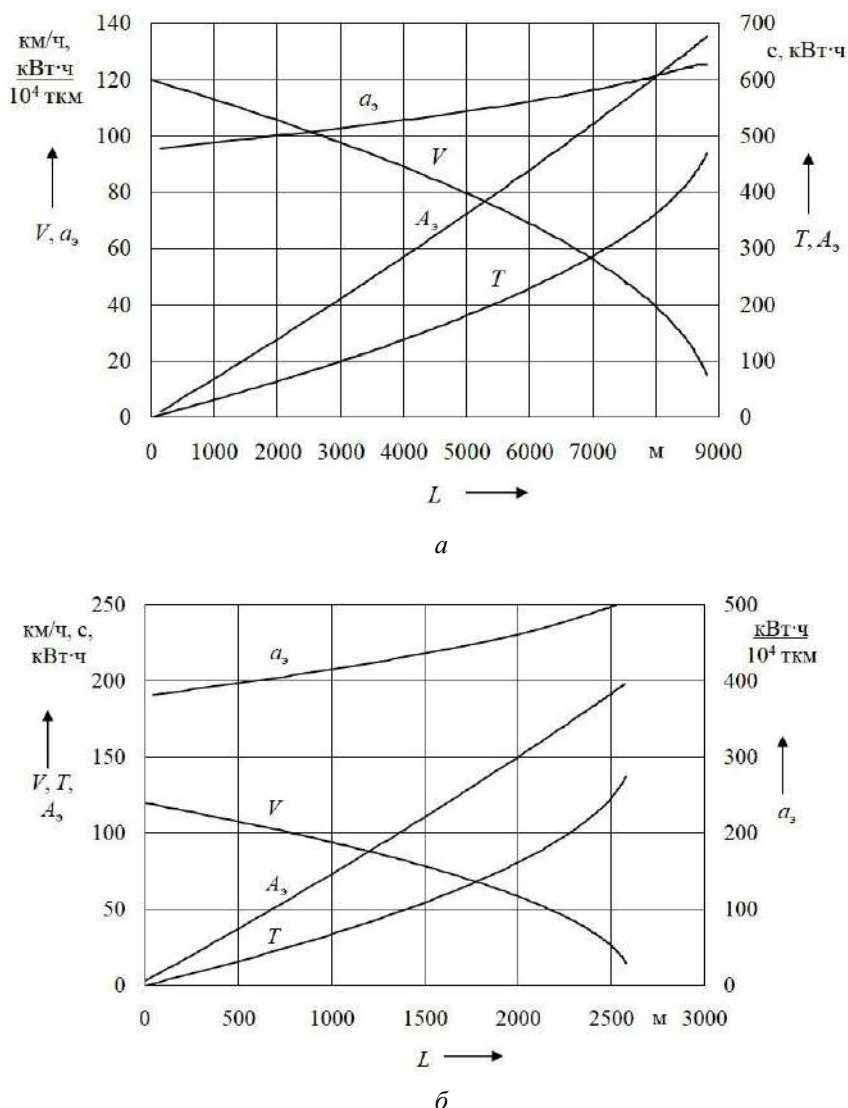
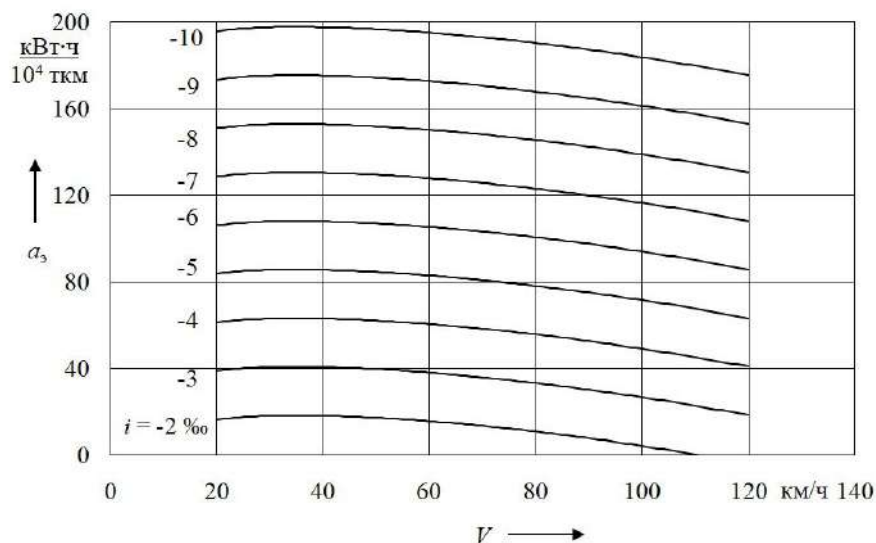
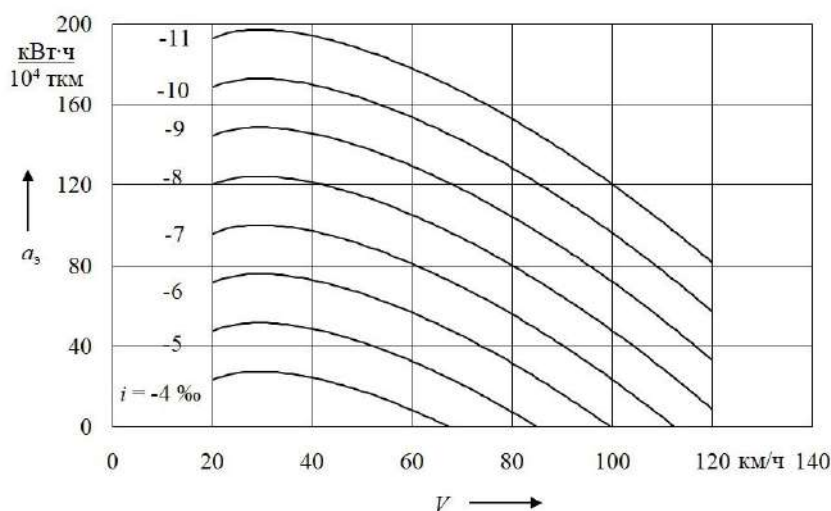


Рисунок 1 – Кривые движения на площадке грузового поезда массой состава 7100 т (а) и 1775 т (б) в режиме рекуперативного торможения электровоза при снижении скорости от 120 до 15 км/ч

Для оценки возврата электроэнергии в режиме РТ электровоза с грузовыми груженым и порожним поездами при движении на спусках различной крутизны с постоянной скоростью приняты такие же исходные расчетные параметры локомотива и состава вагонов, как при торможении со снижением скорости. Рассчитанные кривые удельного возврата электроэнергии грузового электровоза в режиме РТ для этих случаев приведены на рисунке 2.



а



б

Рисунок 2 – Удельный возврат электроэнергии грузового электровоза в режиме рекуперативного торможения при движении с составом массой 7100 т (а) и 1775 т (б) с установившейся скоростью на спусках различной крутизны

Поскольку полученные зависимости, приведенные на рисунке 2, при определенной скорости движения достигают максимальных значений, исследуем их на экстремум. Для этого на основании энергетического баланса движения поезда с установившейся скоростью запишем уравнение удельного возврата электроэнергии в режиме РТ грузового электровоза, кВт · ч/10⁴ ткм:

$$a_3 = 27,25 k_{m.л} \eta_d (i - w_o - w_{c.кр}) - \frac{P_{с.н} \cdot 10^4}{m_c V}, \quad (11)$$

где $k_{m.л} = 1 + \frac{m_{л}}{m_c}$ – коэффициент влияния массы локомотива на удельный возврат энергии.

Приравняв к нулю первую производную этого уравнения по скорости, после преобразований получим кубическое уравнение

$$bV^3 + cV^2 + d = 0, \quad (12)$$

где b, c, d – коэффициенты, характеризуемые выражениями:

$$b = 27,25k_{m.l}\eta_d \cdot 2e_2; \quad (13)$$

$$c = 27,25k_{m.l}\eta_d e_1; \quad (14)$$

$$d = -\frac{P_{с.н} \cdot 10^4}{m_c}. \quad (15)$$

Коэффициенты e_1, e_2 в выражениях (13) и (14) соответствуют формуле удельного основного сопротивления движению поезда, получаемой, в свою очередь, из формул удельного основного сопротивления движению электровоза под током и грузовых вагонов:

$$w_o = e_0 + e_1V + e_2V^2. \quad (16)$$

Формулы удельного основного сопротивления движению для принятых параметров поездов имеют вид, Н/кН:

груженный поезд –

$$w_o = 0,85 + 0,000372 V + 0,0000847 V^2; \quad (17)$$

порожный поезд –

$$w_o = 1,25 + 0,0137V + 0,000313V^2. \quad (18)$$

С учетом принятых выше исходных данных запишем кубическое уравнение для режима РТ электровоза:

с груженым поездом –

$$0,003797V^3 + 0,008338V^2 - 169,014 = 0; \quad (19)$$

с порожним поездом –

$$0,01518V^3 + 0,3323V^2 - 676,0 = 0. \quad (20)$$

Кубическое уравнение можно решить в радикалах с помощью формулы Кардано, подстановки Виета и другими способами [12, 13]. Воспользовавшись способом Кардано, с помощью подстановки $V = y - \frac{c}{3b}$ запишем кубическое уравнение в приведенной форме:

$$y^3 + 3py + 2q = 0, \quad (21)$$

в котором $3p = \frac{3b - c^2}{3b^2}; 2q = \frac{2c^3}{27b^3} + \frac{d}{b}$.

Анализ данных показывает, что дискриминант кубического уравнения больше нуля, т. е.

$$D = p^3 + q^2 > 0. \quad (22)$$

В таком случае кубическое уравнение имеет один вещественный корень и два комплексно сопряженных корня, при этом действительный корень равен сумме вспомогательных величин $y = u + s$, которые характеризуются выражениями:

$$u = \sqrt[3]{-q + \sqrt{q^2 + p^3}}; \quad (23)$$

$$s = \sqrt[3]{-q - \sqrt{q^2 + p^3}}. \quad (24)$$

После выполнения соответствующих вычислений с учетом принятых выше исходных данных получим значения энергооптимальной установившейся скорости движения грузового поезда, позволяющей получить максимальный удельный возврат электроэнергии в режиме РТ электровоза, которые согласуются с зависимостями, приведенными на рисунке 2:

груженный поезд массой состава 7100 т – $V_{\text{опт}} = 34,7$ км/ч;

порожный поезд массой состава 1775 т – $V_{\text{опт}} = 29,5$ км/ч.

Анализ полученных результатов показывает следующее.

1. Рекуперативное торможение электровоза с грузовым поездом имеет высокую энергетическую эффективность, поскольку позволяет возвращать в тяговую сеть значительное количество электроэнергии, при этом экономия энергозатрат на тягу может достигать 50 % и более. Уравнения энергетического баланса движения электровоза с грузовым поездом, выполненные расчеты и эксперименты показывают, что на энергетическую эффективность рекуперативного торможения влияет много факторов, прежде всего масса поезда, скорость движения, сопротивление движению, крутизна уклона профиля пути, условия движения, КПД тяговых электродвигателей, собственные нужды электровоза. Разумеется, энергетическая эффективность рекуперативного торможения в определенной степени зависит также от метеорологических условий, технического состояния подвижного состава и инфраструктуры, квалификации машинистов, наличия потребителей рекуперированной энергии на межподстанционной зоне и других факторов, которые в данной работе не рассматривались.

2. С целью повышения энергетической эффективности и увеличения возврата электроэнергии в тяговую сеть рекуперативное торможение грузовых поездов, позволяющее экономить значительное количество электроэнергии, целесообразно применять не только при движении на спусках, но и перед местами с ограничениями скорости и остановками на станциях. По графикам, приведенным на рисунках 1 – 2, видно, что при рекуперативном торможении электровоза с груженым грузовым поездом массой 7100 т на площадке, т. е. на участке пути с нулевым уклоном, удельный возврат электроэнергии находится на уровне $100 \dots 120 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм}$, т. е. получается примерно такой же, как при торможении с установившейся скоростью на спусках крутизной $-6 \dots -7 \%$. При рекуперативном торможении порожнего грузового поезда массой 1775 т на площадке удельный возврат электроэнергии в диапазоне скорости $120 \dots 100 \text{ км/ч}$ составляет около $200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм}$, т. е. получается примерно такой же, как при торможении с установившейся скоростью на спусках крутизной -11% и более. Конкретное значение возврата электроэнергии зависит от массы поезда, начальной скорости рекуперативного торможения, крутизны и протяженности спусков и других факторов. В любом случае рекуперативное торможение электровоза с поездом, особенно большой массы, перед местами с ограничениями скорости движения и остановок целесообразно применять для снижения скорости движения только при наличии достаточного запаса времени и расстояния до таких мест. Из графиков на рисунке 1 видно, что для снижения скорости движения в режиме РТ на одинаковую величину для груженого поезда по сравнению с порожним требуется значительно большие путь и время.

3. В режиме рекуперативного торможения при снижении скорости движения поезда на площадке удельный возврат электроэнергии возрастает, поскольку увеличивается тормозная сила электровоза и уменьшается сопротивление движению (см. рисунок 1). Например, при снижении скорости движения с 60 до 40 км/ч груженный грузовой поезд массой 7100 т проходит путь 1242,9 м за время 89,9 с, при этом удельный возврат электроэнергии возрастает с 115,1 до 121,1 $\text{кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм}$, а полный возврат электроэнергии составляет 104,2 $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ (рисунок 1, а). При таком же снижении скорости порожний грузовой поезд массой 1775 т проходит путь 364,0 м за время 26,3 с, при этом удельный возврат электроэнергии возрастает с 460,3 до 484,4 $\text{кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм}$, а полный возврат электроэнергии составляет 30,5 $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ (рисунок 1, б).

При прочих равных условиях полный возврат электроэнергии в режиме РТ тяжелого груженого поезда больше, чем порожнего поезда, хотя у последнего удельный возврат электроэнергии выше.

4. Рекуперативное торможение электровоза с грузовыми поездами, особенно большой массы, имеет наиболее высокую эффективность на спусках. При движении на спуске неизменной крутизны удельный возврат электроэнергии электровоза принимает максимальное значение при определенной установившейся скорости (см. рисунок 2), при большей или меньшей скорости удельный возврат электроэнергии снижается, причем у порожнего грузового поезда его снижение больше, чем у груженого. Это обусловлено влиянием основного сопротивления движению, которое у порожнего поезда значительно больше, чем у груженого.

С увеличением крутизны спуска при прочих равных условиях возврат электроэнергии электровоза в режиме РТ возрастает пропорционально крутизне уклона. На спуске одинаковой крутизны полный возврат электроэнергии электровоза с груженым поездом больше, чем с порожним, хотя удельный возврат электроэнергии с порожним поездом больше, чем с груженым.

5. Полученные выше значения энергооптимальной установившейся скорости, при которых достигается максимальный удельный возврат электроэнергии электровоза в режиме РТ, равные для груженого поезда 34,7 км/ч (рисунок 2, а) и для порожнего поезда 29,5 км/ч (рисунок 2, б), при нормальных условиях не позволяют реализовать установленный график движения грузовых поездов, так как увеличивается перегонное время хода. Для выполнения установленного графика движения поездов необходимо поддерживать более высокую скорость, не менее 70 км/ч. Расчеты показывают, например, что при скорости движения 70 км/ч на спуске крутизной 7 ‰ удельный возврат электроэнергии электровоза с груженым поездом массой 7100 т составляет $125,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм}$, который меньше наибольшего удельного возврата электроэнергии $130,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм}$ при скорости 34,7 км/ч на 3,7 % (см. рисунок 2, а). Аналогично при движении электровоза с порожним поездом массой 1775 т со скоростью 70 км/ч на спуске крутизной 7 ‰ удельный возврат электроэнергии составляет $69,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм}$, который меньше наибольшего удельного возврата электроэнергии $100,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм}$ при скорости 29,5 км/ч на 30,8 % (см. рисунок 2, б).

Следовательно, у груженого грузового поезда по сравнению с порожним поездом при высокой скорости движения удельный возврат электроэнергии снижается незначительно по отношению к энергооптимальной скорости, поэтому рекуперативное торможение груженого поезда в области больших скоростей движения имеет достаточно высокую энергетическую эффективность.

6. Таким образом, наибольшую эффективность и максимальный возврат электроэнергии в тяговую сеть, т. е. наибольшую экономию энергии на тягу, рекуперативное торможение имеет при вождении грузовых поездов большой массы с энергооптимальной или близкой к ней скоростью на уклонах большой крутизны с использованием режимов работы электровозов с наивысшим КПД тяговых электродвигателей и минимальным энергопотреблением на собственные нужды электровозов.

7. Полученные результаты, характеризующие влияние основных факторов на возврат электроэнергии в режиме рекуперативного торможения электровоза с грузовыми поездами, в том числе подход к поиску экстремума удельного возврата энергии и определению энергооптимальных значений установившейся скорости движения по критерию максимума возврата энергии в тяговую сеть, при различных условиях движения позволяют разрабатывать рациональные по энергозатратам режимы вождения грузовых поездов.

Список литературы

1. Бакланов, А. А. Пути повышения энергоэффективности применения систем рекуперативного торможения на Красноярской железной дороге / А. А. Бакланов, С. В. Швецов, А. П. Шиляков. – Текст : непосредственный // Эксплуатационная надежность локомотивного

парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2012. – С. 300–308.

2. Мазнев, А. С. Повышение эффективности электроподвижного состава / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 9. – С. 33–36.

3. Мельниченко, О. В. Повышение энергетических показателей электровозов / О. В. Мельниченко, Ю. В. Газизов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 3. – С. 50–51.

4. Сопов, В. И. Количественная оценка объемов энергии тяги и торможения на основе обработки экспериментальных данных / В. И. Сопов, А. А. Штанг, Е. А. Спиридонов. – Текст : непосредственный // Транспортные системы Сибири : материалы международной научно-технической конференции. – Красноярск : Красноярский гос. техн. ун-т., 2004. – С. 143.

5. Бакланов, А. А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов постоянного тока / А. А. Бакланов, А. П. Шиляков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 2 (38). – С. 23–33.

6. Черемисин, В. Т. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 1 (25). – С. 60–70.

7. Бакланов, А. А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов / А. А. Бакланов. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. – 2005. – № 6. – С. 32–35.

8. Бакланов, А. А. Принципы классификации влияющих факторов на расход энергии электроподвижным составом / А. А. Бакланов, А. П. Шиляков, А. В. Раздобаров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 65–75.

9. Астахов, П. Н. Справочник по тяговым расчетам / П. Н. Астахов, П. Т. Гребенюк, А. И. Скворцова. – Москва : Транспорт, 1973. – 256 с. – Текст : непосредственный.

10. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с. – Текст : непосредственный.

11. Правила тяговых расчетов для поездной работы : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р. – Москва, 2016. – 515 с. – Текст : непосредственный.

12. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва : Наука, 1965. – 608 с. – Текст : непосредственный.

13. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1974. – 832 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Baklanov A. A., Shvetsov S. V., Shilyakov A. P. Ways to improve energy efficiency the use of regenerative braking systems on the Krasnoyarsk Railway [Puti povysheniya energoeffektivnosti primeneniya system rekuperativnogo tormozheniya na Krasnoyarskoy zheleznoy doroge]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tiagi poezdov : materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction: materials of the All-Russian scientific and technical conference with international participation). – Omsk, 2012. pp. 300 – 308.

2. Maznev A. S., Evstafyev A. M. Improving the efficiency of electric rolling stock [Povysheniye effektivnosti elektropodvizhnogo sostava]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport*, 2010, no. 9, pp. 33 – 36.

3. Melnichenko O. V., Gazizov Y. V. Increasing the energy performance of electric locomotives [Povysheniye energeticheskikh pokazateley elektrovozov]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport*, 2010, no. 3, pp. 50 – 51.

4. Sopov V. I., Shtang A. A., Spiridonov E. A. Quantitative assessment of the energy of thrust and braking based on the processing of experimental data [Kolichestvennaya otsenka ob'yemov energii i tormozheniya na osnove obrabotki eksperimental'nykh dannykh]. *Transportnye sistemy Sibiri: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (Transport systems of Siberia: materials of the International Scientific and Technical Conference). – Krasnoyarsk, 2004, p. 143.
5. Baklanov A. A., Shilyakov A. P. Improving energy efficiency of passenger DC electric locomotive [Povysheniye energeticheskoy effektivnosti passazhirskikh elektrovozov postoyannogo toka] *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 2 (38), pp. 23 – 33.
6. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Methodology for assessing the energy efficiency of the use of regenerative braking and the use of energy recovery [Metodologiya otsenki energeticheskoy effektivnosti primeneniya rekuperativnogo tormozheniya i ispol'zovaniya energii rekuperatsii] *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 1 (25), pp. 60 – 70.
7. Baklanov A. A. The energy balance of the movement to solve problems of reducing power consumption for train traction [Energeticheskiy balans dvizheniya dlya resheniya zadach snizheniya raskhoda elektroenergii na tyagu poyezdov]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – Transport: science, technology, management*, 2005, no. 6, pp. 32 – 35.
8. Baklanov A. A., Shilyakov A. P. Principles of classification of influencing factors on the energy consumption of electric rolling stock [Printsipy klassifikatsii vliyayushchikh faktorov na raskhod energii elektropodvizhnym sostavom]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 4 (44), pp. 65 – 75.
9. Astakhov P. N., Grebenyuk P. T., Skvortsova A. I. *Spravochnik po tyagovym raschetam* (Handbook of traction calculations). Moscow: Transport Publ., 1973, 256 p.
10. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* (Traction rules for train operation). Moscow: Transport Publ., 1985, 287 p.
11. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* (Traction rules for train operation), approved by the order of JSC «RZD» from 12.05.2016 № 867r. Moscow, 2016, 515 p.
12. Bronstein I. N., Semendiyayev K. A. *Spravochnik po matematike* (Math Handbook). Moscow: Science Publ., 1965, 608 p.
13. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematics Handbook for Scientists and Engineers). Moscow: Science Publ., 1974, 832 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бакланов Александр Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@mail.ru

Шильяков Андрей Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: ShilyakovAP@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baklanov Alexandr Alexeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@mail.ru

Shilyakov Andrey Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: ShilyakovAP@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Бакланов, А. А. Энергетическая эффективность рекуперативного торможения грузовых электровозов / А. А. Бакланов, А. П. Шилияков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 11 – 22.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Baklanov A. A., Shilyakov A. P. Energy efficiency regenerative braking freight electric locomotives. The Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 4 (48), pp. 11 – 22 (In Russian).

УДК 629.1.027

С. Т. Ахатов, В. Г. Солоненко, Н. М. Махметова

Академия логистики и транспорта (АЛТ), г. Алматы, Республика Казахстан

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ СКОРОСТНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. Предметом исследования является проблема управления экипажем в пространстве с помощью автоматической системы регулирования зазора между полюсами электромагнита и феррорельсами в системе скоростного наземного транспорта, основанного на эффекте левитации. Одним из основных условий комфортного левитационного режима движения экипажа является отсутствие вертикальных деформаций экипажа при многоточечном подвесе в связи с неоднородным распределением подъемных и направляющих сил. С целью обеспечения устойчивости электромагнитного подвеса экипажа предложены различные комбинации обратных связей системы управления. Приведены результаты исследования системы управления электромагнитным подвесом с использованием обратной связи по току электромагнита в режиме левитации наземного скоростного транспорта. Основным требованием к системе управления электромагнитным подвесом в режиме левитации является максимально допустимое отклонение допустимого воздушного зазора ± 5 мм при воздействии импульса аэродинамической силы в горизонтальной плоскости и скорости ее приложения. Предложен принцип подчиненного регулирования параметров системы управления с применением регуляторов в соответствии с функциональной двухконтурной системой автоматического регулирования с обратной связью по току. Применение двухконтурной системы автоматического управления при колебаниях напряжения питания корректирует ток электромагнита и исключает отклонение максимально допустимого зазора между электромагнитом и феррорельсом. Выполненные расчеты доказывают, что введение обратной связи по току электромагнита уменьшает коэффициенты передачи по скорости и тем самым увеличивает быстрдействие сигнала.

Ключевые слова: электромагнитный подвес, феррорельс, левитация, магнитный поток, экипаж, система управления.

Semyat T. Akhatov, Vladimir G. Solonenko, Narzankul M. Makhmetova

Academy of logistics and transport (ALT), Almaty, Republic of Kazakhstan

CONTROL SYSTEM OF ELECTROMAGNETIC SUSPENSION WITH FEEDBACK OF HIGH-SPEED LAND TRANSPORT

Abstract. The subjects of the study are the problem of controlling the crew in space by means of an automatic system for controlling the gap between the electromagnet poles and ferro-rails in the system of high-speed land transport based on the levitation effect. One of the main conditions for comfortable levitation mode of the crew is the absence of vertical deformations of the crew during multipoint suspension due to non-uniform distribution of lifting and guiding forces. In order to ensure the stability of the crew's electromagnetic suspension, various combinations of control system feedbacks are proposed. The results of the study of the electromagnetic suspension control system using the electromagnet current feedback in the land speed vehicle levitation mode are presented. The main requirement to the control system of an electromagnetic suspension in the levitation mode is the maximum permissible deviation of the permissible air gap ± 5 mm under the action of the impulse of the aerodynamic force in the horizontal plane and the speed of its application. The principle of subordinate regulation of the control system parameters with the use of regulators in accordance with the functional two-loop system of automatic regulation with current feedback has been proposed. The application of the double-loop automatic control system at supply voltage fluctuations corrects the electromagnet current and excludes the deviation of the maximum permissible gap between the electromagnet and the ferro-rail. The performed calculations prove that the introduction of the electromagnet current feedback decreases the velocity transfer coefficients and thus increases the signal speed.

Keywords: electromagnetic suspension, ferro-rail, levitation, magnetic flux, crew, control system.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Наиболее сложной задачей, которую необходимо решить при создании систем скоростного наземного транспорта, основанного на эффекте левитации, является проблема управления экипажем в пространстве с помощью автоматической системы управления зазора между полюсами электромагнита и феррорельсами. В работе [1] разработаны предварительные технические требования к структуре и основным параметрам систем скоростного наземного транспорта. Исходя из этих требований система управления электромагнитного подвеса должна выполнять следующие основные функции:

обеспечивать поддержание зазора $\delta_{\text{ном}} = 15$ мм между полюсами электромагнита и феррорельса в вертикальной плоскости с максимально допустимым отклонением 15 мм, при воздействии центробежных сил сопряжений профиля и местных неровностей порядка ± 80 кН, сил непогашенных ускорений при прохождении кривых 80 кН и вертикальных аэродинамических сил с постоянным временем нарастания $0,1 \div 0,2$ с [2, 3];

обеспечивать поддержание $\delta_{\text{ном}} = 15$ мм в горизонтальной плоскости при максимально допустимом отклонении ± 5 мм при воздействии импульса аэродинамической силы в горизонтальной плоскости 100 кН и скорости его приложения до 10000 кН/с. Система должна компенсировать также возмущающие силы, как постоянную, так и знакопеременную со стороны устройства токосъемника, и обеспечивать минимальные энергетические затраты на поддержание воздушного зазора;

состав должен следовать по траектории путевой структуры, обусловленной переходными кривыми в горизонтальной и вертикальной плоскостях, низкочастотными неровностями с максимальной частотой 15 Гц, и не вызывать деформации экипажа при многоточечном подвесе из-за неравномерного распределения подъемных и направляющих сил.

Из результатов зарубежных разработок систем управления электромагнитным подвесом известно, что движение может осуществляться со скоростью до 600 км/ч, однако технические характеристики этих разработок конфиденциальны.

Для обеспечения устойчивости электромагнитного подвеса скоростного наземного транспорта использует различные комбинации сигналов обратной связи: по зазору, скорости и ускорению изменения зазора и т. д.

В таблице приведены алгоритмы управления электромагнитным подвесом, используемые в зарубежных разработках устройств управления подвесом.

Алгоритмы управления электромагнитным подвесом с обратной связью

№ п/п	Алгоритм управления	Обратная связь по				
		за- зору, δ	ско- рости изме- нения зазора $\dot{\delta}$	ско- рости элект- ро- маг- нита v	уско- ре- нию элект- ро- маг- нита a	уско- ре- нию изме- нения зазора $\ddot{\delta}$
1	$U_{\text{упр}} = [(\delta - \delta_3)K_1 + K_2 a + K_3 \ddot{\delta}]K_3$	+	–	–	+	+
2	$U_{\text{упр}} = [K_1(\delta - \delta_3) + K_2 \dot{\delta} + K_3 \ddot{\delta}]K_4$	+	+	–	–	+
3	$U_{\text{упр}} = [K_3 \delta + K_2 \dot{\delta} + K_1 a - K_3 \delta_3]K_4$	+	+	–	+	–
4	$U_{\text{упр}} = \left[K_1(\delta_3 - \delta) + K_2 \frac{d(\delta_3 - \delta)}{dt} + K_3 \int (\delta_3 - \delta) dt \right] K_4$	+	+	–	–	–
5	$U_{\text{упр}} = K_1(\delta_3 - \delta) + K_2 v + K_3 a$	+	–	+	+	–

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В формулах таблицы приняты следующие обозначения: δ – истинное значение зазора; a – ускорение электромагнита; δ_3 – заданное значение зазора; $\dot{\delta}$, $\ddot{\delta}$ – скорость и ускорение изменения зазора соответственно; K_1, K_2, K_3, K_4 – коэффициенты усиления регуляторов.

Для определения оптимального варианта функциональных связей системы управления электромагнитным подвесом необходимы дальнейшие теоретические исследования по выбору оптимальных структурных связей и разработка специальных функциональных электронных узлов.

Однако для обеспечения поддержания оптимального зазора $\delta_{\text{ном}} = 15$ мм в горизонтальной плоскости целесообразно применить принцип подчиненного регулирования параметров для облегчения синтеза систем управления и применения унифицированных регуляторов [4, 5].

Структурная схема управления электромагнитным подвесом, разработанная по принципу подчиненного регулирования, имеет два контура (рисунок 1): регулирования зазора – звено 1 – и регулирования тока – звено 2 и электромагнит, который является внутренним по отношению к контуру регулирования зазора.

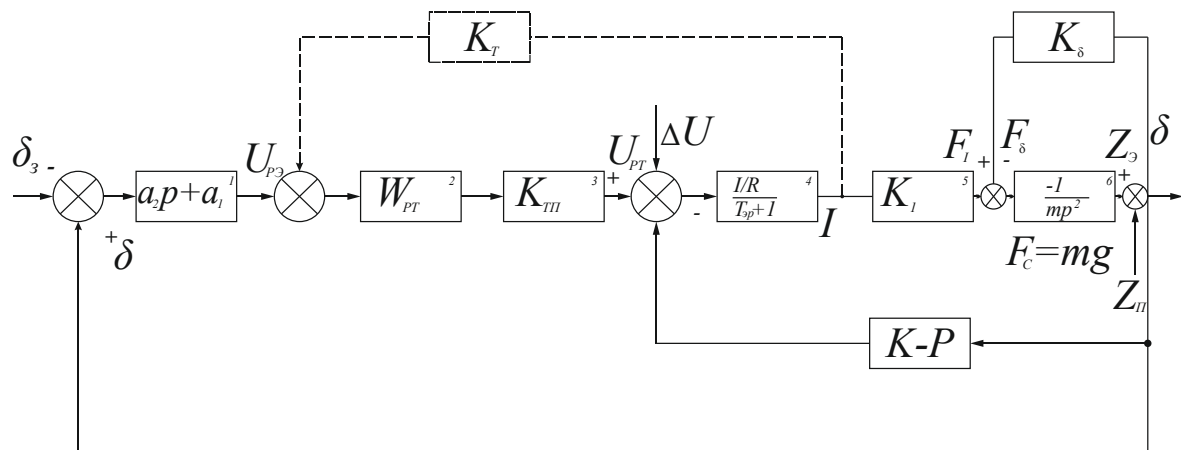


Рисунок 1 – Функциональная схема двухконтурной системы автоматического регулирования зазора:

δ – зазор; δ_z – величина зазора; $Z_э$ – координата электромагнита; Z_{Π} – координата пути по отношению к горизонтали; F_{Π} – левитационная сила; F_C – подъемная сила электромагнита; F_I – левитационная сила по току;

F_δ – левитационная сила по зазору; a_1, a_2 – параметры регулятора зазора;

$W_{p.т}$ – передаточная функция регулятора тока; $K_{тп}$ – коэффициент усиления преобразователя;

K_T – коэффициент отрицательной обратной связи по току электромагнита;

K_I, K_δ – коэффициенты передачи от тока и зазора к силе; m – масса экипажа;

K – коэффициент передачи от скорости изменения зазора к ЭДС индукции [6, 7]; $T_{э, р}$ – постоянная во времени электромагнита регулятора; $U_{р,з}$ – сигнал выхода регулятора зазора; $U_{р,т}$ – сигнал входа регулятора зазора; ΔU – сигнал колебания напряжения питания; I – ток электромагнита

Заданный ток электромагнита в каждый момент времени определяется значением сигнала с выхода регулятора зазора $U_{p.з}$. Ограничением сигнала $U_{p.з}$ достигается ограничение максимального тока. Если бы не было обратной связи по току, то зазор, например, при колебаниях напряжения питания электромагнита, изменяется под действием либо силы тяжести, либо силы притяжения. В случае использования обратной связи по току изменению силы за счет колебаний напряжения питания противодействует корректировка тока электромагнита, исключая изменение зазора.

Для компенсации постоянной времени электромагнита T_z передаточная функция регулятора тока $W_{p, T}$ с учетом требований помехозащищенности [8]:

$$W_{p. \text{ T}} = \frac{1+T_3P}{\rho T_0 K_{\text{TII}} K_{\text{TR}}}, \quad (1)$$

где $T_3 = 1/\omega$ – постоянная времени, определяющая помехозащищенность контура тока; ω – максимально допустимая частота пропускания контура тока; $K_{\text{тп}}$ – коэффициент усиления преобразователя; $K_{\text{т}}$ – коэффициент передачи звена обратной связи по току; R – сопротивление электромагнита; ρ – удельное сопротивление проводникового материала электромагнита.

Структурная схема системы автоматического регулирования зазора без использования регулятора тока при включении элементов, изображенных на рисунке 1 штриховыми линиями, позволяет определить для системы без обратной связи по току передаточные функции:

замкнутой системы по задающему воздействию –

$$W_{\delta_3}(P) = \frac{\delta(P)}{\delta_3(P)} = \frac{K_{\text{т}}K_{\text{тп}}(a_1 + a_2P)}{K_{\delta}R_A(P)}; \quad (2)$$

замкнутой системы по возмущению со стороны питающего напряжения на входе тиристорного преобразователя –

$$W_{\Delta U}(P) = \frac{\delta(P)}{\delta U(P)} = -\frac{K_{\text{т}}}{K_{\delta}R_A(P)}; \quad (3)$$

замкнутой системы по возмущению в виде изменения массы экипажа или изменения второй производной координаты путевой структуры –

$$W_{F_C}(P) = \frac{\delta(P)}{F_C(P)} = \frac{1 + T_3P}{K_{\delta}A(P)}. \quad (4)$$

В формулах (2) – (4) $A(P)$ – характеристический полином системы без регулятора тока;

$$A(P) = T_3T^2P^3 + T^2P^2 + \left(a_2K_{\text{тп}}\frac{K_I}{RK_{\delta}} + \frac{K_1}{R} - T_3\right)P + \frac{a_1K_{\text{тп}}K_I}{K_{\delta}R} - 1, \quad (5)$$

где $T^2 = \frac{m}{K_{\delta}}$; $K_1 = \frac{K_I K}{K_{\delta}}$.

Для системы с отрицательной обратной связью по току электромагнита аналогичные передаточные функции имеют вид:

замкнутой системы по задающему воздействию –

$$W'_{\delta_3}(P) = \frac{\delta(P)}{\delta_3(P)} = \frac{K_I(a_1 + a_2P)(1 + T_3P)}{K_{\delta}K_I B(P)}; \quad (6)$$

замкнутой системы по изменению напряжения на входе –

$$W'_{\Delta U}(P) = \frac{\delta(P)}{\delta U(P)} = -\frac{K_I T_{\delta} P}{K_{\delta} R B(P)}; \quad (7)$$

замкнутой системы по изменению внешней силы –

$$W'_{F_C}(P) = \frac{\delta(P)}{F_C(P)} = \frac{(1 + T_0P)(1 + T_3P)}{K_{\delta} B(P)}. \quad (8)$$

В выражениях (5) – (8) $B(P)$ характеристический полином системы с обратной связью по току –

$$B(P) = T_3 T_0 T^2 P^4 + (T_3 + T_0) T^2 P^3 + \left(\frac{a_2 T_3 K_I}{K_\delta K_T} + \frac{T_0 K K_T}{K_\delta R} + T^2 - T_3 T_0 \right) P^2 + \left[(a_1 T_3 + a_2) \frac{K_I}{K_\delta K_I} - T_0 - T_3 \right] P + \frac{a_1 K_I}{K_I K_\delta} - 1. \quad (9)$$

Используем выражения (5) и (9) для построения областей устойчивости обеих систем [9, 10].

В данном случае варьируются коэффициенты передачи a_1 и a_2 пропорционально дифференциальному регулятору зазора, остальные параметры взяты для систем с электромагнитным подвесом с подъемной силой до 2500 Н.

На рисунке 2 приведены области устойчивости на плоскости коэффициентов передачи a_1 , a_2 . Из графика на рисунке 2 видно, что введение обратной связи по току позволяет уменьшить коэффициент передачи по скорости изменения зазора и тем самым увеличить быстродействие системы. На рисунке 3 показана зависимость времени регулирования от коэффициента передачи по зазору a_1 для системы с обратной связью по току электромагнита и без нее.

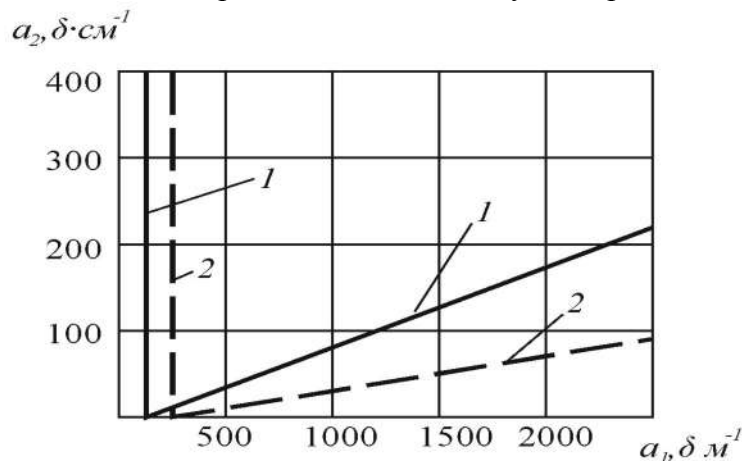


Рисунок 2 – Области устойчивости коэффициентов передачи пропорционально дифференциального регулятора зазора: 1 – система без регулятора, 2 – система с регулятором

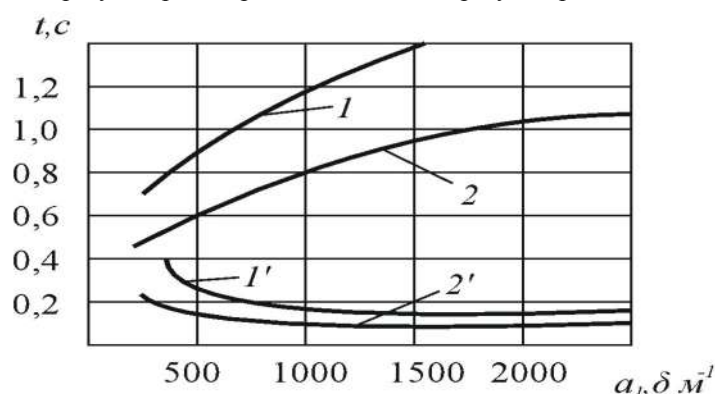


Рисунок 3 – График зависимости времени регулирования от коэффициента передачи по величине зазора: 1 и 1' – система без регулятора, 2 и 2' – система с регулятором

Из приведенных на рисунках 2 и 3 значений следует, что время регулирования при использовании регулятора тока существенно уменьшается для всех значений параметров a_1 и a_2 и, кроме того, применение обратной связи по току, как показывают выражения (3) и (7), исключает ошибку, вызываемую изменением напряжения питания электромагнита.

1. Высокоскоростной транспорт будущего : сборник статей / под ред. Б. Н. Тихменева. – Москва : Транспорт, 1979. – 78 с. – Текст : непосредственный.
2. Мусаев, Ж. С. Современные технологии в транспортной технике: эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт высокоскоростного подвижного состава : учебное пособие / Ж. С. Мусаев. – Алматы : TechSmith, 2018. – 212 с. – Текст : непосредственный.
3. Мусаев, Ж. С. Современный подвижной состав железных дорог : учебное пособие / Ж. С. Мусаев. – Алматы : КазАТК им. М.Тынышпаева, 2017. – 112 с. – Текст : непосредственный.
4. Мусаев, Ж. С. Современный подвижной состав железных дорог : курс лекций / Ж. С. Мусаев. – Алматы : КазАТК им. М.Тынышпаева, 2017. – 306 с. – Текст : непосредственный.
5. Управление вентильными электроприводами постоянного тока / Е. Д. Лебедев, В. Е. Неймарк, М. Я. Пистрак, О. В. Слежановский. – Москва : Энергия, 1970. – 199 с. – Текст : непосредственный.
6. Akhatov S. T., Solonenko V. G., Makhmetova N. M., Kosenko S. A., Ivanovtseva N. V., Malik A. A. Application of linear asynchro-nous motors for high-speed ground transport. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 2021, vol. 2, no. 446, pp. 31 – 36, <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.31>.
7. Ахатов, С. Т. Исследование системы синхронной тяги с линейными двигателями / С. Т. Ахатов, В. Г. Солоненко, Н. М. Махметова. – Текст : непосредственный // Вестник КазАТК. – 2021. – № 1 (116). – С. 89–96.
8. Скобелев, В. Е. Анализ путей улучшения характеристик тяговых линейных асинхронных двигателей для высокоскоростного наземного транспорта / В. Е. Скобелев, Г. И. Соловьев, А. П. Епифанов. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2012. – № 2. – С. 3–12.
9. Казаченко, Е. В. Экспериментальные взаимодействия между индуктором и реактивной шиной одностороннего линейного асинхронного двигателя / Е. В. Казаченко. – Текст : непосредственный // Высокоскоростной наземный транспорт. – 2016. – С. 144–150.
10. Матин, В. Н. Системы синхронной тяги и направления для высокоскоростного наземного транспорта / В. Н. Матин, К. И. Ким. – Текст : непосредственный // Высокоскоростной наземный транспорт. – 2016. – С. 45–52.

References

1. Tikhmenev B. N. ed. *Skorostnoy transport budushchego* (High-speed transport of the future). Moscow: Transport Publ., 1979, 78 p.
2. Musaev J. S. *Sovremennyye tekhnologii v transportnoy tekhnike: ekspluatatsiya, tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava : uchebnoe posobie* (Modern technologies in transport engineering: operation, maintenance and repair of high-speed rolling stock : textbook). Almaty: TechSmith Publ., 2018, 212 p.
3. Musaev Zh. S. *Sovremennyy podvizhnoy sostav zheleznikh dorog : uchebnoe posobie* (Modern rolling stock of railroads : textbook). Almaty: KazATC named after M. Tynyshpayev Publ., 2017, 112 p.
4. Musayev Zh. S. *Sovremennyy podvizhnoy sostav zheleznikh dorog : kurs lektsii* (Modern rolling stock of railroads : course of lectures). Almaty: KazATC named after M. Tynyshpayev Publ., 2017, 306 p.
5. Lebedev E. D., Neimark V. E., Pistrak M. Ia., Slezhanovskii O. V. *Upravleniye ventil'nyimi elektroprivodami postoyannogo toka* (Management of ventilated DC electric drives). Moscow: Energiia Publ., 1970, 199 p.
6. Akhatov S. T., Solonenko V. G., Makhmetova N. M., Kosenko S. A., Ivanovtseva N. V., Malik A. A. Application of linear asynchro-nous motors for high-speed ground transport. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, 2021, vol. 2, no. 446, pp. 31 – 36, <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.31>.

7. Akhatov S. T., Solonenko V. G., Makhmetova N. M. Study of synchronous traction system with linear motors [Issledovaniye sistemy sinkhronnoy tyagi s lineynymi dvigatelyami]. *Vestnik KazATK – Bulletin of KazATK*, 2021, no. 1 (116), pp. 89 – 96.

8. Skobelev V. E., Soloviev G. I., Epifanov A. P. Analysis of ways to improve characteristics of traction linear induction motors for high-speed land transport [Analiz putey uluchsheniya kharakteristik tyagovykh lineynykh asinkhronnykh dvigateley dlya vysokoskorostnogo nazemnogo transporta]. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the World*, 2012, no. 2, pp. 3 – 12.

9. Kazachenko E. V. Experimental interactions between inductor and reactive bus of a one-way linear induction motor. [Eksperimental'nyye vzaimodeystviya mezhdu induktorom i reaktivnoy shinoi odnostoronnogo lineynogo asinkhronnogo dvigatelya]. *Vysokoskorostnoi nazemnyi transport – High-speed ground transport*, 2016, pp. 144 – 150.

10. Matin V. N., Kim K. I. Combined synchronous traction and direction systems for high-speed ground transport [Kombinirovannyye sistemy sinkhronnoy tyagi i napravleniya dlya vysokoskorostnogo nazemnogo transporta]. *Vysokoskorostnoi nazemnyi transport – High-speed ground transport*, 2016, pp. 45 – 52.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахатов Семят Турганжанович

Академия логистики и транспорта (АЛТ).
Шевченко ул., д. 97, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан.
Ассистент-преподаватель кафедры «Магистральная инженерия», АЛТ.
Тел.: +7 (705) 575-97-13.
E-mail: semyat@mail.ru

Солоненко Владимир Гельевич

Академия логистики и транспорта (АЛТ).
Шевченко ул., д. 97, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Магистральная инженерия», АЛТ.
Тел.: +7 (777) 254-80-37.
E-mail: v.solonenko@mail.ru

Махметова Нарзанкуль Мусаевна

Академия логистики и транспорта (АЛТ).
Шевченко ул., д. 97, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Магистральная инженерия», АЛТ.
Тел.: +7 (777) 413-69-33.
E-mail: makhmetova_n1958@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ахатов, С. Т. Система управления электромагнитным подвесом с обратной связью скоростного наземного транспорта / С. Т. Ахатов, В. Г. Солоненко, Н. М. Махметова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 22 – 28.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akhatov Semyat Turganzhanovich

Academy of Logistics and Transport (ALT).
Shevchenko st., 97, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan.
Assistant-teacher of the department «Highway Engineering», ALT.
Phone: +7 (705) 575-97-13.
E-mail: semyat@mail.ru

Solonenko Vladimir Gelievich

Academy of Logistics and Transport (ALT).
Shevchenko st., 97, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan.
Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Highway Engineering», ALT.
Phone: +7 (777) 254-80-37.
E-mail: v.solonenko@mail.ru

Makhmetova Narzankul Musaevna

Academy of Logistics and Transport (ALT).
Shevchenko st., 97, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan.
Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Highway Engineering», ALT.
Phone: +7 (777) 413-69-33.
E-mail: makhmetova_n1958@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Akhatov S. T., Solonenko V. G., Makhmetova N. M. Control system of electromagnetic suspension with feedback of high-speed land transport. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 4 (48), pp. 22 – 28 (In Russian).

И. С. Лексутов, В. П. Клюка

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАТАНИЯ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ВАГОНА ПРИ ПЛАНОВЫХ ВИДАХ РЕМОНТА

Аннотация. Предметом исследования является процесс применения оптических технологий бесконтактных измерений геометрических параметров колесной пары вагона в ходе эксплуатации и при осуществлении ремонта. Цель исследования – проработка методик натурных испытаний технологий контроля геометрических параметров деталей вагона при помощи оптического дальномера со взаимной верификацией полученных результатов при помощи численного моделирования с применением трехмерных цифровых моделей объектов и средств измерения. В результате исследования получены экспериментальные и расчетные зависимости показаний оптического датчика в ходе изменения взаимного положения объекта измерения (колесной пары) и дальности. Для натурных испытаний были использованы два лазерных триангуляционных дальномера. Для численного моделирования была создана программа, которая позволяет генерировать трехмерную модель поверхности катания колесной пары, состоящую из множества точек, принадлежащих поверхности вращения. Моделирование заключается в поиске точек пересечения линии, заданной при помощи координат точки источника излучения в пространстве и направляющего вектора, с моделью поверхности катания. После вычислений результат выдается в виде таблицы с вычисленными дальностями и визуализируется в виде проекций трехмерной проволоочной модели колеса и луча дальномера. Визуализация процесса численного моделирования важна для исключения неправильной интерпретации результатов расчетов и проверки соблюдения физического смысла получаемых при моделировании численных данных. Сравнение графиков показывает сходимость результатов и достаточную точность численных моделей и методик, которые можно применять в дальнейшем для планирования натурных испытаний проектируемых методик и оборудования для размерного контроля деталей вагона.

Ключевые слова: Лазерный триангуляционный дальномер, численное моделирование, измерение, колесная пара.

Ilya S. Leksutov, Vladislav P. Klyuka

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

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF CONTACTLESS MEASUREMENT OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE ROLLING SURFACE OF THE WHEELSET OF A WAGON DURING PLANNED TYPES OF REPAIR

Abstract. The subject of the study is the process of applying optical technologies for non-contact measurements of geometric parameters of a wagon wheelset during operation and repair. The purpose of the study is to study the methods of field testing of technologies for controlling the geometric parameters of car parts using an optical rangefinder, with mutual verification of the results obtained using numerical modeling using three-dimensional digital models of objects and measuring instruments. As a result of the study, experimental and calculated dependences of the optical sensor readings were obtained during the change in the relative position of the measuring object (wheelset) and the rangefinder. Two laser triangulation rangefinders were used for field tests. For numerical simulation, a program was created that allows generating a three-dimensional model of the rolling surface of a wheelset consisting of a set of points belonging to the surface of rotation. The simulation consists in finding the intersection points of a line defined using the coordinates of the point of the radiation source in space and the guiding vector with the model of the skating surface. After the calculations, the result is given in the form of a table with calculated ranges and visualized as projections of a three-dimensional wire model of a wheel and a rangefinder beam. Visualization of the numerical modeling process is important to avoid misinterpretation of the calculation results and to verify compliance with the physical meaning of the numerical data obtained during modeling. Comparison of graphs shows the convergence of the results and sufficient accuracy of numerical models and techniques that can be used in the future to plan full-scale tests of the designed techniques and equipment for dimensional control of railway car parts.

Keywords: Laser triangulation rangefinder, numerical simulation, measurement, wheelset.

Измерение параметров колесной пары в ходе эксплуатации и ремонта вагонов является важной задачей обеспечения безопасности движения. Колесная пара – это один из самых

нагруженных элементов вагона: через колесные пары и поверхности катания осуществляется механическое взаимодействие с передачей всей массы перевозимого груза и кузова на рельсы. При любой конструкции ходовых частей вагона поверхность колесной пары испытывает наиболее сильное воздействие фактора неподрессоренных масс элементов тележки. Поэтому самое первое звено, или составляющая ходовой части вагона, которое подвержено максимальному износу, – это поверхность катания и гребень колеса.

Выявление и точная регистрация в конкретный момент времени текущей геометрии и неизбежно прогрессирующего износа поверхности колес косвенно обеспечивают контроль исправности и технического состояния и других систем вагона, например: тормозной системы, деформации тележки, ошибки при сборке тележки и комплектовании колесными парами. Для контроля размеров колесных пар разработаны и успешно используются оптические системы на основе триангуляционных дальномеров [1 – 4]. Процесс измерения в них полностью автоматизирован и позволяет собирать статистические данные об интенсивности изнашивания с привязкой к номеру вагона. Технологии, которые применяются для автоматизированного контроля технического состояния, на самом деле универсальны [10] и хорошо вписываются в современные инвестиционные программы ОАО «РЖД». В частности, в программе «Цифровая железная дорога» делается упор на создание «цифровых двойников» различных объектов. Их создание определяется возможностью переноса сложных технологических производственных процессов, которые выполняются во время наблюдений за состоянием реальных объектов, в компьютерную среду, где сначала формируется информационная трехмерная модель идеального объекта, которая затем корректируется по данным объективного контроля. В условиях проектирования, строительства и эксплуатации реальных объектов при внесении в них изменений важными являются требования точности, скорости и эффективности. Эти требования удовлетворяются при помощи систем лазерного бесконтактного измерения.

Когда появляется технологическая возможность быстро вносить коррективы в свойства цифрового двойника, «точечная» регистрация данных об измерениях колес из нескольких пунктов контроля превращается в динамично меняющуюся картину. Данные по пути следования вагона сохраняются в одной базе данных с привязкой к номеру вагона, и становится возможным анализ «динамики» износа через регистрацию изменений в геометрических размерах и форме вагонных узлов и деталей. Это открывает перспективы для анализа поведения и динамики изменения технического состояния вагона в зависимости от условий эксплуатации и состояния инфраструктуры железной дороги. Становится возможным оценивать и сравнивать реальные эксплуатационные характеристики различных моделей и партий вагонов, зависимость стоимости жизненного цикла конкретного вагона от вариантов комплектации, начальной геометрии и других свойств нового вагона, истории технического обслуживания и других важных зависимостей, которые недоступны для изучения без точной регистрации и сбора данных об изменении свойств отдельных деталей вагона в процессе их износа.

При анализе публикаций по теме бесконтактных измерений замечено, что упор в них сделан в основном на практическую сторону применения измерительных установок. Происходит обсуждение результатов реального применения таких систем. Иногда работу бесконтактных систем проверяют другими автоматизированными средствами размерного контроля. При этом не делается попыток теоретического осмысления происходящих в ходе измерения процессов. Хотя на сложность отладки процесса указывает тот факт, что от начала разработки и внедрения, например, системы «Комплекс» до получения устойчивых показателей в реальных условиях эксплуатации прошли годы, в ходе которых потребовалось разработать специально под эту конкретную задачу свой дальномер. Часто публикации касаются только схмотехнических аспектов разработанных установок, обсуждается только состав применяемых модулей. Этого недостаточно для научного осмысления ценности и особенностей работы таких измерительных систем. Поэтому изучение процесса работы бесконтактных автоматизированных систем контроля технического состояния, в том числе и с применением цифровых технологий и натурных экспериментов в лабораторных условиях, является актуальным.

Целью данной работы является отработка алгоритмов и программного обеспечения для проведения моделирования процесса измерения геометрических параметров колесной пары при помощи системы лазерных дальномеров. Для верификации полученных результатов расчетные данные сравниваются с результатами натурного исследования с использованием реального дальномера.

Опыт по отработке процесса регистрации данных бесконтактных измерений проводился в лабораторных условиях при наличии отрезка пути длиной 6 м, на котором установлена грузовая тележка модели 18-9855. Особенностью способа установки рельсов под тележкой является небольшое количество опорных площадок. Для оценки воздействия веса тележки на рельсы, установленные таким способом, было измерено расстояние от нижней поверхности подошвы рельса в месте максимального удаления от соседних опор в полностью разгруженном и максимально нагруженном состоянии. Прогиб рельса составил не более 1,5 мм, что позволяет сделать вывод о незначительном влиянии податливости пути на результат измерений расстояния до поверхности катания колеса. Была исследована поверхность основания, на котором установлены рельсы. С помощью лазерного уровня и дальномера составлена карта относительных высот поверхности основания относительно базовой точки. Кроме этого измерены разница высот головок рельсов и изменение параметров колеи в нескольких характерных точках. Отклонение ширины колеи составило не более 1 мм в крайних точках отрезка пути. Разница между высотами крайних точек области размещения путей тележки составила менее 8 мм, что не может вносить значительных искажений в результаты измерений.

На рисунке 1 показана схема лабораторной установки, состоящей из тележки модели 18-9855, установленной на отрезке пути, и двух датчиков, позволяющих измерять расстояние и передавать данные в цифровом виде на компьютер для записи в табличном формате. В дальнейшем как в натурных измерениях, так и в вычислительном эксперименте принимается допущение об отсутствии погрешностей установки и расположения колесных пар и тележки на отрезке пути, так как в данной работе поставлена цель в первую очередь отработать информационную технологию сопоставления результатов натурных измерений и численных расчетов.

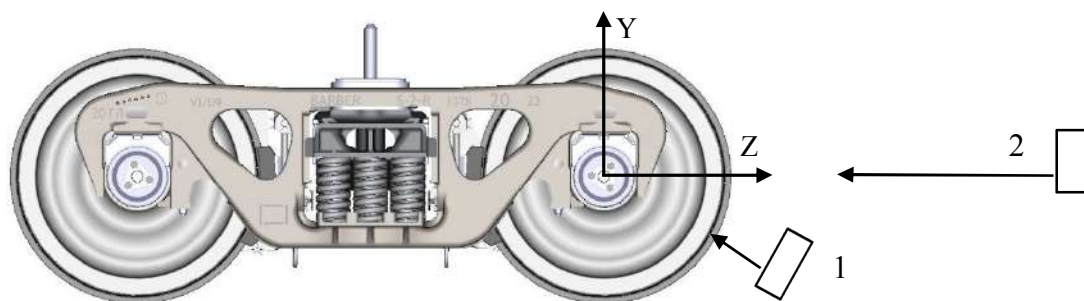


Рисунок 1 – Схема установки лазерных дальномеров относительно тележки вагона: 1 – наклонный дальномер для сканирования поверхности катания (основной); 2 – горизонтальный дальномер, установленный параллельно осям системы координат в точку контроля диаметра колеса

Для подготовки натурного испытания лазерного дальномера использовались металлические линейки и цифровой инклинометр ADA ProDigit RUMB. Для измерения диаметра колес по кругу катания применялись скоба ДК и лазерный уровень на штативе. На рисунке 2 показана схема установки двух дальномеров. В ходе испытания в качестве основных датчиков использованы два лазерных триангуляционных дальномера LS5. Дальномер 1 использовался для измерения расстояния до поверхности катания колесной пары, а дальномер 2 – для измерения пути, пройденного колесной парой относительно первого неподвижного дальномера в ходе измерений. Дальномер 1 выставлялся по инклинометру относительно горизонтальной плоскости. Относительно осей Z и X в горизонтальной плоскости угол 45° выставлялся по линейкам.

При проведении натурных испытаний и численного моделирования была принята система координат с нулевой точкой отчета, через которую проходят ось колесной пары и перпендикулярная ей плоскость внутренней вертикальной поверхности колеса. Таким образом, ось X

направлена от внешней стороны тележки внутрь, ось Y направлена вверх, а ось Z – от тележки к месту наблюдения, направление движения тележки предполагается от наблюдателя. Дальномер, таким образом, измеряет расстояние от датчика до удаляющегося левого колеса по отношению к наблюдателю. Основной дальномер был размещен под углом 45° к вертикальной оси координат Y и под углом 45° к осям координат OX и OY в плоскости ZX (см. рисунок 2). При таком расположении направляющий вектор луча дальномера в пространстве будет иметь координаты $(\cos(45^\circ); 1; -\cos(45^\circ))$. В ходе подготовки натурных испытаний с учетом формы и размеров корпуса дальномера и особенностей его крепления удалось установить, что начальная точка источника лазерного излучения находится на удалении $(-255; -415,5; 527)$ мм по соответствующим осям от нулевой точки системы отсчета, что было принято за исходные данные для численного моделирования.

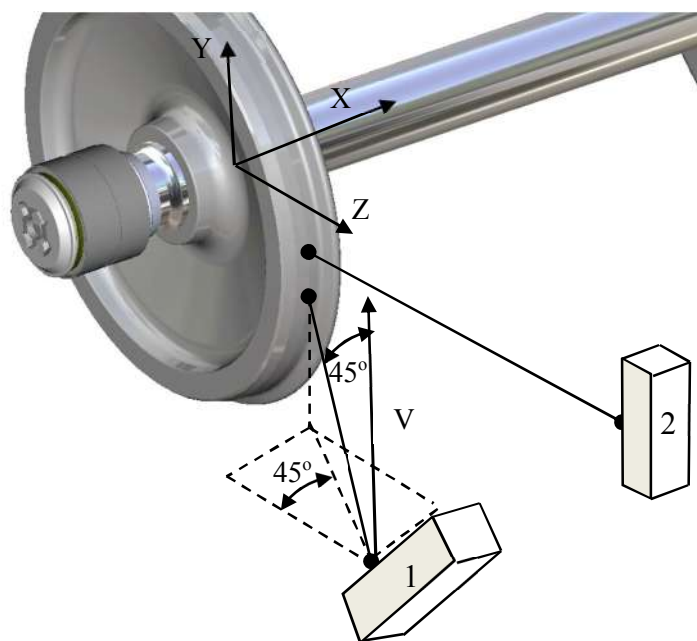


Рисунок 2 – Схема установки дальномеров: 1 – наклонный дальномер установлен по инклинометру относительно горизонтальной плоскости и вертикали V под углом 45° ; 2 – дальномер для контроля перемещения колеса в ходе измерений

Для ускорения расчетов модель обода колеса была ограничена сектором с раствором 90° части поверхности вращения, обращенным внешней стороной в сторону дальномера. Моделирование производилось при помощи компьютерной программы, написанной в среде разработки приложений Delphi 7. При экспорте геометрических данных модели поверхности катания была использована библиотека экспорта геометрических данных для графической САПР «Компас» [5]. Исследования, проводимые авторами ранее [6] с непосредственным использованием трехмерных моделей и встроенных механизмов исследования трехмерных объектов, а также механизмов экспорта геометрических данных с применением указанной программы, не установили надежных и приемлемых по удобству, точности и качеству способов для имитационного моделирования. Поэтому потребовалась разработка собственной компьютерной программы.

Упрощенная модель колеса (или цифровой двойник) была аппроксимирована при помощи 475200 точек, принадлежащих стандартной поверхности катания. Это позволило обеспечить погрешность определения координат пересечения луча дальномера с криволинейной поверхностью на уровне не более 0,2 мм в продольном направлении и 0,25 мм в поперечном направлении поверхности, являющейся следом вращения образующей. Обеспеченная таким образом погрешность расчетов достаточна для сравнения с натурными данными. Погрешность измерений лазерных датчиков составляет для наклонного дальномера 0,6 мм, а для дальномера регистрации пройденного колесной парой расстояния – 1,5 мм по дальности. Таким образом,

ожидаемая точность результатов моделирования на начальном этапе в несколько раз превышает точность, которую могут обеспечить реальные средства измерения. При построении геометрической модели предполагается равенство диаметров левого и правого колес и стандартный профиль обода в соответствии с ГОСТ 10791–2011 «Колеса цельнокатаные». Профиль поверхности колеса аппроксимирован при помощи 264 точек, лежащих на кривой линии его сечения.

Рисунок 3 синтезирован в программе и иллюстрирует геометрический смысл численного моделирования процесса применения оптической технологии для контроля параметров колеса. Неподвижно установленный дальномер своим лучом как бы разрезает движущееся колесо наискосок, так как относительно колеса в момент прохода тележки лучи прибора расположены на наклонной плоскости, параллельной оси OZ . На рисунке 3 поверхность катания показана «проволочной» моделью, где к кругам следов вращения крайних точек внешнего профиля колеса относительно оси OX «приклеены» экземпляры образующей криволинейной линии поверхности вращения (профиль поверхности катания колеса).

В ходе моделирования процесса измерения для ускорения операций обработки массивов данных было заменено реальное движение колесной пары относительно неподвижного датчика на движение «виртуального» датчика в трехмерном пространстве относительно неподвижной геометрической модели обода колеса. На рисунке 3 (вид А) следы от движения точки M_0 источника излучения нужно отсчитывать слева направо.

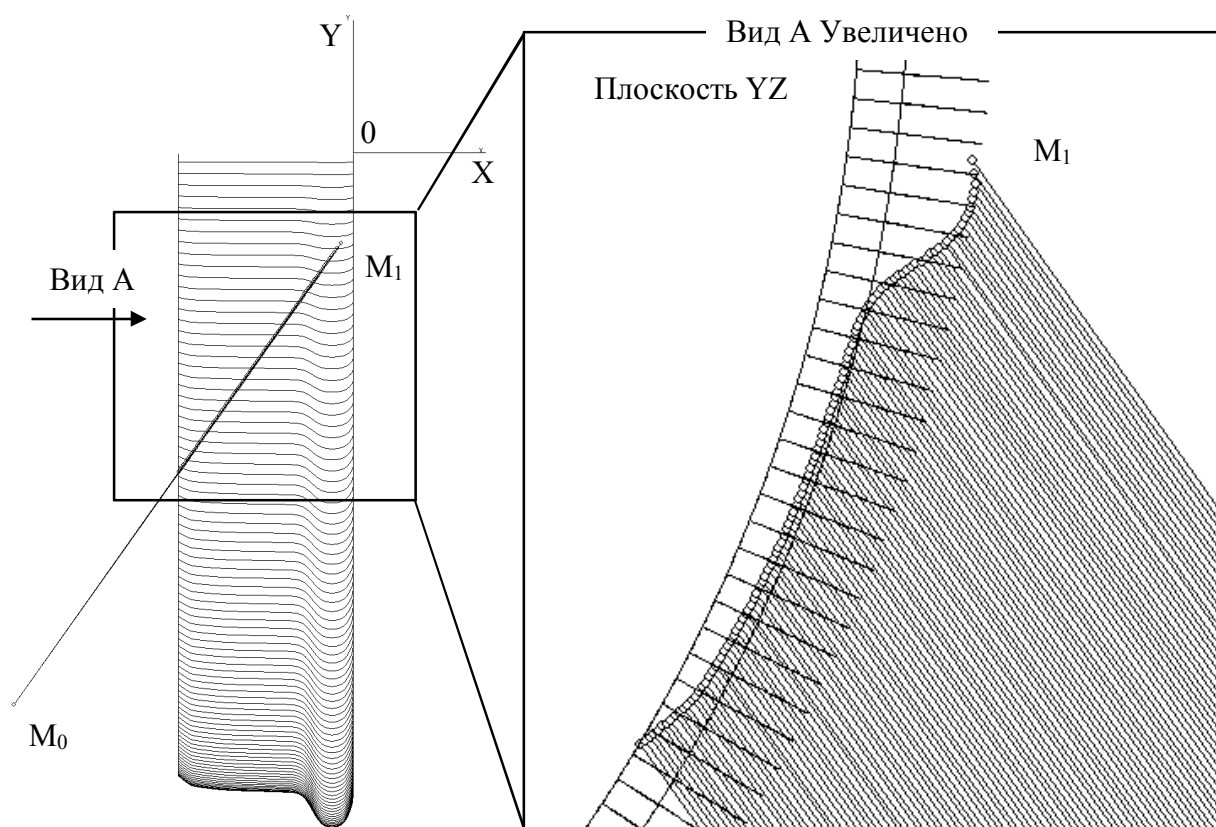


Рисунок 3 – Визуализация пространственной геометрической модели поверхности катания колеса и положения найденных в ходе моделирования точек пересечения движущегося измерительного луча с поверхностью:

M_0 – точка источника излучения дальномера; M_1 – точка падения луча. Движение источника излучения в пространстве задавалось параллельно оси Z в положительном направлении с шагом 2 мм

Процесс исследования «цифрового двойника» поверхности колесной пары состоит из нескольких этапов. Сначала загружаются геометрические данные, полученные при помощи двумерной части САПР «Компас», которая позволяет с высокой точностью создавать и исследовать положение двумерных примитивов, из которых состоит стандартный профиль поверхно-

сти катания. Данные извлекаются при помощи универсальной библиотеки [5]. Затем цифровые данные обрабатываются в программе для моделирования, где можно задать диаметр колеса, соответствующий реальному объекту. В данном случае диаметр равен 961 мм (получен ручным измерением). После этого из двумерного контура, расположив его в трехмерном пространстве в плоскости OXY , при помощи применения операции вращения в пространстве относительно оси OX получаем поле точек, принадлежащих поверхности катания. Массив пространственных точек получается структурированным, что в дальнейшем позволит разработать алгоритмы оптимизации для ускорения процесса моделирования. Далее, применяя элементарные [7] операции с векторами в пространстве, находим точки пересечения аппроксимированной поверхности и прямой линии, соответствующей в модели лазерному лучу дальномера. После вычисления расстояния между исходной точкой (источником излучения) и точкой пересечения с поверхностью результат записывается в массив-таблицу и сохраняется в файле. Затем точка источника излучения переносится на нужный шаг и процесс расчета повторяется циклично до достижения нужного расстояния перемещения источника излучения. Данные натурного испытания и виртуального эксперимента затем можно сравнить в форме графика зависимости, показанной на рисунке 4.

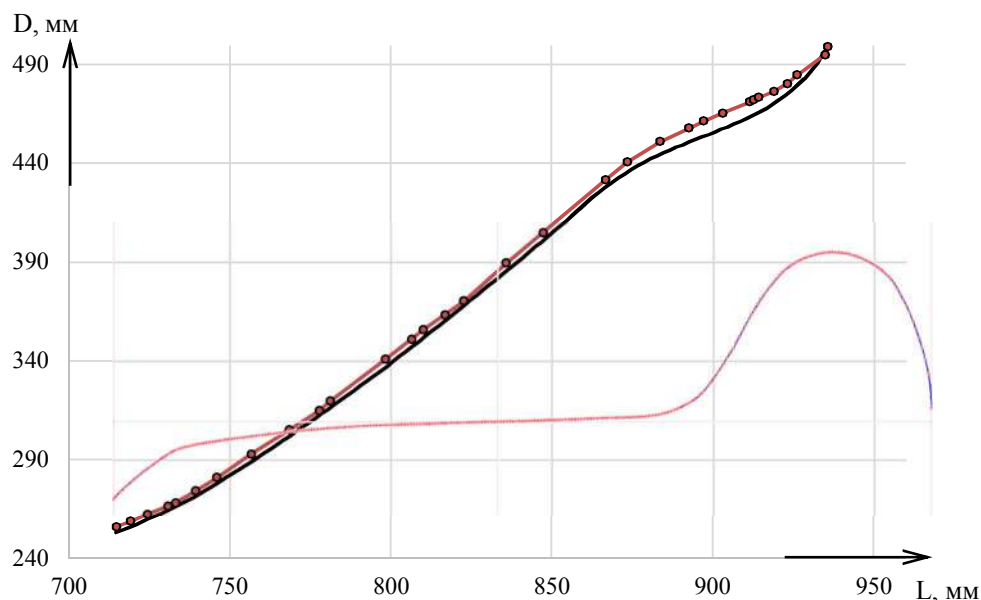


Рисунок 4 – Результат измеренной дальности от датчика до поверхности катания по результатам моделирования (сплошная линия) и натурным испытаниям (линия с точками). Для примерной оценки соответствия расчетных и измеренных дальностей положению падающего луча лазера на поверхности объекта на график наложено изображение стандартного профиля поверхности катания колеса

«Виртуальный датчик» за один шаг моделирования перемещался на 2 мм из точки M_0 с пространственными координатами $(-255; -415,5; 527)$ в положительном направлении оси Z . Смоделировано 110 шагов измерения расстояния от дальномера до поверхности катания. Расчеты проводились с использованием чисел с плавающей точкой двойной точности длиной 8 байт. Сравнение производилось с 32 точками, полученными в натурном испытании. Отсутствие механизации и автоматизации процесса натурных измерений и влияние на этот процесс веса тележки в сборе обусловили неравномерность интервала измерений по пути движения объекта относительно неподвижных датчиков.

Сравнение результатов моделирования с данными, полученными с использованием реального дальномера (см. рисунок 4), показывает хорошее соответствие, особенно заметное в области первых двух третей поверхности катания. Параметр L на графике (см. рисунок 4) соответствует зарегистрированной дальности от неподвижного датчика до поверхности катания в

месте измерения диаметра колеса (70 мм от внутренней грани), по которому можно регистрировать пройденный тележкой путь в направлении от датчика в ходе натурного испытания. К этому же расстоянию приведен путь движения источника излучения (точка M_0) в ходе численного моделирования. Параметр D на рисунке 4 соответствует зарегистрированному расстоянию от наклонного дальномера в ходе натурального и виртуального испытаний. Разницу в расчетной и экспериментальной дальности пришлось минимизировать, так как наличными средствами оказалось невозможно точно измерить реальные координаты источника лазерного излучения дальномера. В дальнейших исследованиях планируется увеличить точность определения пространственного положения дальномера при натуральных испытаниях путем конструирования механизированной установки на основе модулей линейного перемещения.

Отличия в дальности D на сравнительной диаграмме проявляются в области перехода конуса поверхности катания в гребень. Эти отличия нивелируются к вершине гребня. Причиной значимого отличия могут являться особенности обработки оптического сигнала самим датчиком при появлении переотражений лазерного луча от наклонной поверхности объекта. Кроме этого реальный профиль колеса несколько отличается от стандартного. В области перехода поверхности катания в гребень у реального колеса наблюдается провал, совпадающий по своему месту расположения с местом наибольших отличий на рисунке 4.

На рисунке 5 приведен график, представляющий абсолютную погрешность расчетных значений дальности и показаний реального дальномера. Для получения такого графика пришлось разработать специальную подпрограмму, использующую в своей работе механизм линейной интерполяции для получения промежуточных значений дальности в промежутках между точками опытных данных, так как расчетные данные получены с равномерным шагом по оси абсцисс, а опытные получены с произвольным шагом. Подпрограмма позволяет сравнивать два графика и подсчитывать суммарные различия двух рядов данных. Эта функциональность использовалась при построении итоговой зависимости погрешности по ходу движения колеса, так как суммарная погрешность минимизировалась путем варьирования возможной ошибки взаимного позиционирования реального и виртуального дальномеров по оси измерительного луча. Как видно из графика на рисунке 5, максимальные отклонения расчетных и натуральных данных наблюдаются в области перехода профиля конусной части составной поверхности (в области расположения круга катания) в гребень и на вершине гребня.

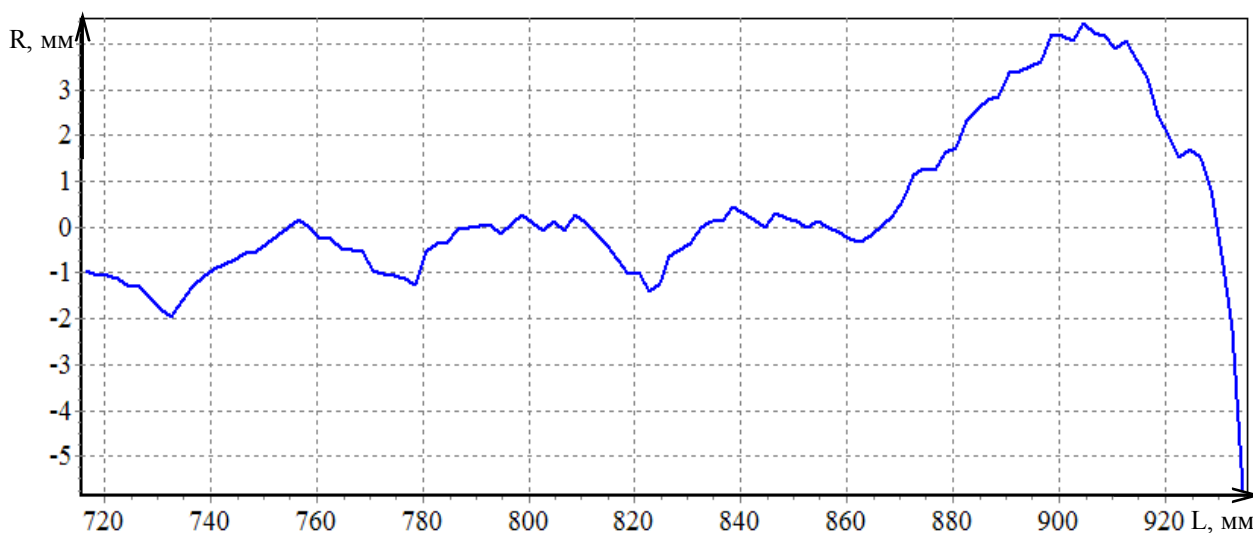


Рисунок 5 – Функция абсолютной погрешности R расчетной дальности и дальности по натурным измерениям в зависимости от хода колесной пары вдоль оси Z

Анализ графика абсолютной погрешности на первый взгляд не внушает оптимизма. Однако на получение такого результата повлияло множество факторов, которые должны быть учтены в последующих исследованиях. Первый фактор – это отличие реального профиля колеса от стандартного. Колесная пара, установленная в лаборатории, является новой, поэтому

для нее был принят стандартный профиль. Второй фактор – неверная оценка расположения реального дальномера относительно колеса, так как элементы кронштейна, на который установлен реальный дальномер, препятствуют использованию наличных средств измерений (линейка), а универсальная координатно-измерительная машина, которая могла бы помочь в определении положения реальных объектов в трехмерном пространстве, недоступна. Третий фактор – это погрешность расположения колесной пары и самой тележки относительно осей в принятой системе координат. Следует сказать, что объект измерения имеет некоторые особенности. Реальная тележка собрана с использованием боковых рам с разницей баз, выходящей за пределы допустимой согласно эксплуатационным документам. Головки левого и правого рельсов Р65, на которых установлена тележка, расположены на разном уровне, так как один является новым, а другой – бывшим в употреблении с изношенной головкой. Таким образом, угловое положение реальной оси колесной пары может иметь значительные отличия от идеализированной модели. Четвертый фактор – это неизвестные особенности дальномера. На некоторые такие особенности указывают места на графике погрешности, совпадающие с максимальным наклоном профиля в области гребня. На графике (см. рисунок 5) просматриваются также паттерны в виде арки, повторяющиеся с периодом примерно 40 мм в области основной поверхности катания, которые могут говорить об особенностях обработки сигнала микропроцессором дальномера.

Таким образом, при сравнении результатов натурного испытания и результатов моделирования видно, что разработанные алгоритмические модели и использованный способ вычисления расстояний позволяют с достаточной достоверностью применять их для отработки технологии бесконтактных измерений размеров и формы деталей подвижного состава. Виртуальные эксперименты позволяют с большой скоростью и точностью разрабатывать средства для лазерного бесконтактного контроля ходовой части инновационных вагонов, оборудованных тележками 18-9855 и 18-9810. Скорейшее внедрение новых систем для автоматизированного контроля технического состояния актуально, так как тележки указанных типов изготовлены с более жесткими относительно старых моделей допусками на размеры и требуют более точных измерений при контроле их характеристик. С помощью оптических дальнометров можно обеспечить быстрый и эффективный контроль технического состояния при прохождении плановых и внеплановых видов ремонта грузовых вагонов. По опыту применения существующих систем можно утверждать, что с их применением можно контролировать толщину и ширину обода отдельного колеса, толщину гребня, величину равномерного проката, диаметр колеса по кругу катания, можно оценивать состояние не только отдельных колес, но и относительные характеристики, такие как расстояние между ободами колес в колесной паре, разницу диаметров колес в одной паре, в составе тележки и вагона, контролировать углы набегания колес на рельс. С некоторой вероятностью можно выявлять ползуны, выщербины и другие локализованные повреждения колес. Кроме того, можно контролировать параметры тележек: выявлять перекосы рам тележек, измерять высоту плоскости подпятника, его горизонтальность, высоту опорных поверхностей скользунов надрессорных балок тележек и другие отклонения параметров, влияющие на безопасность перевозок грузов и пассажиров по железной дороге. Дополнение трудоемкого и длительного этапа натурных испытаний для подбора характеристик оптических датчиков автоматизированным процессом численного моделирования ускорит внедрение цифровых технологий диагностирования технического состояния вагона и реализацию на железнодорожном транспорте программы «Цифровая железная дорога».

Список литературы

1. Комиссаров, А. В. Автоматизированный диагностический комплекс для измерения геометрических параметров колесных пар / А. В. Комиссаров, К. В. Григорьев. – Текст : непосредственный // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2011. – № 3. – С. 14–15.

2. Лазерные триангуляционные датчики положения в промышленных системах контроля и диагностики / А. Н. Байбаков, В. И. Ладыгин [и др.]. – Текст : непосредственный // Автотрибуна. – 2004. – Т. 40. – № 2. – С. 105–113.
3. Лазерный диагностический комплекс для контроля колесных пар вагонов на ходу поезда / С. В. Плотников, А. Н. Байбаков [и др.]. – Текст : непосредственный // Гео-Сибирь. – Новосибирск. – 2005. – Т. 6. – С. 64–70.
4. Современное состояние и перспективы развития измерительно-диагностических систем на железнодорожном транспорте / А. З. Венедиктов, О. В. Пальчик [и др.]. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2005. – № 4. – С. 18–27.
5. Лексутов, И. С. Свидетельство № 50200801323 об отраслевой регистрации разработки «Модуль экспорта геометрических данных». – Москва : ВНИИ, 2008. – Текст : непосредственный.
6. Лексутов, И. С. Использование графического ядра конструкторской САПР для моделирования процесса контроля технического состояния вагона / И. С. Лексутов, В. П. Ключа. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 76–80.
7. Ефимов, Н. В. Краткий курс аналитической геометрии : учебник / Н. В. Ефимов. – Москва : Наука, 1975. – 272 с. – Текст : непосредственный.
8. Дистанционный размерный контроль колес в движущемся железнодорожном составе / А. Н. Байбаков, К. И. Кучинский [и др.]. – Текст : электронный // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11191> (дата обращения: 09.12.2021).
9. Буйносов, А. П. Методы автоматизированного измерения параметров колесных пар при движении электропоезда / А. П. Буйносов, А. М. Кислицын. – Текст : непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 6. – С. 174–177.
10. Алтынцев, М. А. Создание метрической имитационной модели «цифрового двойника» активным методом дистанционного зондирования земли / М. А. Алтынцев, П. А. Карпик. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – № 4. – С. 58–67.

References

1. Komissarov A. V., Grigoriev K. V. Automated diagnostic complex for measuring geometrical parameters of wheel sets [Avtomatizirovannyi diagnosticheskiy kompleks dlya izmereniya geometricheskikh parametrov kolesnykh par]. *Vagony i vagonnoe khoziaistvo – Wagons and wagon facilities*, 2011, no. 3, pp. 14 – 15.
2. Baibakov A. N., Baibakov A. N., Ladygin V. I., et al. *Lazernyye triangulyatsionnyye datchiki polozheniya v promyshlennykh sistemakh kontrolya i diagnostiki* (Laser triangulation position sensors in industrial control and diagnostic systems). *Avtometriia – Avtometriya*, 2004, vol. 40, no. 2, pp. 105 – 113.
3. Plotnikov S. V., Baibakov A. N. and others. Laser diagnostic complex for monitoring wheelset pairs of cars on the move of the train [Lazernyy diagnosticheskiy kompleks dlya kontrolya kolesnykh par vagonov na khodu poyezda]. *Geo-Sibir' – Geo-Siberia*, 2005, vol. 6, pp. 64 – 70.
4. Venediktov A. Z., Palchik O. V., et al. Current state and prospects for the development of measuring and diagnostic systems in railway transport [Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya izmeritelno-diagnosticheskikh sistem na zheleznodorozhnom transporte]. *Nauka i tekhnika transporta – Science and technology of transport*, 2005, no. 4, pp. 18 – 27.
5. Leksutov I. S. *Svidetel'stvo № 50200801323 ob otraslevoi registratsii razrabotki «Modul' eksporta geometricheskikh dannyykh»* (Certificate No. 50200801323 on the branch registration of the computer program «Geometric data export module»). Moscow: VNTITs Publ., 2008.

6. Leksutov I. S., Klyuka V. P. Using the graphic core of a design CAD for modeling the process of monitoring the technical condition of a car [Ispol'zovanie graficheskogo iadra konstruktorskoj SAPR dlia modelirovaniia protsessa kontrolya tekhnicheskogo sostoianiia vagona]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoi konferentsii* (Innovative projects and technologies in education, industry and transport: materials of a scientific conference). – Omsk, 2019, pp. 76 – 80.

7. Efimov N. V. *Kratky kurs analiticheskoy geometrii* (Short course of analytical geometry). Moscow: Nauka Publ., 1975, 272 p.

8. Baybakov A. N., Kuchinsky K. I., Plotnikov S. V., Sotnikov V. V., Chugui Yu. V. Remote dimensional control of wheels in a moving train [Dstantsionnyy razmernyy kontrol' koles v dvizhushchemsya zheleznodorozhnom sostave]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia – Modern problems of science and education*, 2013, no. 6. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11191> (accessed 09 December 2021).

9. Buinosov A. P., Kislitsyn A. M. Methods of automated measurement of the parameters of wheel pairs during the movement of an electric locomotive [Metody avtomatizirovannogo izmereniya parametrov kolesnykh par pri dvizhenii elektrovoza]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia – Scientific and technical bulletin of the Volga region*, 2013, no. 6, pp. 174 – 177.

10. Altyntsev M. A., Karpik P. A. Creation of a metric simulation model of a «digital twin» by the active method of remote sensing of the earth [Sozdaniye metricheskoy imitatsionnoy modeli «tsifrovogo dvoynika» aktivnym metodom dstantsionnogo zondirovaniya zemli]. *Vestnik SGUGiT – Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 58 – 67.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лексутов Илья Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-22-84.

E-mail: Leksutov@mail.ru

Клюка Владислав Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-22-84.

E-mail: vklyuka@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лексутов, И. С. Исследование процесса бесконтактного измерения геометрических параметров поверхности катания колесной пары вагона при плановых видах ремонта / И. С. Лексутов, В. П. Клюка. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 29 – 38.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leksutov Ilya Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railway cars and railway car facilities», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-22-84.

E-mail: Leksutov@mail.ru

Kluka Vladislav Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Docent, head of the department «Railway cars and railway car facilities», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-22-84.

E-mail: vklyuka@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Leksutov I. S., Kluka V. P. Investigation of the process of contactless measurement of the geometric parameters of the rolling surface of the wheelset of a wagon during planned types of repair. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 4 (48), pp. 29 – 38 (In Russian).

Д. А. Соколов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

МЕТОДИКА ВЫБОРА КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация. В работе рассматривается система тягового электроснабжения напряжением 27,5 кВ переменного тока. В программной среде MATLAB-Simulink разработана расчетная модель, учитывающая параметры системы внешнего электроснабжения, график движения поездов и токопотребление электротяговой нагрузки на межподстанционной зоне. Показано, что при выборе мощности компенсирующего устройства по среднему значению реактивной мощности, потребляемой одним поездом, прохождение его по межподстанционной зоне с постоянным значением потребляемого тока вызывает в проводах контактной сети такие же средние потери мощности, что и при отсутствии компенсирующего устройства. Увеличение числа поездов, одновременно находящихся на межподстанционной зоне при прежней мощности компенсирующего устройства, влечет за собой снижение потерь мощности в проводах контактной сети относительно аналогичной ситуации без компенсирующего устройства, однако реактивная мощность при этом компенсируется лишь частично. В расчетах компенсирующих устройств предлагается учитывать реальный существующий график движения поездов, на основе вероятностной оценки которого определяется среднесуточная реактивная мощность, потребляемая электроподвижным составом. При этом необходимо учитывать потери мощности в контактной сети. Применение нерегулируемых компенсирующих устройств целесообразно на участках с постоянно присутствующей нагрузкой. При выборе ступенчатых устройств поперечной емкостной компенсации предложено рассчитывать их мощность на основании вероятностного анализа графика движения поездов и токопотребления на межподстанционной зоне. При вероятности появления определенного количества поездов, превышающей 50 %, наиболее эффективными оказываются компенсирующие устройства, мощность которых выбрана на основе среднестатистического потребления мощности всеми поездами без учета времени отсутствия нагрузки на межподстанционной зоне, а также двухступенчатые устройства, мощность первой ступени которых выбрана по токопотреблению двух наиболее вероятных случаев появления числа поездов.

Ключевые слова: тяговое электроснабжение, компенсация реактивной мощности, поперечная емкостная компенсация, выбор компенсирующих устройств, энергоэффективность.

Denis A. Sokolov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Saint Petersburg, the Russian Federation

METHODOLOGY OF SELECTING COMPENSATING DEVICES IN THE AC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Abstract. The paper considers a traction power supply system with a voltage of 27,5 kV AC. In the MATLAB-Simulink software environment, a calculation model has been developed that takes into account the parameters of the external power supply system, the train schedule and the current consumption of the electric traction load in the inter-substation zone. It is shown that when choosing the power of the compensating device according to the average value of the reactive power consumed by one train, its passage through the inter-substation zone with direct current causes the same average power losses in the wires of the catenary as in the absence of a compensating device. An increase in the number of trains simultaneously located in the inter-substation zone with the same power of the compensating device entails a decrease in power losses in the wires of the catenary relative to a similar situation without a compensating device, however, the reactive power is only partially compensated. In the calculations of compensating devices, it is proposed to take into account the real existing train schedule, based on the probabilistic assessment of which the average daily reactive power consumed by the electric rolling stock is determined. In this case, it is necessary to take into account the power losses in the catenary. The use of unregulated compensating devices is advisable in areas with a constantly present load. When choosing step devices for transverse capacitive compensation, it is proposed to calculate their power based on a probabilistic analysis of the train traffic schedule and current consumption in the inter-substation zone. When the probability of the appearance of a certain number of trains exceeding 50%, the most effective are compensating devices, the power of which is selected on the basis of the average power consumption of all trains without taking into account the time of no load in the inter-substation zone, as well as two-stage devices, the power of the first stage of which is selected according to the current consumption of the two most likely occurrences of the number of trains.

Keywords: traction power supply, reactive power compensation, transverse capacitive compensation, selection of compensating devices, energy efficiency.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В настоящее время на полигоне железных дорог России применяются компенсирующие устройства, основной целью использования которых является повышение уровня и качества напряжения, а также снижение потребления реактивной мощности [1]. При этом существующая Методика выбора мест размещения и мощности средств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности [2] предполагает расчет мощности компенсирующих устройств, устанавливаемых на посту секционирования в системе тягового электроснабжения напряжением 27,5 кВ переменного тока исходя из обеспечения минимального допустимого уровня напряжения на токоприемнике подвижного состава.

В качестве примера рассмотрим однопутный участок железной дороги, электрифицированной на переменном токе, длиной $L = 50$ км с компенсирующим устройством, расположенным в середине межподстанционной зоны [3 – 5]. Удельное активное сопротивление контактной подвески $r_0 = 0,1$ Ом/км. Примем, что поезда на данном участке потребляют ток постоянного значения $I_n = 100$ А с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,8$, тогда $\sin \varphi = 0,6$. Исходя из условия, что емкость компенсирующего устройства выбрана по среднему индуктивному току поезда $I_{\text{пи}}$, получим ток компенсирующего устройства $I_{\text{ку}} = I_{\text{пи}} = 60$ А, при этом активный ток поезда $I_{\text{па}} = 80$ А. На рисунке 1 представлена расчетная схема, иллюстрирующая токораспределение при прохождении одного поезда по рассматриваемой межподстанционной зоне.

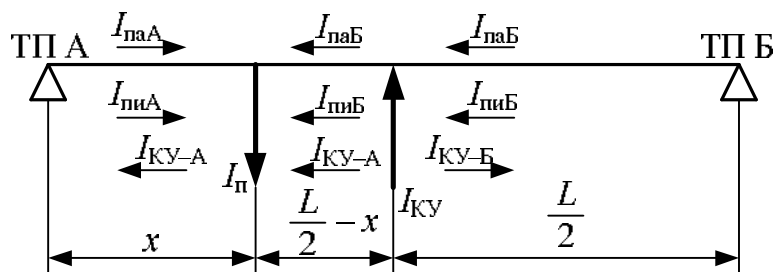


Рисунок 1 – Схема рассматриваемого участка.

По общепринятым формулам произведен расчет потерь мощности в проводах контактной сети, по результатам которого построены графики (рисунок 2) изменения потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении одного поезда по межподстанционной зоне с компенсирующим устройством ($\Delta P_{\text{КУ}}$, кривая 1) и без него (ΔP_0 , кривая 2).

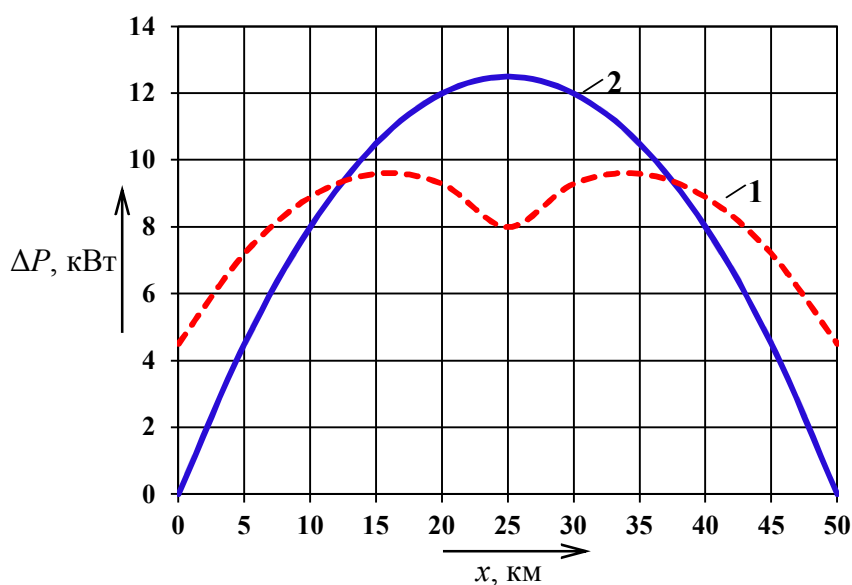


Рисунок 2 – Распределение потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении по межподстанционной зоне одного поезда

Интегрирование полученных результатов приводит к следующим средним значениям потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении по межподстанционной зоне одного поезда: при отсутствии компенсирующего устройства $\Delta P_{0\text{ ср}(1)} = 8,33$ кВт, при его наличии $\Delta P_{\text{КУ ср}(1)} = 8,33$ кВт. Таким образом, ввиду суммирования реактивных токов на участке от поезда до компенсирующего устройства, а также значительного возрастания потерь мощности в случае установки компенсирующего устройства в начальный момент времени при появлении поезда на межподстанционной зоне эффект от применения компенсирующего устройства, мощность которого выбрана по средней реактивной мощности, потребляемой поездами, отсутствует.

Рассмотрим случай прохождения по рассматриваемому участку двух следующих друг за другом на расстоянии 5 км поездов при условии, что мощность компенсирующего устройства по-прежнему выбрана по среднему индуктивному току одного поезда. Графики изменения потерь мощности в проводах контактной сети при отсутствии компенсирующего устройства (ΔP_0) и наличии такового ($\Delta P_{\text{КУ}}$) представлены на рисунке 3 (кривые 2 и 1 соответственно).

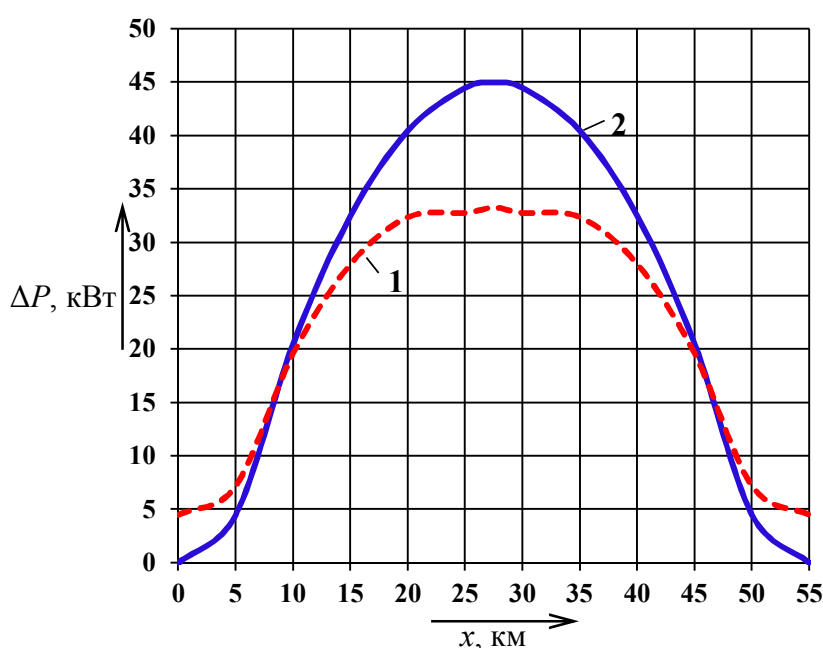


Рисунок 3 – Распределение потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении по межподстанционной зоне двух поездов

Средние значения потерь мощности в проводах контактной сети также определяются интегрированием функций этих потерь. Результаты интегрирования таковы: при наличии компенсирующего устройства $\Delta P_{\text{КУ ср}(2)} = 21,07$ кВт, а при его отсутствии $\Delta P_{0\text{ ср}(2)} = 26,61$ кВт.

То есть при прохождении по исследуемой межподстанционной зоне двух следующих друг за другом поездов установка компенсирующего устройства, мощность которого выбрана по среднему току одного поезда, вызывает положительный эффект, выражаемый в снижении средних потерь мощности в проводах контактной сети на 5,54 кВт по отношению к потерям, возникающим при отсутствии компенсирующего устройства в аналогичной ситуации [6, 7].

Рассмотрим участок между тяговыми подстанциями Медвежья Гора и Нигозеро Октябрьской железной дороги. Данный участок характеризуется сложным рельефом и имеет протяженность 94 км. На расстоянии 40 км от тяговой подстанции Нигозеро расположен пост секционирования Новый Поселок, на котором предлагается установка компенсирующего устройства.

Тяговые подстанции Нигозеро и Медвежья Гора питаются от энергосистемы по сети напряжением 220 кВ. Сопротивления системы до шин высшего напряжения тяговых подстанций представлены в таблице 1.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Сопротивления энергосистемы на шинах 220 кВ

Подстанция	Активное сопротивление, Ом	Реактивное сопротивление, Ом
Нигозеро	1,194	6,716
Медвежья Гора	3,939	22,493

На указанных тяговых подстанциях установлены силовые понижающие трансформаторы типа ТДТНЖУ-40000/220. Активное сопротивление трансформатора, приведенное к стороне 220 кВ, составляет 0,104 Ом, реактивное – 2,361 Ом. Типы контактной подвески и рельсов на участке с указанием их удельных сопротивлений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики тяговой сети

Координаты участка, км	Тип подвески и рельсов	Удельное активное сопротивление, Ом/км	Удельное реактивное сопротивление, Ом/км
0 – 12	ПБСМ-95 + МФ-100+2А-185+4Р65	0,093	0,240
13 – 21	М-95 + МФ-100 + 2А-185 + 4Р65	0,087	0,227
22 – 37	ПБСМ-95 + МФ-100+2А-185+4Р65	0,093	0,240
38 – 79	М-95 + МФ-100 + 2А-185 + 4Р65	0,087	0,227
80 – 84	ПБСМ-95 + МФ-100+2А-185+4Р65	0,093	0,240
85 – 94	М-95 + МФ-100 + 2А-185 + 4Р65	0,087	0,227

На рассматриваемом участке преобладает грузовое движение с электровозами серии 2ЭС5К и 3ЭС5К. Среднесуточный график движения поездов представлен на рисунке 4.

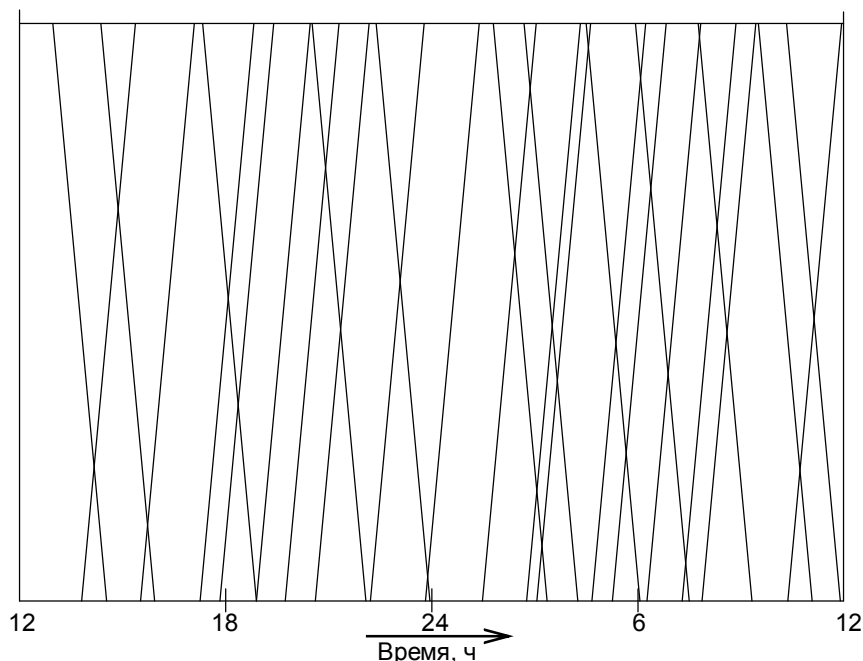


Рисунок 4 – Среднесуточный график движения поездов на рассматриваемом участке

График движения поездов на участке Нигозеро – Медвежья Гора характеризуется существенной неравномерностью. Следует отметить тот факт, что пропускная способность данного участка позволяет соблюдать интервал попутного следования не менее 19 мин. Это позволяет пропускать по участку более 70 пар поездов в сутки, что совершенно не соответствует реальным размерам движения и свидетельствует о необходимости применения в расчетах существующих участков имеющегося графика движения поездов, а не расчетного.

Токопотребление на участке Нигозеро – Медвежья Гора также характеризуется значительной неравномерностью, в связи с чем в расчетах с использованием MATLAB-Simulink применяется точное моделирование кривых токопотребления [8 – 10].

Минимальное трехминутное напряжение на токоприемнике подвижного состава при существующих размерах движения и отсутствии компенсирующего устройства составляет 18,53 кВ. Расчетная мощность нерегулируемого компенсирующего устройства на данном участке исходя из документа [2] составляет 13,37 Мвар. При этом среднесуточная реактивная мощность, потребляемая на рассматриваемом участке подвижным составом, равна 3,77 Мвар. Кроме того, максимально возможная мощность компенсирующего устройства по условию ограничения уровня напряжения до 29 кВ составляет лишь 2,26 Мвар.

Математическое ожидание мощности отключаемого нерегулируемого компенсирующего устройства исходя из средней реактивной мощности, потребляемой поездами, принимает значение 4,15 Мвар.

При выборе мощности первой ступени двухступенчатого компенсирующего устройства по средней реактивной мощности, потребляемой одним и двумя поездами, значение математического ожидания составляет 3,89 Мвар. Среднее значение суммарной реактивной мощности компенсирующего устройства при наличии на межподстанционной зоне трех поездов составляет 5,42 Мвар, отсюда мощность второй ступени – 1,53 Мвар.

Математическое ожидание мощности ступеней трехступенчатого компенсирующего устройства при наличии на межподстанционной зоне одного, двух и трех поездов составляет соответственно 2,38; 2,23 и 0,81 Мвар.

Результаты рассмотрения вариантов установки различных типов компенсирующих устройств сведены в таблицу 3 ($Q_{\text{ср}}$ – среднее значение потребляемой реактивной мощности на рассматриваемом участке; $U_{\text{мин}}$ – минимальное трехминутное значение напряжения на токоприемнике электроподвижного состава; $\Delta P_{\text{ср}}$ – средние потери мощности в проводах контактной сети).

Таблица 3 – Параметры системы тягового электроснабжения при установке различных типов компенсирующих устройств (КУ)

Параметры системы тягового электроснабжения (СТЭ)	КУ отсутствует	Нерегулируемое КУ 2,26 Мвар	Отключаемое КУ 4,15 Мвар	Двухступенчатое КУ 5,42 Мвар	Трехступенчатое КУ 5,42 Мвар
$Q_{\text{ср}}$, Мвар	3,77	3,30	3,13	3,10	3,02
$U_{\text{мин}}$, кВ	18,53	20,60	21,58	21,94	22,86
$\Delta P_{\text{ср}}$, кВт	27,61	27,54	35,64	35,46	41,40

Следует отметить, что применение нерегулируемого компенсирующего устройства, не оборудованного системой автоматического включения и отключения в зависимости от наличия поездов, ограничивает ряд факторов.

В связи со сравнительно низкой допустимой мощностью компенсирующего устройства из-за значительного повышения уровня напряжения в контактной сети эффект от применения таких устройств также ограничен. При этом при отсутствии поездов в тяговой сети продолжают протекать емкостные токи, вызывающие потери мощности, которые в лучшем случае не изменяются, а в худшем – увеличиваются.

Тем не менее применение выбранного устройства, мощность которого в 1,7 раза меньше средней реактивной мощности, потребляемой поездами, привело к снижению потребляемой реактивной мощности на 12,6 %, а вследствие низкой мощности выбранного устройства потери в контактной сети не изменились из-за малых токов, протекающих в тяговой сети при отсутствии поездов.

Применение одноступенчатого нерегулируемого компенсирующего устройства с возможностью автоматического включения и отключения в зависимости от наличия поездов позволяет выбрать его мощность в полном соответствии с реактивной мощностью, потребляемой электротяговой нагрузкой при наличии на межподстанционной зоне одного, двух или трех поездов. Уровень напряжения в контактной сети при этом остается в допустимых пределах.

В случае применения такого устройства наблюдается снижение потребления реактивной мощности на 17,1 %, однако потери мощности в контактной сети возрастают при этом на 29 %.

При установке двухступенчатого компенсирующего устройства, мощность которого выбрана в соответствии со статистически наиболее вероятной мощностью, потребляемой нагрузкой при нахождении на межподстанционной зоне одного или двух поездов, а также с мощностью дополнительной ступени, подобранной по потреблению трех поездов, потребление реактивной мощности сокращается на 17,8 %, а потери мощности в тяговой сети увеличиваются на 28,4 %, что по-прежнему составляет 0,1 % от общего потребления активной мощности. Напряжение на токоприемнике подвижного состава остается в пределах 21 – 29 кВ.

В случае же установки трехступенчатого компенсирующего устройства, мощность ступеней которого выбрана по реактивной мощности, потребляемой одним, двумя и тремя поездами соответственно, сокращение потребления реактивной мощности составляет 19,9 %, при этом потери мощности вследствие высокой мощности компенсирующего устройства при неравномерном токопотреблении тремя поездами увеличиваются на 49,9 %, что составляет уже 0,3 % от общего потребления активной мощности. По той же причине уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава также неоднократно превышает допустимые значения.

На основании проведенных исследований предлагается дополнить существующую методику [2] и проводить выбор и расчет компенсирующих устройств в следующем порядке.

1. Создание расчетной модели системы.
2. Построение среднесуточного графика движения поездов.
3. Выполнение тяговых расчетов.
4. Статистическая обработка графика движения поездов.
5. Выбор мощности рассматриваемых типов компенсирующих устройств на основе определения необходимости повышения уровня напряжения и изменения потерь мощности в контактной сети.
6. Анализ параметров системы тягового электроснабжения после установки компенсирующих устройств.
7. Оценка эффекта от установки выбранных типов компенсирующих устройств.

Выводы по результатам проведенных исследований в качестве дополнения к существующей методике расчета компенсирующих устройств могут быть сформулированы следующим образом.

1. На рассмотренном участке наиболее целесообразным является применение одно- и двухступенчатых компенсирующих устройств, ступени которых автоматически вводятся и выводятся из работы в зависимости от электротяговой нагрузки.

2. Выбор мощности компенсирующих устройств, устанавливаемых на межподстанционной зоне, по среднему току одного поезда не может являться обоснованным без расчета потерь мощности в проводах контактной сети ввиду того, что данные потери увеличиваются с установкой компенсирующих устройств, особенно если поезда ходят достаточно редко и межподстанционная зона регулярно остается без тяговой нагрузки. Вместе с тем при интенсивном движении поездов такой выбор мощности компенсирующего устройства приводит к уменьшению потерь в контактной подвеске, однако снижается эффект уменьшения потребления на железных дорогах переменного тока реактивной мощности.

3. Мощность компенсирующих устройств для существующих участков предлагается рассчитывать, используя имеющийся реальный график движения поездов, а не расчетный, с применением вероятностного анализа и учетом токопотребления.

4. При оценке технико-экономического эффекта от применения компенсирующих устройств следует учитывать потери мощности в контактной сети и определять функцию оптимума между повышением уровня напряжения и ростом потерь мощности.

Список литературы

1. Герман, Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. – 316 с. – Текст : непосредственный.
2. СТО РЖД 07.022.2–2015. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения и мощности средств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности // consultant.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=646626#eiD3RnSYLxEu7Jti> (дата обращения: 28.10.2021).
3. Agunov A. V., Varentsov V. M., Marikin A. N., Sokolov D. A. Calculation of Power Losses in a DC Traction Power-Supply System with Allowance for Train Traffic, *Russian Electrical Engineering*, 2020, no. 91 (10), pp. 617 – 619.
4. Расчеты потерь мощности в системе тягового электроснабжения постоянного тока с учетом движения поездов / А. В. Агунов, В. М. Варенцов, А. Н. Марикин, Д. А. Соколов. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2020. – № 10. – С. 27–30.
5. Соколов, Д. А. Анализ потерь мощности в контактной сети при поперечной емкостной компенсации / Д. А. Соколов, А. В. Агунов. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 4 (25). – С. 199–207.
6. Соколов, Д. А. Потери мощности в проводах контактной сети железных дорог переменного тока при установке компенсирующего устройства в середине межподстанционной зоны с учетом движения по ней поездов / Д. А. Соколов. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – № 3 (52). – С. 471–480.
7. Agunov A. V., Komissarov A. D., Seronov V. V., Stepanskaya O. A., Sokolov D. A. Analysis of power losses in catenary wires in AC electric traction power supply systems when installing a device for shunt compensation of reactive power, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, no. 1151 (12), pp. 70 – 75.
8. Агунов, А. В. Компьютерное моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока / А. В. Агунов, А. Н. Марикин, Д. А. Соколов. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 5. – С. 38–40.
9. Агунов, А. В. Моделирование систем электроснабжения / А. В. Агунов, Д. А. Соколов. – Текст : непосредственный // Электроэнергетические комплексы и системы: история, опыт, перспектива : сборник научных трудов всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Хабаровск : Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 167–170.
10. Агунов, А. В. Моделирование систем тягового электроснабжения в MATLAB-Simulink / А. В. Агунов, Д. А. Соколов. – Текст : непосредственный // Eltrans 10.0 : тезисы докладов международного симпозиума «Eltrans 10.0» : в 2 частях. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения императора Александра I, 2019. – Ч. 2. – С. 61–62.

References

1. German L. A., Serebrjakov A. S. *Reguliruyemye ustanovki emkostnoj kompensacii v sistemah tjavogovo jelectrosnabzhenija zheleznih dorog* (Regulated installations of capacitive compensation in traction power supply systems of railways). Moscow: Educational and Methodical Center for Education in Railway Transport Publ., 2015, 316 p.
2. JSCO «RZD» OS 07.022.2-2015. *Sistema tjavogovo jelectrosnabzhenija zheleznoj dorogi peremennogo toka. Metodika vybora mest razmeshhenija i moshhnosti sredstv prodol'noj i poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshhnosti* (STO RZD 07.022.2-2015. AC railway traction power supply system. Methodology for selection of locations and capacity of longitudinal and lateral compensation of reactive power), Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=646626#eiD3RnSYLxEu7Jti> (accessed 28 October 2021).

3. Agunov A. V., Varentsov V. M., Marikin A. N., Sokolov D. A. Calculation of Power Losses in a DC Traction Power-Supply System with Allowance for Train Traffic, *Russian Electrical Engineering*, 2020, no. 91 (10), pp. 617 – 619.

4. Agunov A. V., Varentsov V. M., Marikin A. N., Sokolov D. A. Calculations of power losses in the DC traction power supply system taking into account the movement of trains [Raschety poter' moshhnosti v sisteme t'jagovogo jelektrснабzhenija postojannogo toka s uchetoм dvizhenija poezdov]. *Jelektrotehnika – Electrical engineering*, 2020, no. 10, pp. 27 – 30.

5. Sokolov D. A., Agunov A. V. Calculations of power losses in the DC traction power supply system taking into account the movement of trains [Analiz poter' moshhnosti v kontaktnoj seti pri poperechnoj emkostnoj kompensacii]. *Bjulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij – Bulletin of scientific research results*, 2017, no. 4 (25), pp. 199 – 207.

6. Sokolov D. A. Calculations of power losses in the DC traction power supply system taking into account the movement of trains [Poteri moshhnosti v provodah kontaktnoj seti zheleznyh dorog peremennogo toka pri ustanovke kompensirujushhego ustrojstva v seredine mezhpodstancionnoj zony s uchetoм dvizhenija po nej poezdov]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2017, no. 3 (52), pp. 471 – 480.

7. Agunov A. V., Komissarov A. D., Seronov V. V., Stepanskaya O. A., Sokolov D. A. Analysis of power losses in catenary wires in AC electric traction power supply systems when installing a device for shunt compensation of reactive power, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, no. 1151 (12), pp. 70 – 75.

8. Agunov A. V., Marikin A. N., Sokolov D. A. Computer modeling of the AC traction power supply system [Komp'juternoe modelirovanie sistemy t'jagovogo jelektrснабzhenija peremennogo toka]. *Jelektronika i jelektooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2019, no. 5, pp. 38 – 40.

9. Agunov A. V., Sokolov D. A. Power supply system's modeling [Modelirovanie sistem jelektrснабzhenija]. *Jelektrojenergeticheskie komplekсы i sistemy: istorija, opyt, perspektiva: sbornik nauchnyh trudov Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* (Electric power complexes and systems: history, experience, perspective: collection of scientific papers of the All-Russian scientific and technical conference with international participation). – Khabarovsk, 2020, pp. 167 – 170.

10. Agunov A. V., Sokolov D. A. Modeling of traction power supply systems in MATLAB-Simulink [Modelirovanie sistem t'jagovogo jelektrснабzhenija v MATLAB-Simulink]. *Eltrans 10.0: tezisy dokladov Desjatogo mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans 10.0»: v 2 chastjah* (Eltrans 10.0: Abstracts of the Tenth International Symposium «Eltrans 10.0»: in 2 parts). – St. Petersburg, 2019, vol. 2, pp. 61 – 62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Соколов Денис Алексеевич

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).
Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург,
190031, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение желез-
ных дорог», ПГУПС.

Тел.: +7 (952) 391-48-65.

E-mail: sokolofffffff@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sokolov Denis Alekseevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University (PGUPS).

9, Moskovskii av., Saint Petersburg, 190031,
the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Railways
power supply», PGUPS.

Phone: +7 (952) 391-48-65.

E-mail: sokolofffffff@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Соколов, Д. А. Методика выбора компенсирую-
щих устройств в системе тягового электроснабжения
переменного тока / Д. А. Соколов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. –
№ 4 (48). – С. 39 – 46.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sokolov D. A. Methodology of selecting compensat-
ing devices in the AC traction power supply system. Jour-
nal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 4 (48),
pp. 39 – 46 (In Russian).

Е. Б. Преображенский¹, А. В. Удовиченко¹, М. М. Никифоров²

¹Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), г. Новосибирск, Российская Федерация;

²Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ВРЕМЕННОГО УСИЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. В статье рассматривается вопрос применения систем накопления электроэнергии на железнодорожном транспорте. Отмечено, что они применяются в возобновляемых источниках энергии и на гибридных маневровых тепловозах. Указана возможность применения систем накопления электроэнергии для повышения эффективности использования электроэнергии на тягу поездов. Внедрению систем накопления электроэнергии в систему тягового электроснабжения препятствуют высокие капитальные затраты и необходимость усиления сразу нескольких смежных межподстанционных зон.

Предложено рассмотреть возможность создания мобильной системы накопления электроэнергии, все оборудование которой будет размещаться в контейнерах, установленных на грузовые платформы, что позволит оперативно перемещать такую систему. Целью внедрения мобильной системы накопления электроэнергии является временное усиление системы тягового электроснабжения во время проведения планового капитального или аварийно-восстановительного ремонта одного из путей на двухпутных участках железной дороги, когда возникает необходимость пакетного пропуска поездов поочередно в четном и нечетном направлениях по одному пути.

Возможность применения мобильной системы накопления электроэнергии рассмотрена на примере реального участка железной дороги. Для заданного графика пропуска пакетов поездов определены зависимость отбираемой мощности накопителя от времени, максимальная мощность и номинальная эффективная энергоемкость системы накопления. Дана оценка стоимости системы накопления электроэнергии. Показано, что более 70 % от общей стоимости системы накопления электроэнергии приходится на импортную подсистему преобразования энергии. Сделан вывод о необходимости разработки отечественных преобразовательных подсистем.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, ремонт пути, пакетное следование поездов, система накопления электроэнергии

Evgeniy B. Preobrazhensky¹, Alexey V. Udovichenko¹, Mikhail M. Nikiforov²

¹Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, the Russian Federation;

²Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

MOBILE ELECTRICITY STORAGE SYSTEM FOR TEMPORARY STRENGTHENING THE DC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Abstract. The article deals with the issue of using electric power storage systems in railway transport. It is noted that they are used in renewable energy sources and on hybrid shunting diesel locomotives. The possibility of using electric power storage systems to improve the efficiency of using electric power for train traction is indicated. The introduction of electric energy storage systems in the traction power supply system is hampered by high capital costs and the need to strengthen several adjacent inter-substation zones at once.

It is proposed to consider the possibility of creating a mobile energy storage system, all the equipment of which will be placed in containers installed on cargo platforms, which will allow such a system to be quickly moved.

The purpose of introducing a mobile power storage system is to temporarily strengthen the traction power supply system during a planned overhaul or emergency repair of one of the tracks on double-track sections of the railway. In this case, there is a need for a batch pass of trains alternately in even and odd directions on the same track.

The possibility of using a mobile energy storage system is considered on the example of a real section of the railway. For a given schedule of passing train packages, the dependence of the storage capacity taken off from time, the maximum power and the nominal effective energy intensity of the storage system are determined. An estimate of the electricity storage system cost is given. It is shown that more than 70 % of the total cost of the electricity storage system falls on the imported energy conversion subsystem. It is concluded that it is necessary to develop domestic converter subsystems.

Keywords: traction power supply system, track repair, batch train operation, power storage system.

Исследования в области повышения характеристик литий-ионных аккумуляторных батарей и совершенствования технологий их производства ведут к существенному снижению стоимости хранения единицы запасенной энергии и, как следствие, к расширению сфер использования систем накопления электроэнергии (далее – СНЭ). Не является исключением и железнодорожный транспорт России. Экспериментальные образцы СНЭ на литий-ионных батареях применяются в ОАО «Российские железные дороги» в составе возобновляемых источников энергии, начата опытная эксплуатация маневровых тепловозов с гибридной силовой установкой, например, ТЭМ9h, силовая установка которого включает в себя экологичный дизельный двигатель средней мощности и комбинированный накопитель энергии из литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов.

Одним из наиболее перспективных направлений использования СНЭ с литий-ионными аккумуляторами на железнодорожном транспорте является их применение для улучшения энергетических характеристик электротяги и повышения эффективности использования энергии рекуперации [1, 2]. Проведенный анализ возможных мест размещения СНЭ показал, что с точки зрения энергетической эффективности наиболее целесообразно устанавливать их на электроподвижном составе. В этом случае обеспечивается максимальная эффективность использования энергии рекуперации. Однако при этом потребуются существенная реконструкция более десяти тысяч единиц тягового электроподвижного состава (ЭПС). Кроме того, для каждой серии ЭПС потребуется разработка собственной конструкции СНЭ.

Более рациональным и менее затратным является размещение СНЭ на постах секционирования в середине межподстанционных зон [3, 4]. В этом случае не только выполняется сбор, хранение и рациональное потребление энергии рекуперации, но и обеспечивается повышение уровня напряжения в контактной сети в середине межподстанционной зоны, что позволяет повысить пропускную способность участка [5]. К сожалению, до настоящего времени на сети железных дорог не внедрено ни одной СНЭ по причинам экономического характера.

С одной стороны, внедрение СНЭ с литий-ионными аккумуляторами требует существенных капитальных затрат, затрат на эксплуатацию, включая затраты на покупку электроэнергии, необходимую для питания подсистемы управления и связи, а также вспомогательной подсистемы, в состав которой входят системы кондиционирования, обогрева, вентиляции, пожаротушения и пр. [6], а также дополнительных эксплуатационных затрат, связанных с необходимостью несколько раз за срок службы СНЭ заменять отработавшие свой срок эксплуатации аккумуляторные батареи (примерно три – четыре раза).

С другой стороны, устранение лимитирующих по условиям работы системы тягового электроснабжения межподстанционных зон позволяет увеличить пропускную способность на две – четыре пары поездов в сутки, что во много раз превышает эффект от повышения эффективности использования энергии рекуперации и, в теории, гарантирует окупаемость инвестиций [7]. К сожалению, после устранения ограничений по условиям работы системы тягового электроснабжения в одной межподстанционной зоне на участке появляется другая лимитирующая зона, не позволяющая в целом увеличить его пропускную способность. В общем случае для устранения ограничения пропускной способности участка железной дороги по условиям работы системы тягового электроснабжения может потребоваться внедрение СНЭ и (или) других усиливающих мероприятий в половине из межподстанционных зон. При этом необходимо учитывать, что далеко не всегда существует возможность увеличить количество пар поездов даже при наличии пропускной способности, например, из-за отсутствия грузов на соответствующем направлении, ограничений смежных участков и др., что может привести к неокупаемости проекта.

Однако существуют случаи, когда использование СНЭ может быть необходимо без учета ожидаемого прямого экономического эффекта. Речь идет о необходимости временного усиления системы тягового электроснабжения во время проведения планового капитального или аварийно-восстановительного ремонта одного из путей на двухпутных участках железной до-

роги. В этом случае возникает необходимость пакетного пропуска поездов поочередно в четном и нечетном направлениях по одному пути. В настоящее время на сети железных дорог все более широкое распространение находит технология вождения тяжеловесных и длинносоставных поездов. Недостаточный уровень напряжения в контактной сети на ремонтируемом участке может потребовать расформирования таких поездов перед его прохождением, что влечет за собой как временные, так и финансовые потери.

Для временного усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока предлагается спроектировать мобильную систему накопления электроэнергии (далее – МСНЭ) с размещением всего оборудования в контейнерах, установленных на грузовых платформах по аналогии с мобильными тяговыми подстанциями, разработанными в НИИЭФА-Энерго [8]. Это позволит легко транспортировать ее к месту проведения ремонтных работ.

Рассмотрим применение МСНЭ на примере реального участка железной дороги (рисунок 1). В качестве исходного условия примем, что капитальный ремонт выполняется на первом пути в границах межподстанционной зоны Лагунака – Картканск. На смежных тяговых подстанциях, питающих рассматриваемую межподстанционную зону, установлено по два преобразовательных трансформатора ТРДП-12500/10Ж-У1 и два 12-пульсовых выпрямителя ТПЕД-3150. Подключение МСНЭ выполнено на разъезде «2850 км».

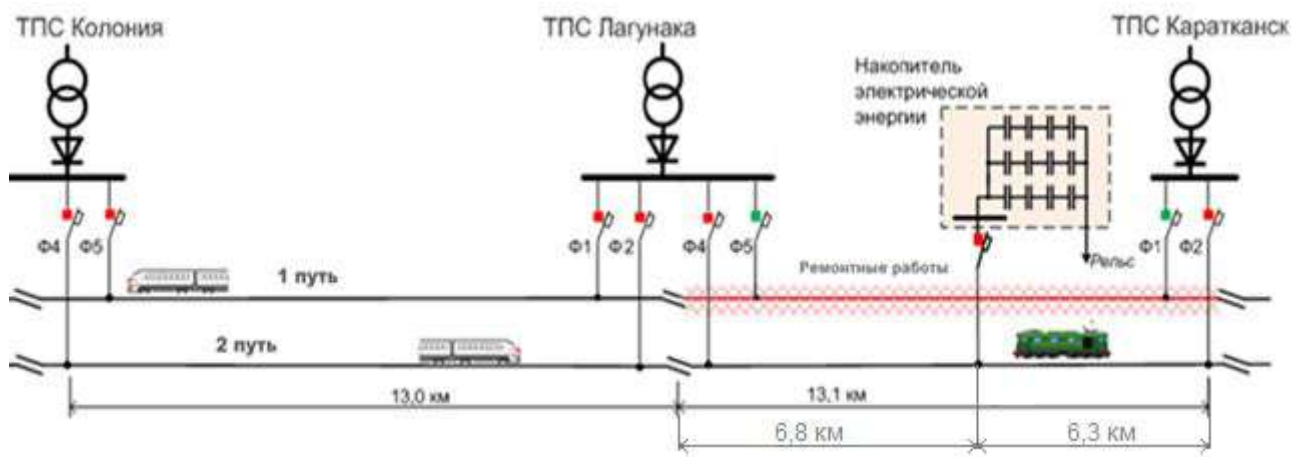


Рисунок 1 – Схема расчетного участка для оценки параметров мобильной системы накопления электроэнергии

Заряд аккумуляторных батарей МСНЭ осуществляется от тяговых подстанций во время отсутствия тяговой нагрузки в межподстанционной зоне, а также при ее наличии и уровне напряжения в месте присоединения МСНЭ к контактной сети не ниже 3000 В. Выходное напряжение МСНЭ в режиме разряда составляет 3400 В.

График движения организован пакетами по четыре поезда в четном и нечетном направлениях, при этом в межподстанционной зоне одновременно не может находиться более трех поездов. По результатам имитационного моделирования в программном комплексе «КОРТЭС» полное время пропуска двух пакетов поездов в нечетном и четном направлениях составило 75,5 мин. График необходимой мощности МСНЭ для пропуска двух пакетов поездов за указанный период приведен на рисунке 2.

По результатам имитационного моделирования получено, что максимальная необходимая мощность разряда МСНЭ составляет 5388 кВт при токе разряда 1594 А.

Обработка результатов моделирования работы МСНЭ показала, что максимальный объем отпуска электроэнергии за один интервал разряда МСНЭ составляет 317,6 кВт·ч.

В общем случае СНЭ характеризуются тремя основными параметрами:

- номинальной энергоемкостью;
- эффективной энергоемкостью;
- номинальной мощностью, выдаваемой в сеть.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Эффективная энергоемкость определяет полный объем электрической энергии, который может быть получен нагрузкой от СНЭ в режиме разряда после ее полного заряда.

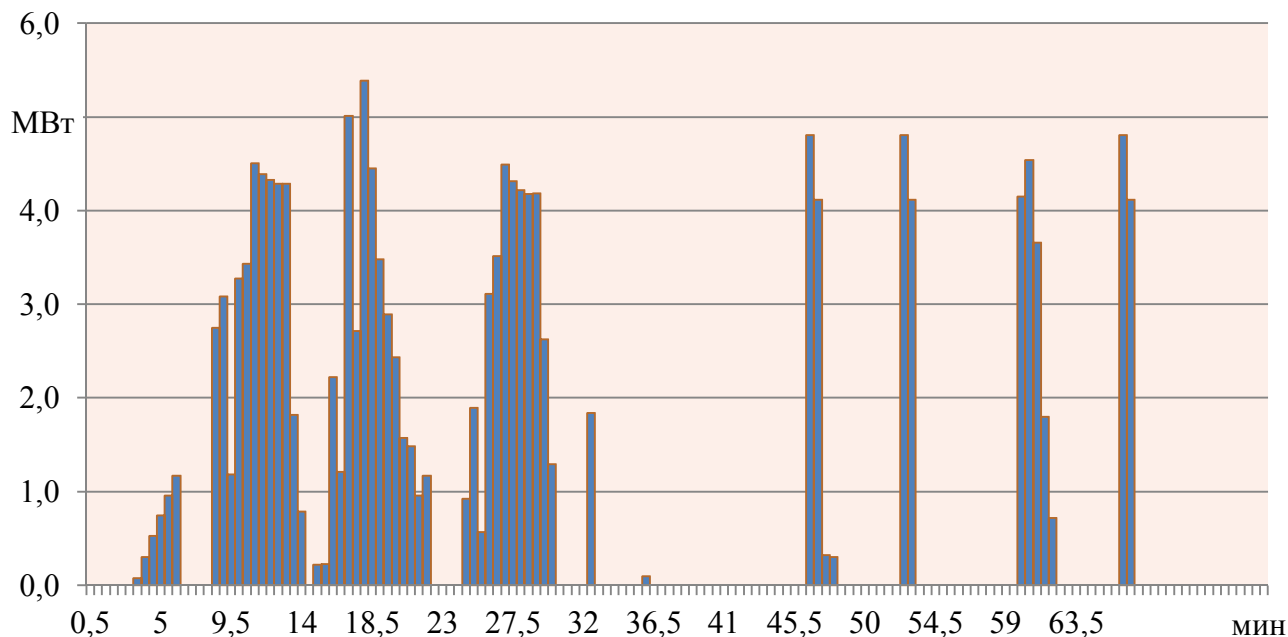


Рисунок 2 – Зависимость отбираемой мощности накопителя от времени при пропуске пакетов поездов сначала нечетного, а затем четного направления

Мощность СНЭ определяет номинальную величину мощности преобразовательных устройств (полупроводниковых преобразователей и трансформаторов), включенных между контактным проводом и аккумуляторной батареей накопителя, и принимается равной или большей, чем максимальная мощность, которую необходимо передать в контактную сеть.

Преобразовательные устройства обеспечивают требуемые режимы заряда и регенерации аккумуляторных батарей, а также необходимое напряжение на зажимах СНЭ и требуемый ток нагрузки. Таким образом, каждый из этих показателей определяет две независимые характеристики СНЭ, которые являются определяющими при формировании стоимости, – энергоемкость накопительной части и мощность преобразовательной части СНЭ. Структурная схема СНЭ для железных дорог представлена на рисунке 3.

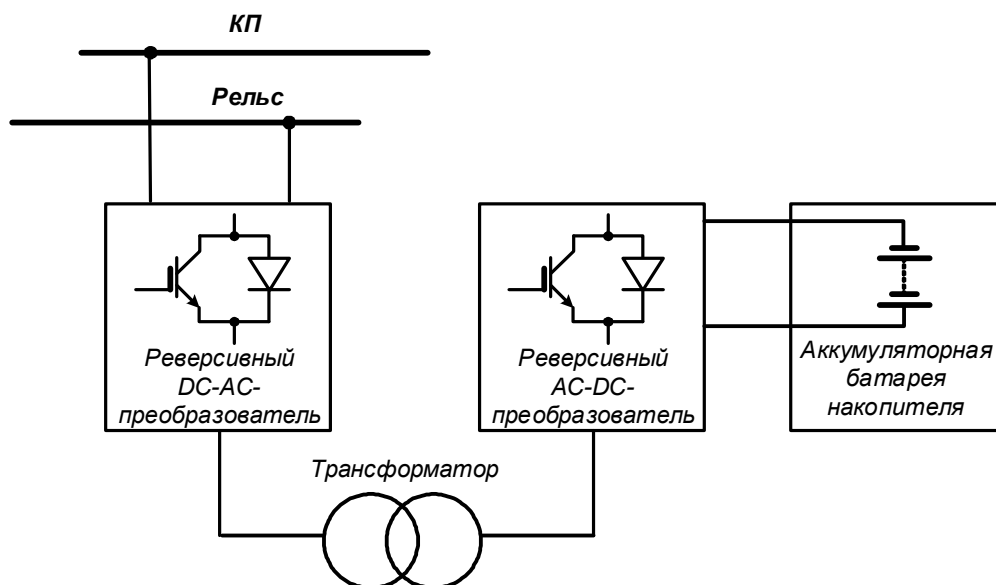


Рисунок 3 – Структурная схема СНЭ для железных дорог

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В настоящее время в России не выпускается преобразовательное оборудование, на базе которого можно создать МСНЭ для железных дорог постоянного тока, однако на мировом рынке предлагается несколько подходящих образцов (таблица 1).

Таблица 1 – Преобразовательные агрегаты для систем накопления электроэнергии

Производитель (страна)	Технические характеристики		
	Схема преобразователя	Выходное напряжение, В	КПД, %
Allen-Bradley (USA)	6 (18)-пульсовый управляемый выпрямитель по технологии AFE (Active Front End), автоматический инвертор тока с широтно-импульсной модуляцией	2400; 3300; 4160; 6600	98
Mitsubishi (Japan)	Многообмоточный трансформатор, 18,36,54-пульсовый неуправляемый выпрямитель и IGBT-автоматический инвертор напряжения в фазе	3300; 6600	98
General Electric (USA)	Многообмоточный трансформатор, 18-пульсовый неуправляемый выпрямитель и IGBT-автоматический инвертор напряжения в фазе	3300/3000; 6600/6000	97
General Electric (USA)	6-пульсовый управляемый выпрямитель с IGBT-широтно-импульсной модуляцией, автоматический инвертор напряжения с IGBT-широтно-импульсной модуляцией и выходным LC-фильтром	6600	97,5
Toshiba (Japan)	Многообмоточный трансформатор, 18,30,36-пульсовый неуправляемый выпрямитель и IGBT-автоматический инвертор напряжения (технология AFE – опционально)	3300; 6000	97,6

Коэффициент полезного действия МСНЭ определяется по формуле:

$$\eta_{\text{МСНЭ}} = \eta_{\text{DC-AC}} \times \eta_{\text{тр}} \times \eta_{\text{AC-DC}} \times \eta_{\text{АБ}},$$

где $\eta_{\text{DC-AC}}$ – КПД DC-AC-преобразователя (не менее 0,97);

$\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансформатора (принимается равным 0,98);

$\eta_{\text{AC-DC}}$ – КПД AC-DC-преобразователя (не менее 0,97);

$\eta_{\text{АБ}}$ – КПД литий-ионных аккумуляторных батарей на цикле заряд-разряд (0,91).

Таким образом, КПД МСНЭ

$$\eta_{\text{МСНЭ}} = 0,97 \times 0,98 \times 0,97 \times 0,91 = 0,84.$$

Значение КПД МСНЭ требуется учитывать при определении необходимой эффективной энергоемкости накопителя.

Как показали расчеты, для пропуска двух пакетов поездов по рассматриваемому участку необходимо за цикл передать от МСНЭ в контактную сеть 1306,7 кВт · ч. Однако, как отмечалось выше, подзарядка МСНЭ осуществляется не только вне цикла пропуска пакетов поездов, но и в те промежутки времени, когда тяговая нагрузка отсутствует или незначительна [4]. Баланс заряда-разряда МСНЭ за один цикл пропуска поездов при условии, что в начале цикла накопитель заряжен на 100 %, представлен в таблице 2.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Баланс заряда-разряда МСНЭ за один цикл пропуска поездов

Интервал времени, мин	Режим работы МСНЭ	Количество электроэнергии, кВт·ч				Остаток заряда, %
		запасено на начало интервала	отпущено в КС	поступило из КС*	осталось на конец интервала **	
Нечетный пакет поездов						
0 – 3,5	Начало цикла, заряд	723,0	0,0	225,0	723,0	100,0
3,5 – 6,5	Разряд	723,0	31,5	0,0	691,5	95,6
6,5 – 8,5	Заряд	691,5	0,0	150,0	723,0	100,0
8,5 – 14,5	Разряд	723,0	318,5	0,0	404,5	55,9
14,5 – 15,0	Заряд	404,5	0,0	37,5	442,0	61,1
15 – 22,5	Разряд	442,0	296,2	0,0	145,8	20,2
22,5 – 24,5	Заряд	145,8	0,0	150,0	295,8	40,9
24,5 – 30,5	Разряд	295,8	295,0	0,0	0,8	0,1
30,5 – 32,5	Заряд	0,8	0,0	150,0	150,8	20,9
32,5 – 33,0	Разряд	150,8	15,4	0,0	135,4	18,7
33,0 – 36,0	Заряд	135,4	0,0	225,0	360,4	49,8
36,0 – 36,5	Разряд	360,4	0,8	0,0	359,6	49,7
36,5 – 37,5	Заряд	359,6	0,0	75,0	434,6	60,1
Четный пакет поездов						
37,5 – 46,5	Заряд	434,6	0,0	675,0	723,0	100,0
46,5 – 48,0	Разряд	723,0	79,8	0,0	643,2	89,0
48,5 – 52,5	Заряд	643,2	0,0	300,0	723,0	100,0
52,5 – 53,5	Разряд	723,0	74,7	0,0	648,3	89,7
53,5 – 59,5	Заряд	648,3	0,0	487,5	723,0	100,0
60,0 – 62,5	Разряд	723,0	124,2	0,0	598,8	82,8
62,5 – 66,5	Заряд	598,8	0,0	300,0	723,0	100,0
66,5 – 67,0	Разряд	723,0	74,7	0,0	648,3	89,7
67,5 – 75,5	Заряд, конец цикла	648,3	0,0	637,5	723,0	100,0

* – объем электроэнергии, который мог бы поступить из контактной сети в МСНЭ в случае неполного заряда аккумуляторных батарей из расчета заряда батареи 75 кВт·ч в минуту;

** – остаток электроэнергии в МСНЭ на конец интервала не может превышать значение максимальной эффективной энергоемкости накопителя.

По результатам формирования баланса заряда-разряда МСНЭ за один цикл пропуска поездов получено, что эффективная энергоемкость МСНЭ для заданных условий должна составлять 723 кВт·ч, а с учетом КПД МСНЭ (0,84) – 861 кВт·ч.

Если при отборе энергии от МСНЭ аккумуляторные батареи разряжать не более чем на 50 % для увеличения их срока эксплуатации, то полная энергоемкость МСНЭ должна составить 1722 кВт · ч.

Тогда при применении литий-ионных аккумуляторных батарей типа LFP270 энергоемкостью 0,8 кВт · ч их потребуется 2153 шт. При этом масса аккумуляторной части накопителя составит 21,11 т, а с учетом массы крепежных изделий (до 10 % от массы батарей) – примерно 23,2 т. С учетом того, что габариты одного элемента LFP270 составляют $0,337 \times 0,16 \times 0,106$ м и коэффициент заполнения пространства при размещении элементов аккумуляторной батареи составляет 0,76, полный объем, занимаемый аккумуляторной батареей МСНЭ, составит 16,18 куб. м.

Выполним оценку стоимости МСНЭ (без учета стоимости грузовых платформ и контейнеров для ее размещения).

Так как в Российской Федерации в настоящее время не выпускаются преобразовательные агрегаты, которые могли бы использоваться в системе управления МСНЭ, то согласно [9] прием удельную стоимость преобразовательного оборудования для МСНЭ в размере \$200 за 1 кВт мощности.

В системе преобразования МСНЭ необходим понизительный трансформатор, конструкция которого будет зависеть от выбранных DC-AC- и AC-DC-преобразователей номинальной мощностью, превышающей расчетную мощность накопителя, которая в нашем случае составляет 5,4 МВт. Ближайший больший номинал мощности трансформатора 6,3 МВ·А. Учитывая, что стоимость стандартного трансформатора ТМ-6300/10/0,4 составляет около 3 млн руб. [10], допустимо принять стоимость трансформатора специальной конструкции той же мощности в три раза больше, т. е. 9 млн руб. Стоимость одного элемента LFP270 составляет 27 тыс. руб. [11].

Таким образом, при курсе \$1 = 75 руб. общая стоимость оборудования мобильной системы накопления электроэнергии составит, млн руб.:

$$C_{\text{МСНЭ}} = (2\,153 \times 27\,000 + 2 \times 5388 \times 200 \times 75) \cdot 10^{-6} + 9 = 228,77.$$

В том числе стоимость аккумуляторной части 58,13 млн руб., преобразовательной части 161,64 млн руб. Не трудно сделать вывод о необходимости снижения стоимости преобразовательной части МСНЭ. И наиболее эффективной в данном случае будет разработка отечественных элементов преобразовательной части МСНЭ. Работы в этом направлении уже проводятся для СНЭ, внедряемых в автономных сетях 10/0,4 кВ газоперекачивающих станций, участков нефтедобычи и удаленных населенных пунктов при внедрении возобновляемых источников энергии [12].

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Предложено использование мобильных систем накопления электроэнергии, размещенных в контейнерах на грузовых платформах, для временного усиления системы тягового электроснабжения в случаях проведения капитального ремонта или аварийно-восстановительных работ на одном из путей двухпутных участков железной дороги, когда требуется обеспечить пакетный пропуск поездов поочередно в четном и нечетном направлениях.

2. Для реального участка железной дороги выполнено имитационное моделирование, по результатам которого определены максимальная мощность и эффективная энергоемкость мобильной системы накопления электроэнергии. Составлен баланс эффективной энергоемкости мобильной системы накопления электроэнергии при реализации полного цикла пропуска поездов в четном и нечетном направлениях. Определены технические параметры системы накопления электроэнергии. Рассмотренное решение может быть актуальным и в автономных и специализированных системах энергоснабжения при резкопеременной нагрузке.

3. Выполнена приблизительная оценка стоимости мобильной системы накопления электроэнергии без учета стоимости контейнеров и грузовых платформ. Показано, что доля стоимости импортной преобразовательной части системы составляет более 70 % от всех затрат,

что обусловлено большой мощностью, которую необходимо выдавать в контактную сеть в моменты пиковых нагрузок. Указано на необходимость разработки отечественных преобразователей для системы накопления электроэнергии.

Список литературы

1. Незевак, В. Л. Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока / В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2015. – № 1(14). – С. 76–83.
2. Преображенский, Е. Б. Накопители электрической энергии как фактор повышения энергоэффективности и провозной способности РЖД при реализации концепции Smart Grid / Е. Б. Преображенский. – Текст : непосредственный // Инновации транспорта. – 2000. – № 1(39). – С. 38–44.
3. Черемисин, В. Т. Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. – 2013. – № 2(6). – С. 48–52.
4. Незевак, В. Л. Сравнение вариантов применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 9. – С. 17–23. – DOI 10.36535/023619142020094.
5. Незевак, В. Л. Применение накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения с целью повышения пропускной способности на лимитирующих участках / В. Л. Незевак, С. С. Самолинов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2020. – № 1(64). – С. 104–109. – DOI 10.20291/1815-9400-2020-1-104-109.
6. Проблемы, перспективы применения и методика расчета нормированной стоимости накопления электрической энергии / В. Д. Мельников, Г. Б. Нестеренко, Д. Е. Лебедев [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11. – № 4(44). – С. 30–36.
7. Никифоров, М. М. Расчет предельной стоимости внедрения накопителя электрической энергии для системы тягового электроснабжения постоянного тока / М. М. Никифоров, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2017. – № 1(151). – С. 54–56.
8. Евразия Вести: транспортная газета : сайт. – Текст : электронный. – Москва. – URL: <http://eav.ru/publ1.php?page=1&publid=2019-09a12> (дата обращения: 29.01.2022).
9. Semiconductors for Power Supplies: System catalog // Toshiba : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://www.mouser.com/datasheet/2/408/SCE0024_catalog-29379.pdf (дата обращения: 28.01.2022).
10. Каталог товаров // tiu.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://omsk.tiu.ru/p472351199-transformator-63001004.html> (дата обращения: 28.01.2022).
11. Каталог товаров // Смарт системс 21 : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://smartsystems21.ru/products/akb-lioteh-lt-lfp270> (дата обращения: 28.01.2022).
12. Разработка эффективного согласующего устройства аккумуляторной батареи с инвертором напряжения в накопителе электрической энергии / А. В. Удовиченко, В. Г. Токарев, Е. В. Гришанов, С. В. Кучак. – Текст : непосредственный // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2021. – № 2 (51). – С. 43–52. – DOI 10.17212/1727-2769-2021-2-43-52.

References

1. Nezevak V. L., Cheremisin V. T. Prospects for the use of electric energy storage devices in the DC traction power supply system [Perspektivy primeneniya nakopiteley elektricheskoy energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of Research Results*, 2015, no. 1(14), pp. 76 – 83.
2. Preobrazhenskij E. B. Electric energy storage devices as a factor in increasing the energy efficiency and carrying capacity of Russian Railways in the implementation of the Smart Grid concept [Nakopiteli elektricheskoy energii kak faktor povysheniya energoeffektivnosti i provoznoy sposobnosti RZHD pri realizatsii kontseptsii Smart Grid]. *Innovatsii transporta – Transport innovation*, 2000, no. 1 (39), pp. 38 – 44.
3. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Nezevak V. L. Selection of installation sites for electric energy storage devices on the DC test site according to the criterion of energy efficiency [Vybor mest ustanovki nakopiteley elektroenergii na poligone postoyannogo toka po kriteriyu energoeffektivnosti]. *Nauka i transport. Modernizatsiya zheleznodorozhnogo transporta – Science and transport. Modernization of railway transport*, 2013, no. 2(6), pp. 48 – 52.
4. Nezevak V. L. Comparison of options for the use of energy storage devices in the traction power supply system and on electric rolling stock [Sravneniye variantov primeneniya nakopiteley elektroenergii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya i na elektropodvizhnom sostave]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. Nauchnyy informatsionnyy sbornik – Transport: science, technology, management. Scientific information collection*, 2020, no. 9, pp. 17 – 23.
5. Nezevak V. L. The use of energy storage devices in the traction power supply system in order to increase the throughput in limiting sections [The use of energy storage devices in the traction power supply system in order to increase the throughput in limiting sections]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2020, no. 1 (64), pp. 104 – 109.
6. Melnikov V. D., Nesterenko G. B., Lebedev D. E. et al. Problems, prospects for application and methodology for calculating the normalized cost of electric energy accumulation [Problems, prospects for application and methodology for calculating the normalized cost of electric energy accumulation]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Bulletin of Kazan State Power Engineering University*, 2019, vol. 11, no. 4 (44), pp. 30 – 36.
7. Nikiforov M. M., Shatohin A. P. Calculation of the marginal cost of introducing an electric energy storage device for a DC traction power supply system [Raschet predel'noy stoimosti vnedreniya nakopitelya elektricheskoy energii dlya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka]. *Omskiy nauchnyy vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 1 (151), pp. 54 – 56.
8. *Evrasiya Vesti: transportnaya gazeta : sait* (Eurasia Vesti: transport newspaper: site). Available at: <http://eav.ru/publ1.php?page=1&publid=2019-09a12> (accessed 29 January 2022).
9. Semiconductors for Power Supplies: System catalog. Available at: https://www.mouser.com/datasheet/2/408/SCE0024_catalog-29379.pdf (accessed 28 January 2022).
10. Catalog. Available at: <https://omsk.tiu.ru/p472351199-transformator-63001004.html> (accessed 28 January 2022).
11. Catalog // SMART Systems 21. Available at: <https://smartsystems21.ru/products/akb-liotek-lfp270> (accessed 28 January 2022).
12. Udovichenko A. V., Tokarev V. G., Grishanov E. V., Kuchak S. V. Development of an efficient battery matching device with a voltage inverter in an electrical energy storage device [Razrabotka effektivnogo soglasuyushchego ustroystva akkumulyatornoy batarei s invertorom napryazheniya v nakopitele elektricheskoy energii]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii – Reports of the Academy of Sciences of Higher Education of the Russian Federation*, 2021, no. 2 (51), pp. 43 – 52.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Преображенский Евгений Борисович

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Маркса пр., д. 20, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Заведующий лабораториями кафедры электроники и электротехники Института силовой электроники НГТУ.

Тел.: +7 (383) 346-08-64.

E-mail: preobrazhenskij@corp.nstu.ru

Удовиченко Алексей Вячеславович

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Маркса пр., д. 20, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и электротехники, научный сотрудник Института силовой электроники НГТУ-НЭТИ.

Тел.: +7 (383) 346-08-66.

E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, исполняющий обязанности директора Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте (ОмГУПС).

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Преображенский, Е. Б. Мобильная система накопления электроэнергии для временного усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока / Е. Б. Преображенский, А. В. Удовиченко, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 47 – 56.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Preobrazhenskij Evgenij Borisovich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Head of the laboratorys of Electronics and Electrical Engineering department of Power Electronics Institute, NSTU.

Phone: +7 (383) 346-08-64.

E-mail: preobrazhenskij@corp.nstu.ru

Udovichenko Alexey Viacheslavovich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of Electronics and Electrical Engineering department of scientific researcher of Power Electronics Institute, NSTU.

Phone: +7 (383) 346-08-66.

E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, acting director of Research Institute for Energy Efficiency in Railway Transport, OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Preobrazhenskij E. B., Udovichenko A. V., Nikiforov M. M. Mobile electricity storage system for temporary strengthening the DC traction power supply system. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 4 (48), pp. 47 – 56 (In Russian).

М. Ф. Мухамеджанов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СКОЛЬЗЯЩЕМ КОНТАКТЕ ТОКОПРИЕМНИКА И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены процессы токосъема в системе электрической тяги переменного тока высокоскоростного движения. Представлены существующие устройства токоприемника и контактной подвески, взаимодействующие посредством скользящего электрического контакта. Приведено сравнение вариантов решений с различной горизонтальной геометрией контактного провода, влияющей на скорость поперечного смещения контактного провода у опор контактной сети относительно оси железнодорожного пути. Показано, что скорость, с которой точка контакта перемещается по вставке токоприемника, так же важна для оценки износа скользящего контакта, как и длина пролета опор контактной сети, кривизна пути и скорость поезда в пределах пролета. Для синтеза и анализа пары «вставка токоприемника – контактный провод» со скользящим контактом получена модель расчета контактирующей поверхности и рассмотрены энергетические процессы, приводящие к износу компонентов системы токосъема. Получены результаты моделирования взаимодействия токоприемника и контактной подвески при различных вариантах зигзагообразного расположения контактного провода. При внедрении технического решения на участках с высокоскоростным движением предпочтительным является предложенный в статье способ расположения контактного провода цепной подвески с периодом зигзага, увеличенным по сравнению с традиционным в два раза. Данное решение обеспечивает снижение скорости поперечного смещения и повышает динамическую устойчивость токоприемника, уменьшает циклическую нагрузку на опорные и поддерживающие конструкции контактной сети и увеличивает ресурс контактирующих элементов системы токосъема при высокоскоростном движении.

Ключевые слова: высокоскоростное движение, контактный провод, вставка токоприемника, скользящий электрический контакт, скорость поперечного смещения контакта, геометрическое расположение проводов в плане.

Mokhirbek F. Mukhamedzhanov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Saint Petersburg, the Russian Federation

MODELING OF PROCESSES IN THE PANTOGRAPH – CATENARY SLIDING CONTACT IN HIGH-SPEED TRAFFIC

Abstract. The article considers the processes of current collection in the system of AC electric traction in high-speed traffic. The existing devices of pantograph and catenary interacting by means of a sliding electrical contact are presented. The comparison of solutions with different horizontal geometry of the contact wire, which affects the speed of the lateral displacement of the contact wire at the catenary supports relative to the axis of the railway track, is given. It is shown that the speed at which the contact point moves along the pantograph strip is also important for assessing the wear of the sliding contact, as is the span length of the catenary supports, the curvature of the track and the speed of the train in the span limits. For the synthesis and analysis of the pair "pantograph strip - contact wire" with a sliding contact, a model for calculating the contact surface is obtained and the energy processes leading to wear of the components of the current collection system are considered. The results of modeling the interaction of the pantograph and the catenary with various variants of the zigzag arrangement of the contact wire are obtained. When implementing a technical solution in areas with high-speed traffic, the preferred method proposed in the article is the arrangement of the contact wire of a chain suspension with a zigzag period increased by two times compared to the traditional one. This solution provides a reduction in the speed of lateral displacement and increases the dynamic stability of the pantograph, reduces the cyclic load on the supporting and supporting structures of the catenary and increases the life of the contacting elements of the current collection system during high-speed traffic.

Keywords: high-speed traffic, contact wire, pantograph strip, sliding electrical contact, the speed of the lateral displacement of the contact, the geometric arrangement of the wires in the plan.

Первостепенной задачей системы тягового электроснабжения является обеспечение бесперебойного питания железнодорожного электрического транспорта в условиях скоростного и тяжеловесного движения [1]. Для выполнения данной задачи предъявляются жесткие требования по отказоустойчивости, готовности, ремонтпригодности и безопасности к компонентам технических средств, участвующих в процессе передачи электрической энергии от контактной сети посредством скользящего контакта к токоприемнику электроподвижного состава (ЭПС) [2]. При интенсивном движении поездов возникает преждевременный износ элементов скользящей пары «вставка токоприемника – контактный провод» вследствие динамических процессов, происходящих между токоприемником и контактной подвеской. Отрицательный вклад в ускоренный износ вносит совокупность факторов, в том числе образование электрической дуги и механическое трение. Своевременное обнаружение отказов в системе токосъема, связанных с критическим износом скользящих элементов, является целью многих исследований в данной области.

На контактной сети железных дорог для равномерного изнашивания поверхности контакта вставок токоприемника (ВТ) устанавливается зигзагообразное расположение (зигзаг) контактного провода (КП). Во время движения ЭПС площадь контакта между ВТ и КП совершает продольные и поперечные смещения относительно оси железнодорожного пути (ОЖДП). К наиболее важным факторам, влияющим на характер износа контактирующих элементов системы токосъема (рисунок 1), относятся тип материала вставки токоприемника и контактного провода, контактное нажатие, род тока, скорость ЭПС, условия окружающей среды.



а



б

Рисунок 1 – Поверхность износа: *а* – бронзового КП; *б* – угольной ВТ

Одним из технических решений по повышению отказоустойчивости компонентов скользящего контакта системы токосъема является изменение способа расположения КП, при котором чередуясь в разные стороны от ОЖДП поперечные смещения КП у промежуточных опор контактной сети осуществляют через одну опору [3]. На рисунке 2 представлены способы расположения КП в плане с традиционным зигзагом (КП1) и предлагаемым зигзагом (КП2).

Предлагаемое зигзагообразное расположение КП2 выполняется в соответствии с коммутационной функцией $f(n)$ координат фиксации положения провода у опор:

$$f(n) = \begin{cases} +1, & \text{если } \frac{n+1}{4} - \text{целое число;} \\ 0, & \text{если } n - \text{четное число, включая } 0; \\ -1, & \text{если } \frac{n-1}{4} - \text{целое число,} \end{cases} \quad (1)$$

где n – независимая дискретная переменная, равная номеру опоры контактной сети, на которой фиксируется смещение контактного провода от оси железнодорожного пути;

- +1 – направление зигзага в сторону опоры со значением +300 мм;
- 0 – точка фиксации совпадает с осью железнодорожного пути;
- 1 – направление зигзага в сторону от опоры со значением -300 мм.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Динамическое взаимодействие токоприемника и контактной подвески сопровождается энергетическими процессами, связанными с механическими и электрическими свойствами сильноточного скользящего контакта [4].

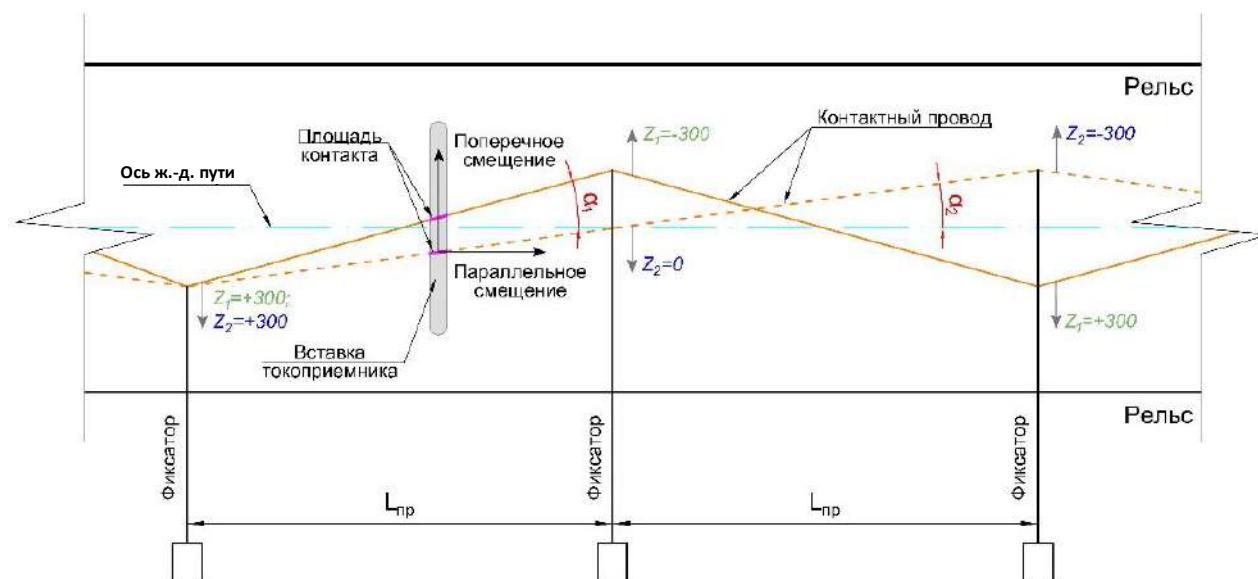


Рисунок 2 – Схема динамического взаимодействия вставки токоприемника и контактного провода, расположенного в плане с традиционным зигзагом (сплошная линия) и предлагаемым зигзагом (пунктирная линия)

Механическое взаимодействие трибосистемы «ВТ – КП» характеризуется трением скольжения, создаваемым за счет нажатия токоприемником по КП, и скоростью движения ЭПС (рисунок 3).

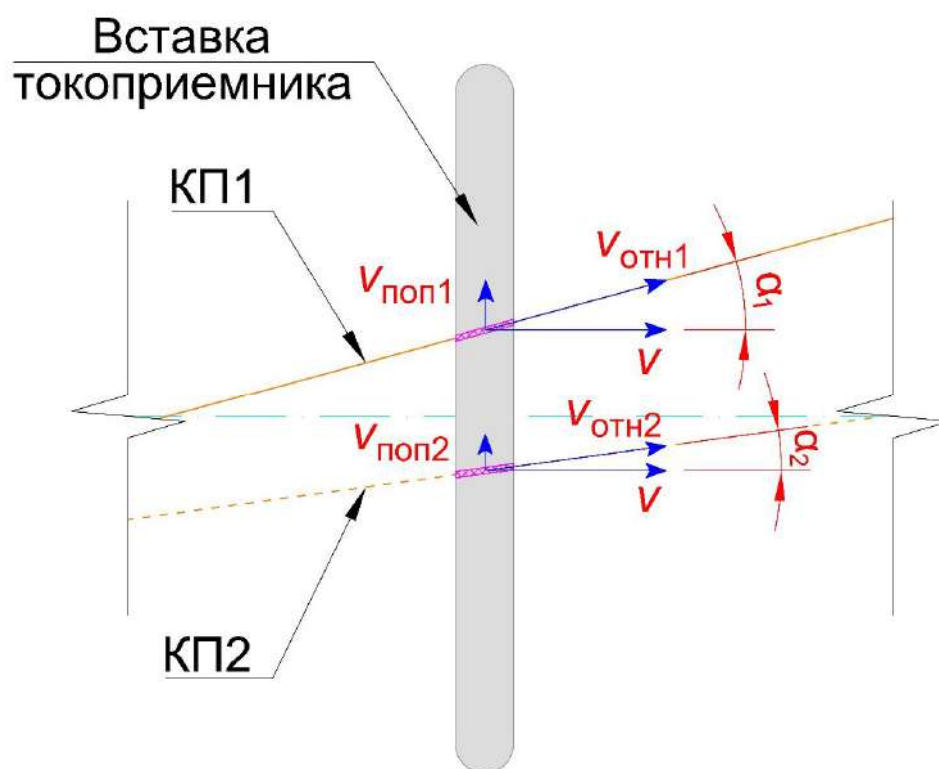


Рисунок 3 – Векторы скорости скользящего контакта вставки токоприемника и контактного провода, расположенного в плане с традиционным зигзагом (КП1) и предлагаемым зигзагом (КП2)

Элементы, которые вызывают изменение распределения теплоты во вставке токоприемника, включают в себя энергию трения, выделяемую относительным движением между ВТ и КП:

$$\begin{aligned} E_{\text{КП1}} &= \mu \cdot F_{\text{К1}} \cdot V_{\text{отн1}} \cdot t_{\text{КП1}}; \\ E_{\text{КП2}} &= \mu \cdot F_{\text{К2}} \cdot V_{\text{отн2}} \cdot t_{\text{КП2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения скольжения; $F_{\text{К1}}$, $F_{\text{К2}}$ – контактное нажатие при вариантах зигзага КП1 и КП2; $V_{\text{отн1}}$, $V_{\text{отн2}}$ – скорость относительного движения площади контакта при вариантах зигзага КП1 и КП2; $t_{\text{КП1}}$, $t_{\text{КП2}}$ – время относительного движения площади контакта с вариантами зигзага КП1 и КП2 при проходе токоприемником одного пролета опор контактной сети.

Скорость, развиваемая площадью поверхности контакта при продольном и поперечном смещении, определяется по формулам:

$$\begin{aligned} V_{\text{отн1}} &= \frac{V}{\cos \alpha_1}, \quad V_{\text{отн2}} = \frac{V}{\cos \alpha_2}; \\ V_{\text{поп1}} &= V \cdot \operatorname{tg} \alpha_1, \quad V_{\text{поп2}} = V \cdot \operatorname{tg} \alpha_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где V – скорость ЭПС; α_1 , α_2 – угол между КП и ОЖДП при вариантах зигзага КП1 и КП2.

Время, затрачиваемое скользящим контактом для прохождения единицы пролета опор контактной сети при продольном и поперечном смещении, определяется по формулам:

$$t_{\text{КП1}} = \frac{L_{\text{пр}}}{V_{\text{отн1}}}; \quad t_{\text{КП2}} = \frac{L_{\text{пр}}}{V_{\text{отн2}}}, \quad (4)$$

где $L_{\text{пр}}$ – длина пролета опор контактной сети; $L_{\text{ВТ1}}$, $L_{\text{ВТ2}}$ – поперечное смещение площади контакта по ВТ с вариантами зигзага КП1 и КП2 при проходе токоприемником одного пролета опор контактной сети.

Рассматривая электромеханический контакт как соприкосновение поверхностей ВТ и КП, сопровождающееся процессом выделения теплоты от джоулевых потерь

$$W_{\text{к}} = I^2 \cdot R_{\text{к}} \cdot t, \quad (5)$$

можно определить параметры конечно-элементной модели сопрягаемых поверхностей (рисунок 4). Здесь I – ток, потребляемый ЭПС; t – промежуток протекания тока через электрический контакт; $R_{\text{к}}$ – контактное сопротивление, определяемое по формуле [4]:

$$R_{\text{к}} = \frac{\rho_{\text{ВТ}} + \rho_{\text{КП}}}{4a}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{ВТ}}$, $\rho_{\text{КП}}$ – удельное электрическое сопротивление соответственно ВТ и КП; a – радиус пятна контакта согласно классической теории Р. Хольма [5], который определяется через ширину сопрягаемых плоскостей $b_{\text{к}}$. Данную ширину можно определить по формуле [6]:

$$b_k = 2a = 1,6\sqrt{f \cdot D \cdot C_E}, \quad (7)$$

где D – диаметр КП; $f = \frac{F_k}{l_k}$ – удельное контактное нажатие, F_k, l_k – соответственно контактное нажатие и длина сопрягаемой плоскости; $C_E = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ – эквивалентный модуль

упругости контактирующих материалов; ν_1, ν_2 – коэффициент Пуассона; E_1, E_2 – модуль упругости ВТ и КП.

Полученные значения b_k и l_k определяют площадь пятна контакта.

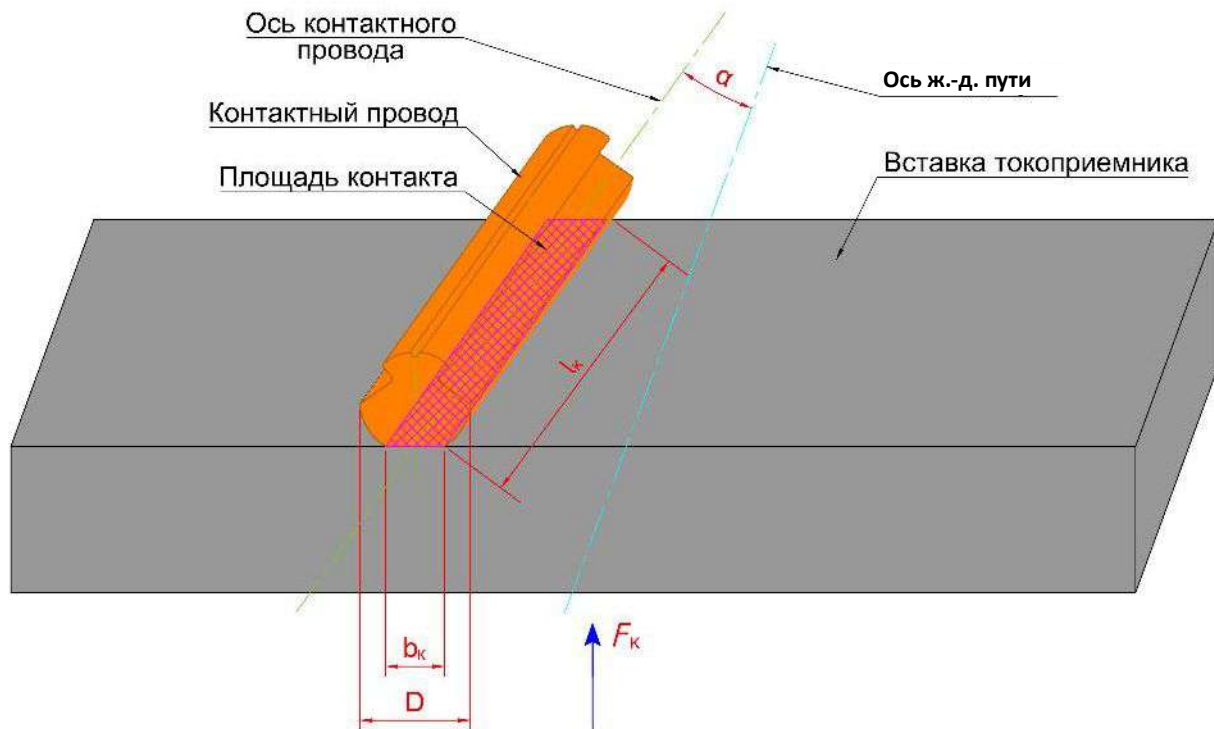


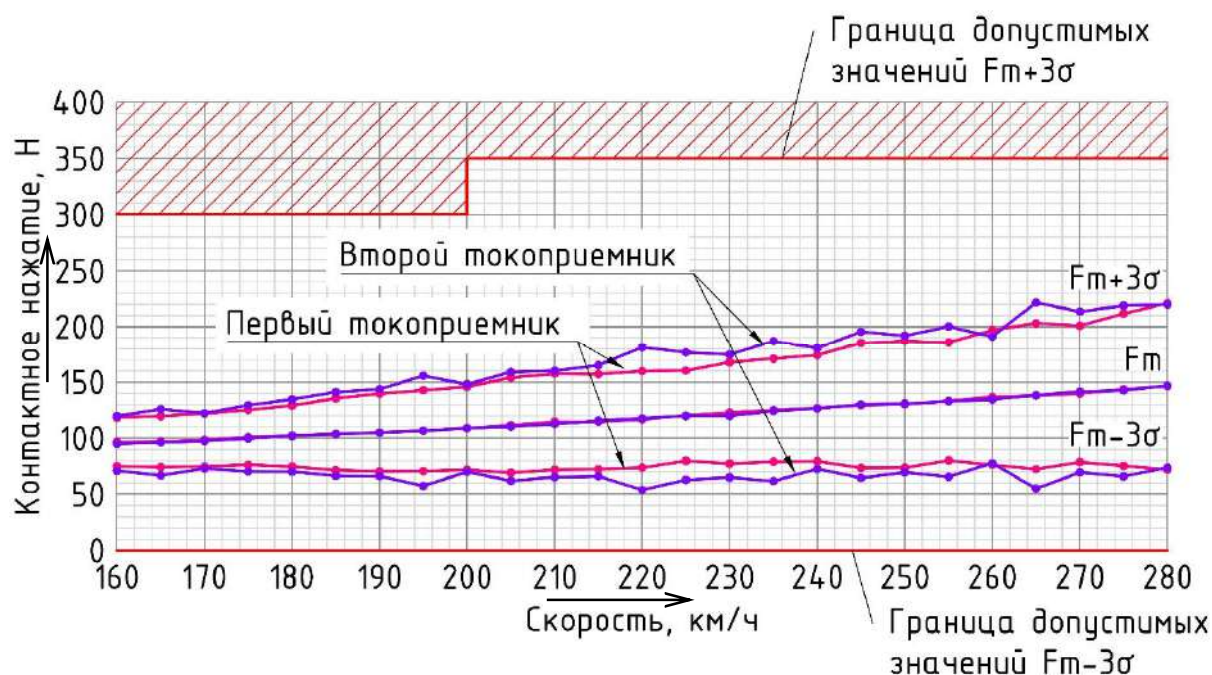
Рисунок 4 – Модель для расчета площади поверхности контакта ВТ и КП

Изменение контактного сопротивления в паре «провод – вставка» в большей степени определяет нажатие, передаваемое от токоприемника к контактной подвеске при движении ЭПС [4].

Рассмотрим механическое взаимодействие контактной подвески с токоприемником на примере контактной сети КС-250-25-UZ, эксплуатируемой на железных дорогах Республики Узбекистан. Расчеты выполнены на математической модели [7] для одного полного анкерного участка при двух вариантах зигзага контактного провода. Модель контактной подвески – пространственная (3D), построенная методом конечных элементов. Провода контактной подвески разбивались с дискретизацией по 20 конечных элементов в каждом межструновом пролете для каждого провода. Шаг по времени составлял 0,5 мс. Контактное нажатие фиксировалось на каждом шаге по времени, т. е. частота изменений составляла 1000 Гц. Для окончательного анализа силы контактного нажатия использовался низкочастотный фильтр с частотой отсечки 20 Гц. Указанные выше особенности расчета соответствуют требованиям стандартов [8, 9]. Согласно п. 6.1.4.1 источника [10] моделирование динамического взаимодействия контактных подвесок осуществлялось с двумя токоприемниками с расстоянием между ними 200 м.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На рисунке 5 приведены зависимости статистических параметров контактного нажатия (среднего значения F_m , статистического максимума $F_{\max} = F_m + 3\sigma$ и минимума $F_{\min} = F_m - 3\sigma$) от скорости движения ЭПС с двумя рабочими токоприемниками с шагом 5 км/ч для двух вариантов расположения КП КС-250 в диапазоне скоростей 160 – 280 км/ч при длине пролета 60 м.



а



б

Рисунок 5 – Зависимость контактного нажатия от скорости при взаимодействии двух токоприемников ЭПС с рессорной контактной подвеской ПБСМ1-95 + Бр1Ф-120 (15 + 20 кН) при традиционном зигзаге КП1 (а) и предлагаемом зигзаге КП2 (б)

Значения контактного нажатия между расчетными скоростями (кратными 5 км/ч) на графиках условно соединены прямыми линиями. Полученные результаты моделирования показывают незначительное различие средних значений контактного нажатия F_m в пределах 0,2 – 1,3 Н при двух рассматриваемых вариантах зигзага КП.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Основные физические параметры контактной подвески КС-250-25-UZ при различных вариантах зигзага КП приведены в таблице.

Основные параметры контактной подвески КС-250-25-UZ при зигзагах КП1 и КП2

Наименование параметра	КП1	КП2
Максимальная эластичность $e_{\max}$, мм/Н	0,551	0,572
Неравномерность эластичности U_{mid} , %	10,18	10,09
Скорость распространения волны, км/ч	496,1	496,1
Соотношение расчетной скорости ЭПС к скорости распространения волны, %	55	55
Коэффициент отражения	0,42	0,42
Коэффициент усиления	1,29	1,29
Коэффициент Доплера	0,33	0,33

Подробные результаты моделирования взаимодействия двух токоприемников и контактной подвески при КП1 и КП2 по проекту КС-250-25-UZ с пролетами 60 м при скорости движения 250 км/ч приведены на рисунке 6. Как видно из представленных данных, статистический минимум и максимум контактного нажатия находятся в пределах нормы: фактический максимум $F_{\max}$ и минимум $F_{\min}$ нажатия при этом составил 190,4 Н, 83,7 Н и 195,5 Н, 78,1 Н для вариантов зигзага КП1 и КП2 соответственно. В свою очередь процент потери контакта NQ для обоих вариантов составил 0 % при норме $NQ < 0,2$ %. По полученным результатам моделирования можно сделать вывод о том, что качество токосъема является удовлетворительным при данных условиях.

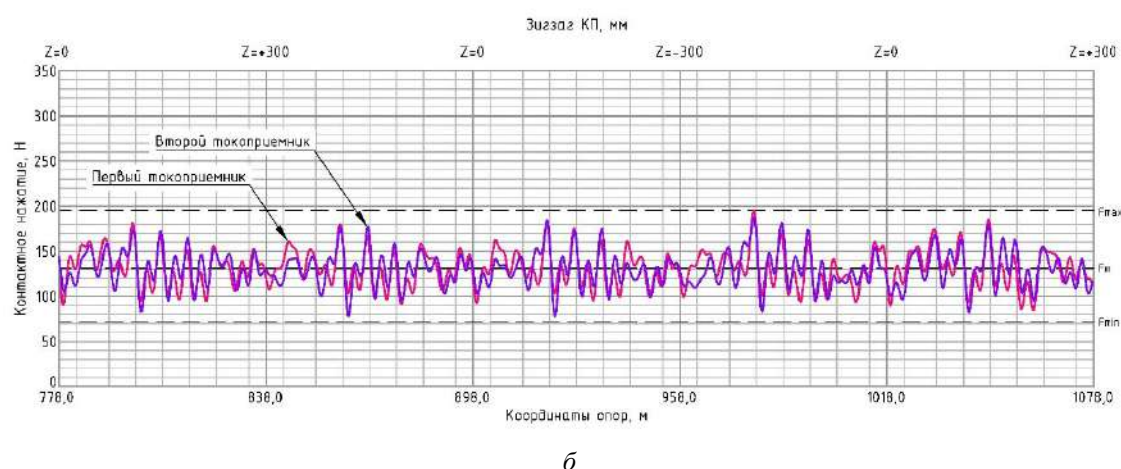
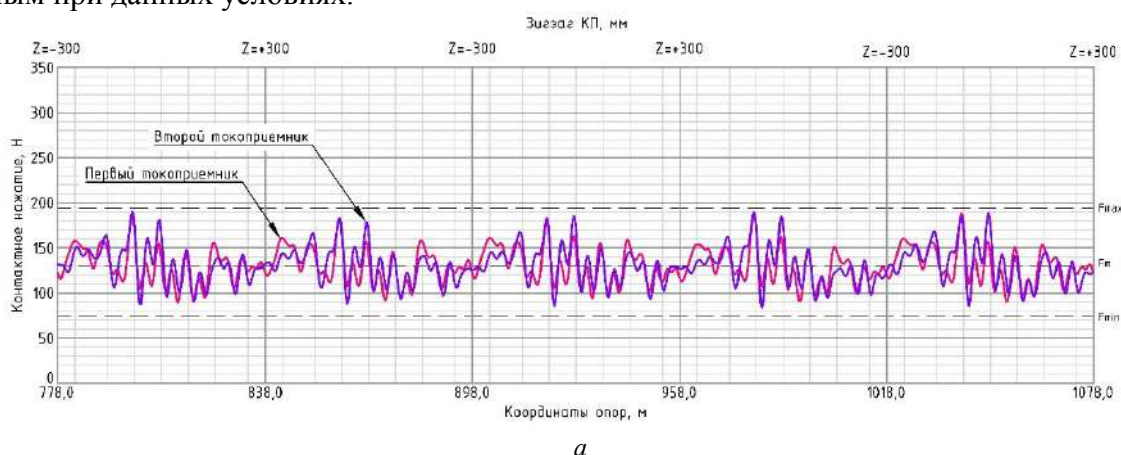


Рисунок 6 – Изменение контактного нажатия в пролетах 60 м вдоль анкерного участка для скорости движения 250 км/ч при традиционном зигзаге КП1 (а) и предлагаемом зигзаге КП2 (б)

В результате исследования процессов в скользящем контакте системы токосъема получена модель для расчета площади контактной поверхности ВТ и КП. Выполнена оценка влияния физических параметров контактной подвески на энергетические процессы в скользящем контакте. Исследовано техническое решение, направленное на увеличение ресурса устройств токосъема при интенсивном движении поездов. Предлагаемый способ расположения КП позволяет повысить отказоустойчивость контактирующих элементов в системе токосъема за счет сокращения «жёстких точек» и количества проходов ВТ за один цикл.

Список литературы

1. ГОСТ 32895–2014. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 35 с. – Текст : непосредственный.
2. ГОСТ 32793–2014. Токосъем токоприемником железнодорожного электроподвижного состава. Номенклатура показателей качества и методы их определения. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 14 с. – Текст : непосредственный.
3. Патент № 2762580. Российская Федерация, МПК В60М 1/28. Способ расположения контактного провода цепной подвески : № 2021117765 : заявлено 16.06.2021 : опубликовано 21.12.2021 / Бурков А. Т., Мухамеджанов М. Ф.; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – 5 с. – Текст : непосредственный.
4. Бурков, А. Т. Логическое управление содержанием контактной подвески в системе токосъема при интенсивном движении поездов / А. Т. Бурков, М. Ф. Мухамеджанов. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 78–88.
5. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1961. – 464 с. – Текст : непосредственный.
6. Slade P. G. Electrical contacts. Boca Raton: Taylor & Francis, 2014, 1257 p.
7. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железных дорог / Б. С. Григорьев, О. А. Головин, Е. Д. Виктор, Е. В. Кудряшов. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2012. – № 4. – С. 155–162.
8. EN 50317:2012. Railway applications. Current collection systems. Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. London, BSI Standards Publication, 2012, 18 p.
9. EN 50318:2018. Railway applications. Current collection systems. Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. London, BSI Standards Publication, 2018, 87 p.
10. TSI Energy. Commission regulation (EU) No 1301/2014 of 18 November 2014 on the technical specifications for interoperability relating to the ‘energy’ subsystem of the rail system in the Union. *Official Journal of the European Union*, 12.12.2014, L 356/179-227.

References

1. *Elektrifikaciya i elektrosnabzhenie zheleznih dorog. Terminy i opredeleniya, GOST 32895-2014* (Electrification and power supply of railways. Terms and definitions, National Standard 32895-2014). Moscow, Standardinform, 2014, 35 p.
2. *Tokos'em tokopriemnikom zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Nomenklatura pokazatelej kachestva i metody ih opredeleniya, GOST 32793-2014* (Pantograph current collection of railway electric rolling stock. Nomenclature of quality indicators and methods of their determination, GOST 32793-2014). Moscow, Standardinform, 2015, 14 p.
3. Burkov A. T., Mukhamedzhanov M. F. *Patent RU 2762580*, 21.12.2021.

4. Burkov A. T., Mukhamedzhanov M. F. Logical control of the catenary maintenance in the the current collection system at intensive train traffic [Logicheskoe upravlenie sodержaniem kontaktnoj podveski v sisteme tokos"ema pri intensivnom dvizhenii poezdov]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyj analiz. Modelirovanie – Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2021, no. 1 (69), pp. 78 – 88.

5. Hol'm R. *Elektricheskie kontakty* [Electrical contacts]. Moscow: Publishing house of foreign literature, 1961, 464 p.

6. Slade P. G. Electrical contacts. *Boca Raton: Taylor & Francis*, 2014, 1257 p.

7. Grigor'ev B. S., Golovin O. A., Viktorov E. D., Kudryashov E. V. Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskogo vzaimodejstviya tokopriemnikov i kontaktnoj podveski dlya skorostnyh elektrificirovannyh zheleznyh dorog [Mathematical modeling of the mechanical interaction of pantographs and catenary for high-speed electrified railways. Science and education]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie – Scientific and Technical Bulletin of SPbSPU. Science and education*, 2012, no. 4, pp. 155 – 162.

8. EN 50317:2012. Railway applications. Current collection systems. Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. London, *BSI Standards Publication*, 2012, 18 p.

9. EN 50318:2018. Railway applications. Current collection systems. Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. London, *BSI Standards Publication*, 2018, 87 p.

10. TSI Energy. Commission regulation (EU) No 1301/2014 of 18 November 2014 on the technical specifications for interoperability relating to the ‘energy’ subsystem of the rail system in the Union, *Official Journal of the European Union*, 12.12.2014, L 356/179-227.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мухамеджанов Мохирбек Фуркатович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железных дорог», ПГУПС.

Тел.: +7 (812) 570-33-47.

E-mail: mokhirbek@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Mukhamedzhanov Mokhirbek Furkatovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).

9, Moskovskii av., Saint-Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Railways power supply», PGUPS.

Phone: +7 (812) 457-83-16.

E-mail: mokhirbek@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мухамеджанов, М. Ф. Моделирование процессов в скользящем контакте токоприемника и контактной подвески в условиях высокоскоростного движения / М. Ф. Мухамеджанов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 57 – 65.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mukhamedzhanov M. F. Modeling of processes in the pantograph – catenary sliding contact in high-speed traffic. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 4 (48), pp. 57 – 65 (In Russian).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ ПОМЕХ ОТ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ТИПА С КОРРЕЛЯЦИОННЫМ ДЕШИФРАТОРОМ

Аннотация. В статье рассматривается приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) с корреляционным дешифратором. Целью данной работы является исследование влияния гармонических помех от высоковольтной линии электропередачи на функционирование нелинейного приемного устройства АЛСН с корреляционным дешифратором. Экспериментальное исследование качества функционирования нелинейного приемного устройства АЛСН с корреляционным дешифратором при воздействии гармонических помех от высоковольтных линий электропередачи выполнено с использованием метода имитационного моделирования. В исследовании использованы имитационные модели помех от высоковольтной линии электропередачи (ЛЭП), приемника и корреляционного дешифратора канала АЛСН. Анализ осциллограмм, полученных в результате исследования, показал, что корреляционный дешифратор имеет ряд особенностей, обусловленных алгоритмом его функционирования. Корреляционный дешифратор более уверенно распознает кодовые комбинации длительностью 1,6 с (вырабатываемые кодовым путевым трансмиттером типа КПП-5), чем длительностью 1,86 с (вырабатываемые кодовым путевым трансмиттером КПП-7). Это выражается в более коротком временном интервале нарушения нормальной работы нелинейного приемного устройства АЛСН. При дешифрации кодовой комбинации (КК) длительностью и 1,6 с, и 1,86 с наблюдалась ситуация кратковременной дешифрации более разрешающей КК «Ж» вместо «КЖ». Однако продолжительность таких ситуаций не превышала двух кодовых циклов и не вызвала бы появление более разрешающего огня на локомотивном светофоре. В целом эксперименты показали, что алгоритм корреляционной дешифрации КК АЛСН нуждается в совершенствовании для более уверенного дешифрирования КК, вырабатываемых кодовым путевым трансмиттером типа КПП-7(1,86 с).

Ключевые слова: сигнал, автоматическая локомотивная сигнализация с непрерывным каналом связи, индуктивно-рельсовая линия, гармоническая помеха, высоковольтная линия электропередач, имитационная модель, корреляционный дешифратор, эксперимент.

Aleksandr O. Shilin, Alexey S. Khokhrin, Ruslan R. Yusupov

Samara State Transport University (SSTU), Samara, the Russian Federation

STUDY OF THE EFFECT OF HARMONIC INTERFERENCE FROM A HIGH VOLTAGE POWER LINE ON THE OPERATION OF A NON-LINEAR RECEIVING DEVICE FOR CONTINUOUS AUTOMATIC LOCOMOTIVE SIGNALLING WITH A CORRELATION DECODER

Abstract. This paper considers a continuous automatic locomotive signalling (CALS) receiver with a correlation decoder. The aim of this paper is to investigate the influence of harmonic interference from a high-voltage power line on the operation of a non-linear CALS receiver with a correlation decoder. The experimental study of the quality of operation of a non-linear CALS receiver with a correlation decoder under the influence of harmonic interference from high-voltage power lines was carried out using the simulation method. Simulation models of interference from a high-voltage power line (VPL), a receiver and a correlation decoder of the CALS channel were used in the study. The analysis of oscillograms obtained as a result of the study has shown that the correlation decoder has a number of features due to the algorithm of its functioning. The correlation decoder more confidently accepts code combinations with a duration of 1.6s (generated by the code track transmitter of CTT-5 type), than the duration of 1.86s (generated by the code track transmitter CTT-7). This is expressed in a shorter time interval of disturbance of the CALS non-linear receiving device. At decoding of the code combination (CC) with the duration of both 1.6 s and 1.86 s the situation of short-term decoding of the more permissive CC «Y» instead of «RY» was observed. However, the duration of these situations did not exceed two code cycles and would not have caused a more permissive light to appear at the locomotive traffic light. In general, the experiments have shown that the CALS CC correlation decoding algorithm needs improvement for more confident decoding of CCs produced by a code track transmitter of the CTT-7 type(1.86 s).

Keywords: signal, automatic locomotive signalling with a continuous communication channel, inductive-rail line, harmonic interference, high-voltage power line, simulation model, correlation decoder, experiment.

Для обеспечения безопасного и бесперебойного движения поездов используются различные системы и устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Немаловажную роль в функционировании железнодорожного транспорта играет автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа (АЛСН) [1]. Данная система является основой современных систем интервального регулирования движения поездов [2]. Задача АЛСН – передавать информацию о показании ближайшего расположенного впереди напольного светофора прямо в локомотив, в кабину машиниста. Помехоустойчивость этой системы влияет на безопасность и график движения поездов [3].

В настоящее время в местах пересечения высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) в индуктивно-рельсовой линии (ИРЛ) канала АЛСН действуют гармонические помехи от токов, протекающих в фазных проводах ЛЭП, которые могут вызывать нарушения в работе АЛСН [4]. Для исследования влияния помех на функционирование канала АЛСН был использован корреляционный дешифратор сигналов АЛСН [5, 6], который дешифрирует числовой код, используемый в канале АЛСН, не путем подсчета количества импульсов в кодовой комбинации (КК), а путем оценки корреляции принятой КК с эталонными. Работа данного корреляционного дешифратора рассмотрена в нормальных условиях эксплуатации [7, 8], при воздействии временных искажений [9], а также при воздействии импульсных помех [10]. Основным методом исследования стало экспериментальное исследование посредством имитационного моделирования.

Сигналы кодовых комбинаций в системе АЛСН (рисунок 1) формируются кодовым путевым трансмиттером (КПТ-5 и КПТ-7). Трансмиттер типа КПТ-5 формирует сигнал с длительностью кодового цикла 1,6 с, а КПТ-7 – 1,86 с. В системе АЛСН на смежных блок-участках используют КПТ различного типа, что позволяет определить момент перехода локомотива с одного блок-участка на другой.

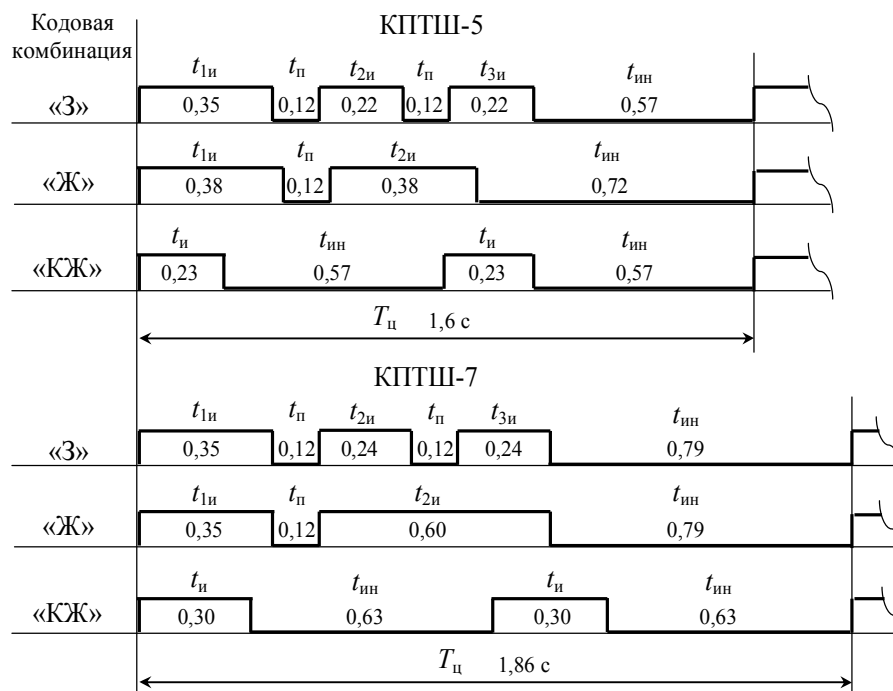


Рисунок 1 – Кодовые комбинации АЛСН, вырабатываемые трансмиттерами типов КПТ-5 и КПТ-7

Подробное описание принципов работы системы АЛСН представлено в источнике [8].

В эксплуатируемых устройствах АЛСН не реализовано главное преимущество цифровой обработки сигналов – возможность применения сложных (например, корреляционных, нелинейных) методов обработки сигналов, принципиально не реализуемых на аналоговой элементной базе. Процесс передачи сообщений числовым кодом на локомотивы по рельсовым линиям сопровождается воздействием помех. Это приводит к смене показаний локомотивного светофора на ложное, не соответствующее текущей поездной обстановке.

Помехи по воздействию на полезный сигнал подразделяются на аддитивные и мультипликативные. Аддитивное воздействие – это сумма полезного сигнала и помехи, мультипликативное – умножение. Мешающее воздействие помех можно представить совокупностью аддитивного и мультипликативного воздействия.

На рисунке 2 представлены графики, демонстрирующие аддитивное и мультипликативное воздействие помехи:

- а) полезный сигнал $s(t)$;
- б) помеха $n(t)$;
- в) аддитивное воздействие;
- г) мультипликативное воздействие.

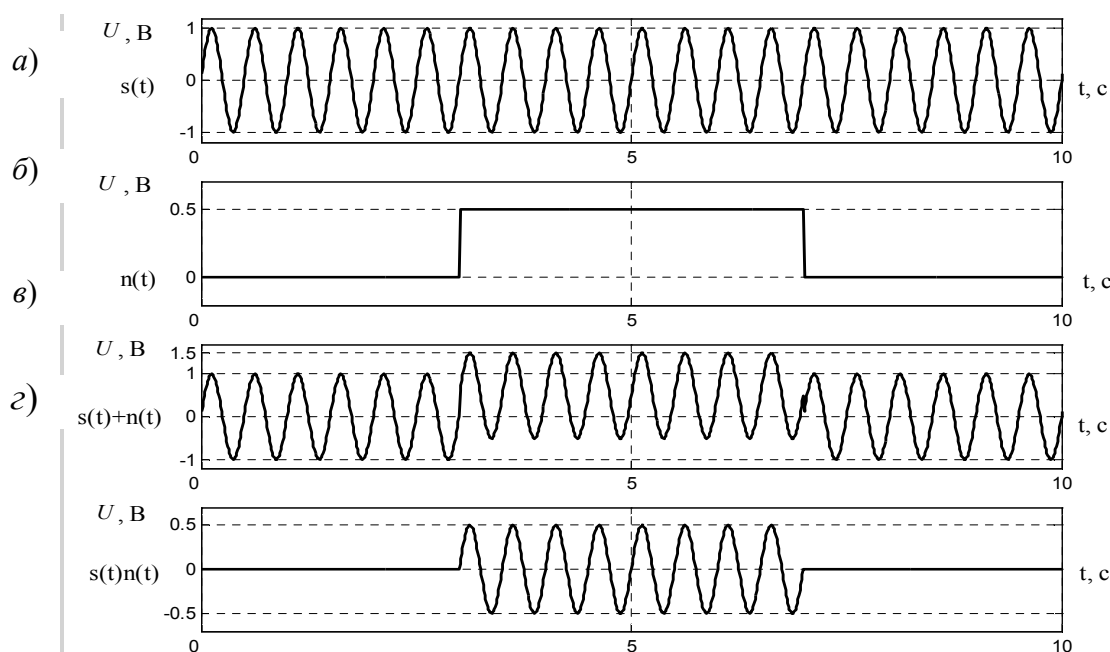


Рисунок 2 – Графики, поясняющие воздействие аддитивной и мультипликативной помехи на полезный сигнал

По своему характеру помехи подразделяются на импульсные, гармонические и флуктуационные.

Аддитивные помехи гармонического характера могут формироваться в рельсовой линии (РЛ) при наличии следующих источников:

- магнитные поля токов в линиях электропередач и от прочих источников в местах их пересечения с РЛ;
- гармоники тягового тока, вызванные работой устройств тиристорного управления тяговыми двигателями;
- гармоники тягового тока, вызванные рекуперативным торможением;
- гармоники и субгармоники тягового тока, вызванные низкокачественной работой тяговых подстанций и нелинейным характером элементов тяговой сети;
- сигналы параллельно работающих систем АБ и АЛС;
- магнитное поле, появившееся в результате локальной намагниченности рельсов;
- присутствие «шпального эффекта».

В общем случае аддитивная гармоническая помеха представляет собой гармоническое колебание с изменяющимися во времени параметрами: амплитудой, частотой и мгновенной фазой. Высоковольтная ЛЭП является одним из источников гармонических помех в канале АЛСН. Они возникают из-за создающегося электромагнитного поля в местах сближения воздушных и кабельных высоковольтных ЛЭП с железной дорогой. При перпендикулярном пересечении ЛЭП с РЛ степень влияния помех со стороны ЛЭП на АЛСН наименьшая. Гармонические помехи от ЛЭП возникают из-за разности высоты подвески приемных катушек АЛСН к раме локомотива, разброса значений их электрических и магнитных параметров.

На участках с электротягой кроме сигнального тока по рельсовой линии проходит обратный тяговый ток, который имеет одинаковое направление в обеих рельсовых нитях и также создает в устройствах АЛСН гармонические помехи. Приемные катушки подключены последовательно и встречно для тягового тока таким образом, что ЭДС, наводимые в приемных катушках магнитным полем тягового тока, взаимно вычитаются.

Гармонические помехи появляются из-за гармоник и субгармоник тягового тока. Одной из причин появления гармонических помех является изменение симметрии плеч выпрямителей тяговых подстанций. На графике, представленном на рисунке 3, видны спектральные составляющие постоянного тягового тока на частотах 100 и 200 Гц.

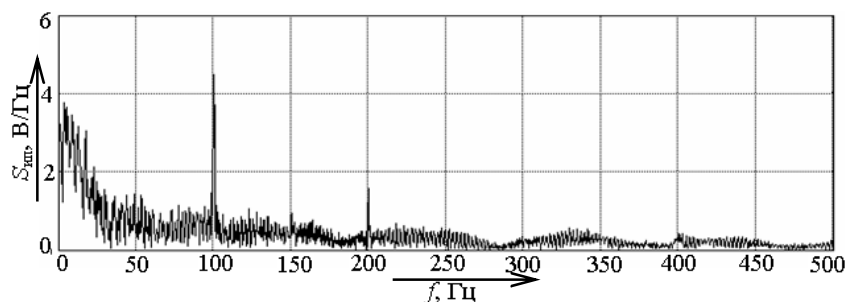


Рисунок 3 – График модуля спектральной плотности амплитуды помех от тягового тока

Гармонические помехи могут возникнуть также, если тяговые двигатели локомотива возвращают электрическую энергию в контактную сеть (в режиме рекуперации).

На рисунке 4 представлены спектральная составляющая ЭДС гармонической помехи от тягового тока на частоте 300 Гц, появившаяся при шестифазной схеме выпрямления на тяговой подстанции, и спектральная составляющая на частоте 100 Гц, возникшая в результате нарушения симметрии плеч выпрямителя.

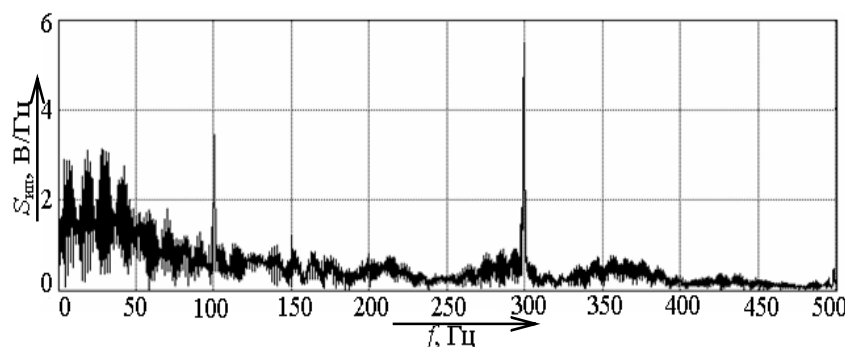


Рисунок 4 – График модуля спектральной плотности амплитуды помех от тягового тока при нарушении симметрии плеч выпрямителя

В данной работе используется имитационная модель гармонических помех от высоковольтных ЛЭП. В качестве среды для реализации процесса имитационного моделирования используется среда визуального программирования и моделирования Simulink математического пакета MATLAB.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Далее приведено описание имитационной модели, разработанной для исследования шестиканального корреляционного дешифратора. Имитационная модель установки для исследования содержит следующие функциональные блоки (рисунок 5):

- 1) блок модели для генерации кодового сигнала АЛСН и гармонических помех в ИРЛ (Блок генерации сигнала и помехи (БГСП));
- 2) блок модели приемного устройства АЛСН с корреляционным дешифратором (ПУ АЛСН);
- 3) блок средств регистрации и визуализации результатов моделирования (Scope 1).

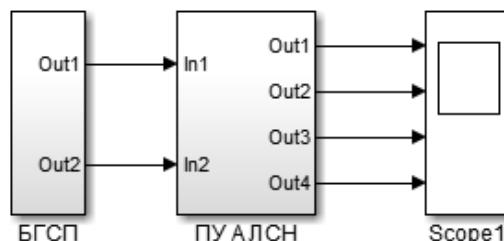


Рисунок 5 – Схема имитационной модели установки для исследования

Блок БГСП состоит из следующих блоков:

«Сигнал АЛСН» – блок генерации кодового сигнала АЛСН, позволяющий генерировать амплитудно-манипулированные сигналы всех кодовых комбинаций числового кода, применяемых в канале АЛСН;

«ГП» – блок генерации гармонической помехи от высоковольтной ЛЭП, формирующий временную последовательность отсчетов помехи от ЛЭП;

«Out1», «Out2» – вспомогательные блоки портов вывода сигналов из блока БГСП в блок «ПУ АЛСН».

В качестве модели формирования кодового сигнала АЛСН использована имитационная модель. Для регистрации и визуализации результатов моделирования используются встроенные средства MATLAB – многоканальные осциллографы.

На рисунке 6 показаны осциллограммы, демонстрирующие процесс формирования сигнала АЛСН (КК «3» с длительностью цикла 1,6 с). Здесь сверху вниз показаны осциллограммы:

- несущее гармоническое колебание заданной амплитудой 0,2 В и частотой 50 Гц;
- модулирующий сигнал – КК «3» с длительностью цикла 1,6 с;
- сформированный сигнал АЛСН.

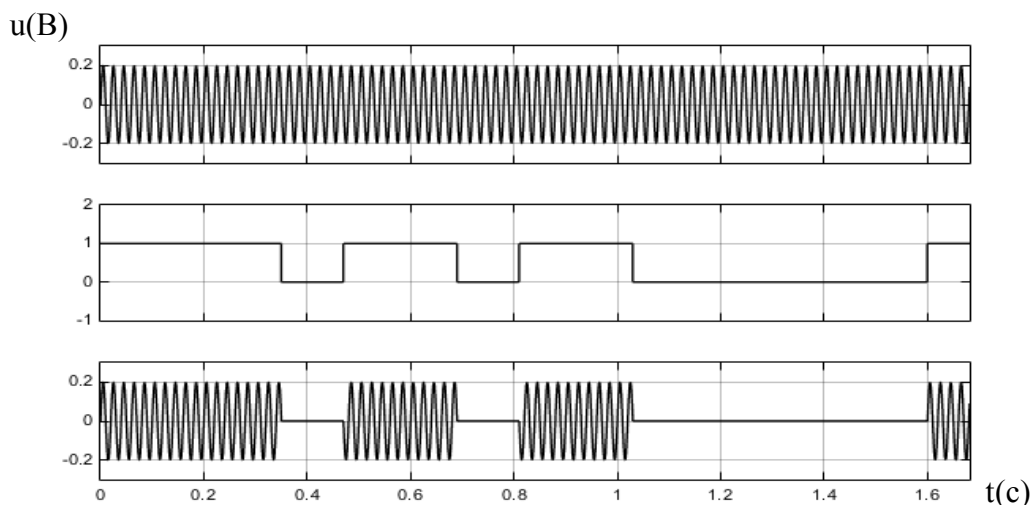


Рисунок 6 – Осциллограммы, показывающие процесс формирования сигнала АЛСН

В качестве модели генератора гармонических помех от ЛЭП использована совокупность двух имитационных моделей:

- программа формирования помехи прямого влияния ЛЭП;
- программа формирования помехи косвенного влияния ЛЭП.

На рисунке 7 показаны осциллограммы сигнала АЛСН (КК «З» с длительностью цикла 1,6 с) и гармонической помехи от ЛЭП (трехпроводная ЛЭП с горизонтальным расположением фазных проводов на высоте 15 м над рельсами, в каждом проводе протекает ток 3000 А, угол пересечения ЛЭП и железнодорожной линии – 60° , скорость движения локомотива в зоне влияния ЛЭП – 20 м/с), а также их аддитивной смеси при коэффициенте асимметрии приемного тракта канала АЛСН $K_a = 0,4$.

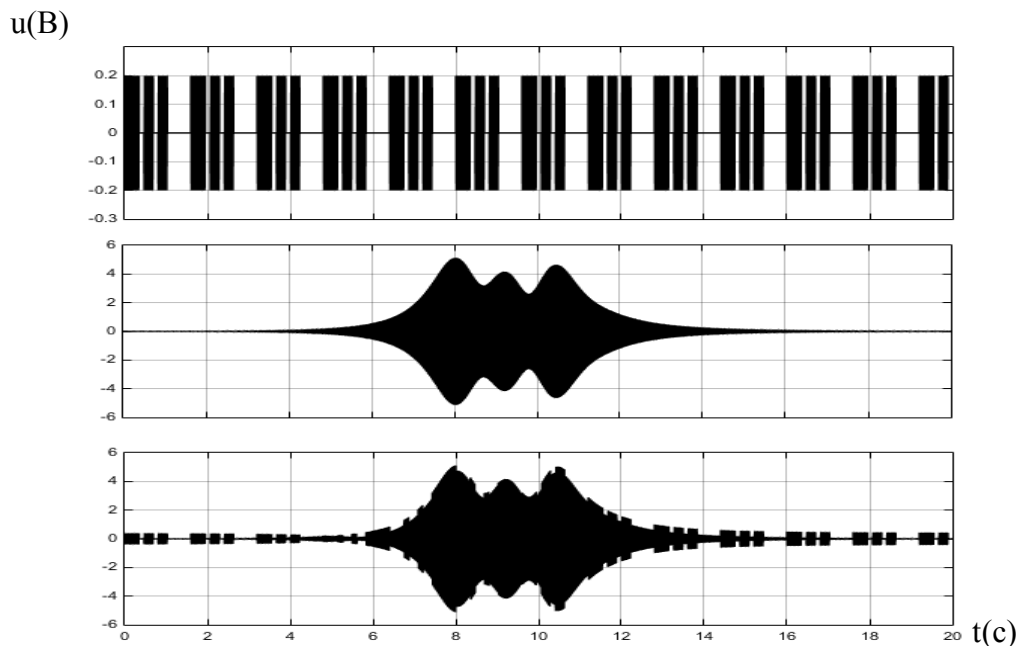


Рисунок 7 – Осциллограммы (сверху вниз): сигнал АЛСН, гармоническая помеха от ЛЭП и их аддитивная смесь на входе приемного устройства АЛСН

Блок ПУ АЛСН (рисунок 8) состоит из следующих блоков:

- «Приемник АЛСН» – блок имитационной модели приемника сигналов АЛСН;
- «КД» – блок, имитирующий корреляционный дешифратор кодовых комбинаций АЛСН;
- «In1», «In2», «Out1»–«Out4» – вспомогательные блоки портов ввода сигналов в блок «ПУ АЛСН» и вывода сигналов из него.

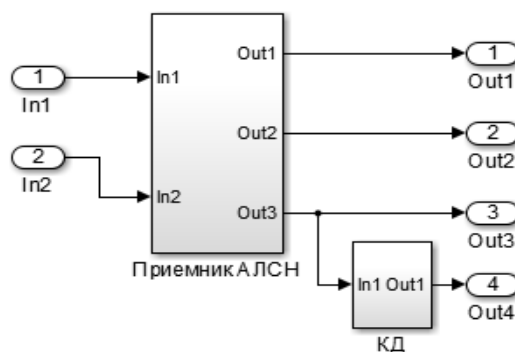


Рисунок 8 – Общий вид имитационной модели блока «ПУ АЛСН»

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В качестве имитационной модели приемника сигналов АЛСН использована модель, позволяющая подавать на ее входы сигнал АЛСН и несколько видов помех, а также задавать в экспериментах значение коэффициента продольной асимметрии ИРЛ, от которого зависит величина помех от тягового тока на входе приемного устройства.

На рисунке 9 показаны осциллограммы, демонстрирующие процесс обработки приемником аддитивной смеси сигнала АЛСН (КК «З» с длительностью цикла 1,6 с) и гармонической помехи. Здесь сверху вниз показаны осциллограммы:

- аддитивная смесь сигнала АЛСН и гармонической помехи на входе приемника АЛСН;
- сигнал на выходе полосового фильтра приемника;
- огибающая сигнала АЛСН на выходе вычитающего устройства;
- сигнал на выходе приемника АЛСН.

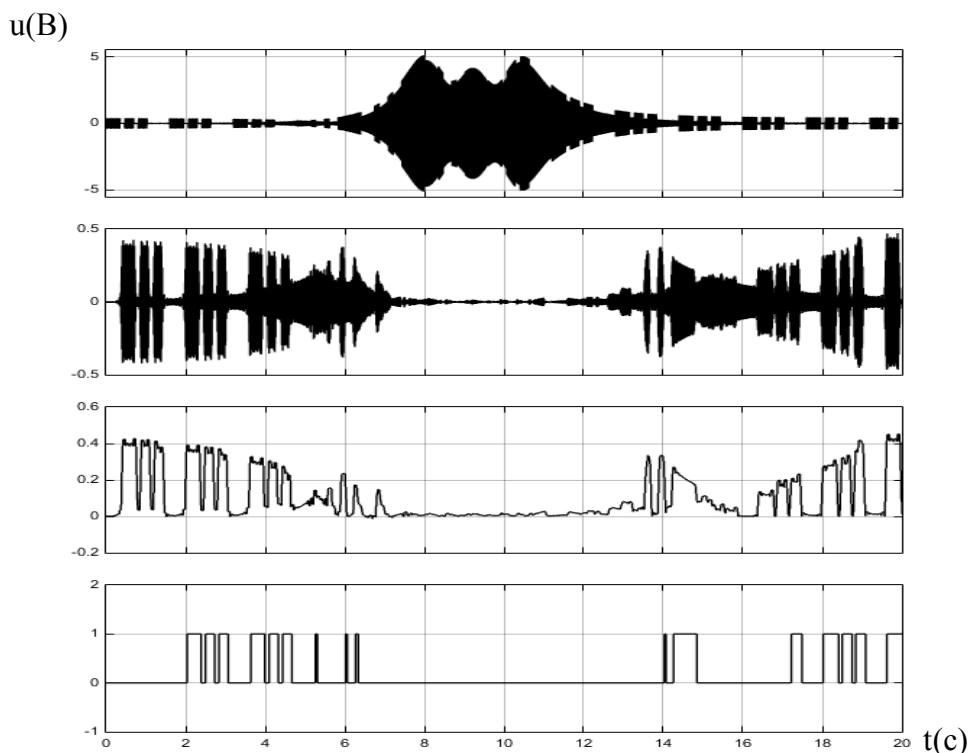


Рисунок 9 – Осциллограммы, показывающие процесс приема аддитивной смеси сигнала АЛСН и гармонической помехи

По осциллограммам, приведенным на рисунке 9, видно, что перерыв в приеме сигнала АЛСН составил около 13 с, или 8 циклов КК «З», что неминуемо вызовет сбой в работе АЛСН вида «З» – «Б».

Внешний вид модели корреляционного дешифратора (Блок КД) представлен на рисунке 10.

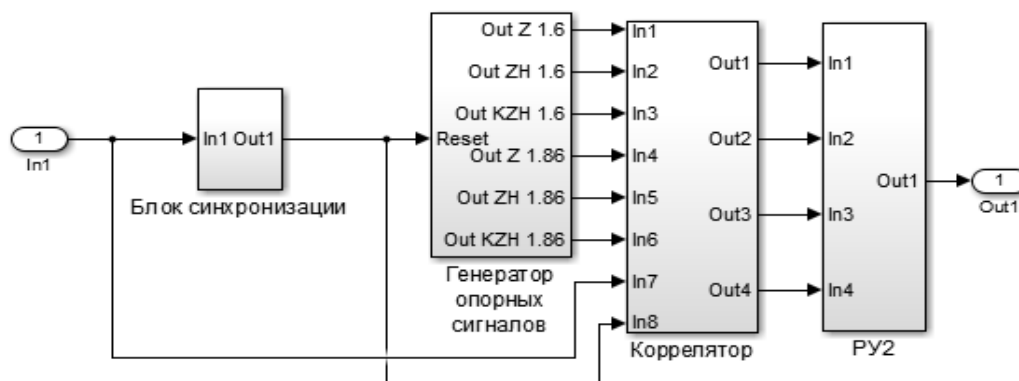


Рисунок 10 – Внешний вид имитационной модели корреляционного дешифратора (КД) сигналов АЛСН

Блок «КД» состоит из следующих блоков:

«Блок синхронизации» – блок, определяющий начало кодовой комбинации и формирующий синхроимпульсы для управления генератором опорных сигналов;

«Генератор опорных сигналов» – блок, формирующий шесть опорных сигналов (кодовые комбинации «З», «Ж» и «КЖ») для двух типов кодовых путевых трансмиттеров) по синхроимпульсам от блока синхронизации;

«Коррелятор» – блок, рассчитывающий значения коэффициентов корреляции принятого кодового сигнала АЛСН и опорных сигналов;

«РУ2» – блок (второе решающее устройство), принимающий решение о принятой кодовой комбинации по максимальному значению коэффициента корреляции [10].

На рисунке 11 показаны осциллограммы, демонстрирующие процесс приема и дешифрации сигнала АЛСН (КК «З» с длительностью цикла 1,6 с), полученные с помощью осциллографа «Scope1». Здесь сверху вниз показаны осциллограммы:

- аддитивная смесь сигнала АЛСН и гармонической помехи на входе приемника;
- огибающая сигнала АЛСН на выходе амплитудного детектора;
- сигнал АЛСН на выходе приемника;
- сигнал на выходе РУ2 корреляционного дешифратора.

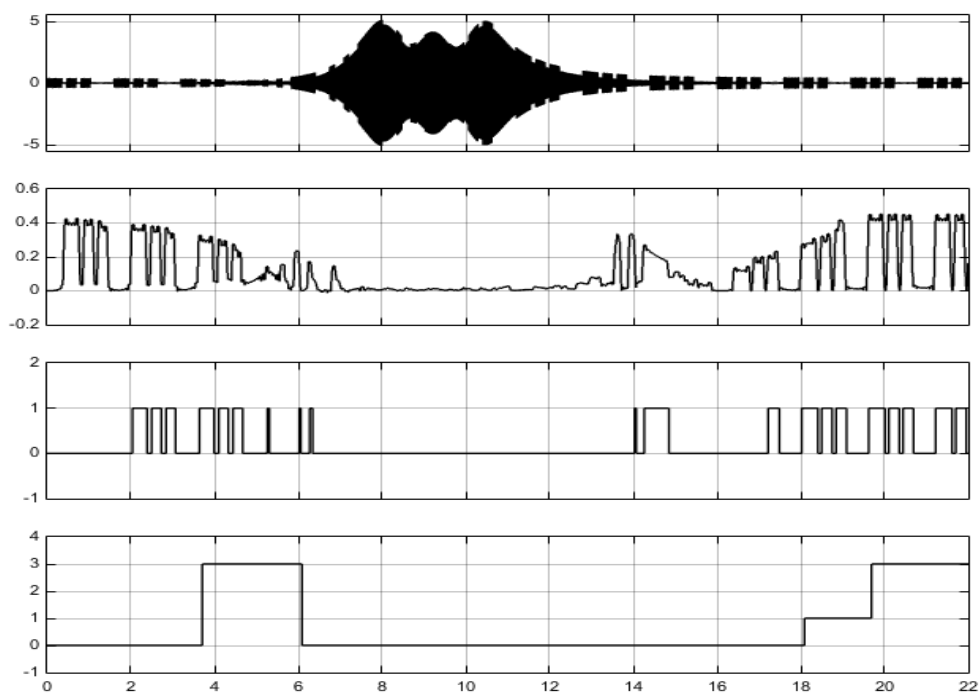


Рисунок 11 – Осциллограммы, демонстрирующие процесс приема и дешифрации сигнала АЛСН (КК «З» с длительностью цикла 1,6 с)

Из осциллограмм, приведенных на рисунке 11, видно, что процесс правильной дешифрации КК прерывается на 14 с, затем КД принимает решение о приеме КК «КЖ», а потом – о приеме КК «З».

Для оценки качества дешифрации сигналов могут использоваться различные показатели. Поскольку оценивается качество дешифрации сигналов в условиях действия помех, используемые показатели должны отражать способность приемного устройства с корреляционным дешифратором противостоять вредному действию гармонических помех.

Анализ осциллограмм, полученных в результате исследования, показал, что корреляционный дешифратор имеет ряд особенностей, обусловленных алгоритмом его функционирования.

Корреляционный дешифратор более уверенно распознает кодовые комбинации длительностью 1,6 с (вырабатываемые КТП-5), чем длительностью 1,86 с (вырабатываемые КПП-7) [10]. Это выражается в более коротком временном интервале нарушения нормальной работы АЛСН.

В целом эксперименты показали, что алгоритм корреляционной дешифрации КК АЛСН нуждается в совершенствовании для более уверенного дешифрирования КК, вырабатываемых трансмиттером КПТ-7.

Список литературы

1. Леушин, В. Б. Особенности каналов автоматической локомотивной сигнализации магистральных железных дорог : учебное пособие / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов. – Самара. : Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2007. – 115 с. – Текст : непосредственный.
2. Надежкин, В. А. Анализ новых систем интервального регулирования движения поездов / В. А. Надежкин, А. С. Хохрин, В. Б. Тепляков. – Текст : непосредственный // Образование – Наука – Производство : материалы всероссийской научно-практической конференции. – Чита : Забайкальский институт железнодорожного транспорта, 2020. – С. 169–173.
3. Сороко, В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справочник : в 2 кн. / В. И. Сороко, Е. Н. Розенберг. – Москва : Планета, 2000. – Кн. 2. – 1008 с. – Текст : непосредственный.
4. Леушин, В. Б. Анализ причин сбоев в системе АЛСН / В. Б. Леушин, К. Э. Блачев, Р. Р. Юсупов. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 4. – С. 20–25.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611979 Российская Федерация. Имитационная модель шестиканального корреляционного дешифратора кодовых комбинаций автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН : № 2021610997 : заявлено 29.01.2021 : опубликовано 09.02.2021 / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин, А. С. Хохрин. – Текст : непосредственный.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611860 Российская Федерация. Имитационная модель установки для исследования функционирования шестиканального корреляционного дешифратора кодовых комбинаций автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН : № 2021611102 : заявлено 29.01.2021 : опубликовано 08.02.2021 / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин, А. С. Хохрин. – Текст : непосредственный.
7. О корреляционной дешифрации кодовых комбинаций сигнала АЛСН / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин, А. С. Хохрин, А. Д. Солодова. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 1. – С. 302–306.
8. Анализ функционирования корреляционного дешифратора сигналов АЛСН в номинальных условиях эксплуатации / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин, А. С. Хохрин, А. Д. Солодова. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 1. – С. 306–310.
9. Анализ функционирования корреляционного дешифратора кодовых комбинаций АЛСН при искажении временных параметров сигналов / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин, А. С. Белоногов, А. С. Хохрин. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 1 (85). – С. 54–63.
10. Шилин, А. О. Анализ влияния импульсных помех на функционирование приемного устройства АЛСН с корреляционным дешифратором / А. О. Шилин, А. С. Хохрин, Р. Р. Юсупов. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 6 (90). – С. 40–50.

References

1. Leushin V. B., Iusupov R. R. *Osobennosti kanalov avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii magistral'nykh zheleznikh dorog: uchebnoe posobie* (Features of automatic locomotive signaling channels of mainline railways: textbook). Samara: Samara State Transport University Publ., 2007, 115 p.

2. Nadezhkin V. A., Khokhrin A. S., Teplakov V. B. Analysis of new systems of interval regulation of train traffic [Analiz novykh sistem interval'nogo regulirovaniia dvizheniia poezdov]. *Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo: materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Education – Science – Production: materials of the All-Russian Scientific and Practical conference). – Chita, 2020, pp. 169 – 173.

3. Soroko V. I., Rozenberg E. N. *Apparatura zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki: spravochnik: v 2 knigakh* (Railway automation and telemechanics equipment: reference book: in 2 books). Moscow: Planeta Publ., 2000, vol. 2, 1008 p.

4. Leushin V. B., Blachev K. E., Yusupov R. R. Analysis of the causes of failures in the ALSN system [Analiz prichin sboev v sisteme ALSN]. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, communications, computer science*, 2013, no. 4, pp. 20 – 25.

5. Yusupov R. R., Leushin V. B., Khokhrin A. S. *Certificate of state registration of the computer program 2021611979*, 09.02.2021.

6. Yusupov R. R., Leushin V. B., Khokhrin A. S. *Certificate of state registration of the computer program 2021611860*, 08.02.2021.

7. Yusupov R. R., Leushin V. B., Khokhrin A. S., Solodova A. D. On correlation decoding of ALSN signal code combinations [O korreliatsionnoi deshifratsii kodovykh kombinatsii signala ALSN]. *Nauka i obrazovanie transportu – Science and education for transport*, 2020, no. 1, pp. 302 – 306.

8. Yusupov R. R., Leushin V. B., Khokhrin A. S., Solodova A. D. Analysis of the functioning of the correlation decoder of ALSN signals under nominal operating conditions [Analiz funktsionirovaniia korreliatsionnogo deshifratora signalov ALSN v nominal'nykh usloviakh ekspluatatsii]. *Nauka i obrazovanie transportu – Science and education for transport*, 2020, no. 1, pp. 306 – 310.

9. Yusupov R. R., Leushin V. B., Belonogov A. S., Khokhrin A. S. Analysis of the functioning of the correlation decoder of ALSN code combinations with distortion of the time parameters of signals [Analiz funktsionirovaniia korreliatsionnogo deshifratora kodovykh kombinatsii ALSN pri iskazhenii vremennykh parametrov signalov]. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of transport of the Volga region*, 2021, no. 1 (85), pp. 54 – 63.

10. Shilin A. O., Khokhrin A. S., Iusupov R. R. Analysis of the effect of pulse interference on the functioning of the ALSN receiver with a correlation decoder [Analiz vliianiia impul'snykh pomekh na funktsionirovanie priemnogo ustroistva ALSN s korreliatsionnym deshifratorom]. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of transport of the Volga region*, 2021, no. 6 (90), pp. 40 – 50.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шилин Александр Олегович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», СамГУПС.

Тел.: +7 (996) 624-14-07.

E-mail: alex.shilin199@mail.ru

Хохрин Алексей Сергеевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», СамГУПС.

Тел.: +7 (987) 153-69-00.

E-mail: retturr24@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shilin Aleksandr Olegovich

Samara State Transport University (SSTU).

2 v Svoboda st., 443066 Samara, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Railway Electricity Supply», SSTU.

Phone: +7 (996) 624-14-07.

E-mail: alex.shilin199@mail.ru

Khokhrin Alexey Sergeevich

Samara State Transport University (SSTU).

2 v Svoboda st., 443066 Samara, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Automation, telemechanics and communication in railway transport», SSTU.

Phone: +7 (987) 153-69-00.

E-mail: retturr24@mail.ru

Юсупов Руслан Рифович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», СамГУПС.

Тел.: +7 (937) 172-90-64.

E-mail: ruskurs@rambler.ru

Yusupov Ruslan Riphovich

Samara State Transport University (SSTU).

2 v Svoboda st., 443066 Samara, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Docent, associate professor of the department «Automation, telemechanics and communication in railway transport», SSTU.

Phone: +7 (937) 172-90-64.

E-mail: ruskurs@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шилин, А. О. Исследование влияния гармонических помех от высоковольтной линии электропередачи на функционирование нелинейного приемного устройства автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа с корреляционным дешифратором / А. О. Шилин, А. С. Хохрин, Р. Р. Юсупов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 66 – 76.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shilin A. O., Khokhrin A. S., Yusupov R. R. Study of the effect of harmonic interference from a high voltage power line on the operation of a non-linear receiving device for continuous automatic locomotive signalling with a correlation decoder. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 4 (48), pp. 66 – 76 (In Russian).

УДК 621.336

М. С. Михайлов, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин

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

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИИ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Работа посвящена рассмотрению возможности применения композиционных материалов с алюминиевой матрицей в конструкции токоприемников электроподвижного состава. В настоящее время существует тенденция повышения скоростей движения электрического транспорта. Обеспечение надежного и экономичного токосъема в таких условиях может быть обеспечено путем снижения массы конструкции токоприемников, в том числе за счет применения композиционных материалов. Проанализированы возможность применения композиционных материалов в деталях и узлах токоприемников, работающих в условиях повышенных токовых нагрузок и при высоких скоростях движения, и механические характеристики традиционных материалов, используемых в конструкции каретки, и предлагаемых композиционных материалов. Разработана конструкция каретки скоростного электроподвижного состава, в которой в качестве конструкционного материала применен алюмоматричный композит. Произведен прочностной анализ с использованием метода конечных элементов в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation. Сравнение прочностных характеристик узлов кареток, выполненных из традиционных материалов и алюмоматричного композита, показало возможность снижения их массы в случае применения композита без снижения прочности элементов конструкции. Статическая характеристика каретки, в которой был применен композиционный материал, совпадает со статической характеристикой каретки, выполненной из традиционных материалов, что подтверждает возможность использования алюмоматричного композита без внесения значительных изменений в конструкцию каретки. Для оценки динамических характеристик композитной каретки и ее влияния на динамические характеристики токоприемника было проведено моделирование с использованием методов многофизического моделирования SOLIDWORKS Motion. Полученные результаты моделирования свидетельствуют об улучшении динамических характеристик при использовании композиционных материалов, что положительно влияет на качество токосъема.

Ключевые слова: высокоскоростной железнодорожный транспорт, токоприемник, композиционные материалы, алюмоматричные композиты, конечноэлементный анализ, многофизическое моделирование, компьютерное моделирование, контактное нажатие.

Mikhail S. Mikhailov, Oleg A. Sidorov, Alexandr N. Smerdin

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

USING OF ALUMINUM MATRIX COMPOSITE MATERIALS IN THE PARTS OF ELECTRIC RAILWAY VEHICLES CURRENT COLLECTORS

Abstract. *The work is devoted to the consideration of the possibility of using composite materials with an aluminum matrix in the design of electric transport pantographs. Currently, there is a tendency to increase the speeds of electric transport. This fact requires reliable and high-quality current collection, which can be achieved by reducing the mass of the current collector design, including through the use of composite materials. The possibility of using composite materials in parts and assemblies of current collectors operating under conditions of increased current loads and at high speeds of movement and the mechanical characteristics of the traditional ones used in the carriage design and the composite materials proposed for use are analyzed. The design of a carriage of high-speed electric rolling stock has been developed, in which an aluminum matrix composite material was used as a structural material. Statistical modeling using the finite element method in the SOLIDWORKS Simulation software package was performed. Comparison of the strength characteristics of carriage assemblies made of traditional materials and aluminum matrix composite showed the possibility of reducing their weight in the case of composite use without reducing the strength of structural elements. The static characteristic of the carriage in which the composite material was used coincides with the static characteristic of the carriage made of traditional materials, which confirms the possibility of using an aluminum matrix composite without making significant changes to the carriage design. To evaluate the dynamic characteristics of the composite carriage and its effect on the dynamic characteristics of the pantograph, modeling was carried out using the methods of multibody modeling of SOLIDWORKS Motion. The obtained simulation results indicate an improvement in dynamic characteristics when using composite materials, which has a beneficial effect on the reliability and quality of current collection.*

Keywords: *high speed rail transport, current collectors, composite materials, aluminum matrix composites, finite element analysis, multibody modeling, computer simulation, contact force.*

В настоящее время в мире сохраняется тенденция увеличения скоростей движения железнодорожного транспорта. В Германии, Японии, Франции, Китае и в других странах построены и эксплуатируются высокоскоростные железнодорожные магистрали, скорость движения на которых может достигать 350 км/ч. В России эксплуатируется высокоскоростная линия Москва – Санкт-Петербург с максимальной скоростью движения 250 км/ч. В условиях высоких скоростей движения особое значение имеет задача обеспечения надежного, экономичного и безаварийного токосяема [1 – 4]. Анализ работ, посвященных оптимизации процесса токосяема, показывает, что снижение массы элементов конструкции токоприемников положительно влияет на процесс токосяема [5, 6].

Одним из путей снижения массы токосяемных устройств является применение композиционных материалов (композитов), эксплуатационные характеристики которых значительно превосходят характеристики традиционных материалов ввиду меньшей плотности и достаточно высокой прочности. Поэтому применение композиционных материалов способно обеспечить улучшение динамических характеристик токоприемников.

Композиты представляют собой материал, который состоит из двух компонентов: матрицы и наполнителя. Их различные комбинации позволяют получить необходимые характеристики и свойства композиционного материала.

В зависимости от ориентации структуры композиционные материалы могут быть анизотропными (свойства различны в разных направлениях), изотропными (свойства одинаковы во всех направлениях) и квазиизотропными (анизотропны локально, но изотропны по всему объему).

Благодаря возможности подбора сочетаний различных показателей применение композитов является перспективным в конструкции токоприемников электрического транспорта (рисунков 1), где предъявляются высокие требования одновременно по низкой массе, достаточной прочности и высокой электропроводности элементов конструкции.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Применение композиционных материалов в качестве конструкционного материала возможно в системе подвижных рам токоприемников, контактных вставках, каретках, полозах, аэродинамических экранах, основании и др. [7 – 9].

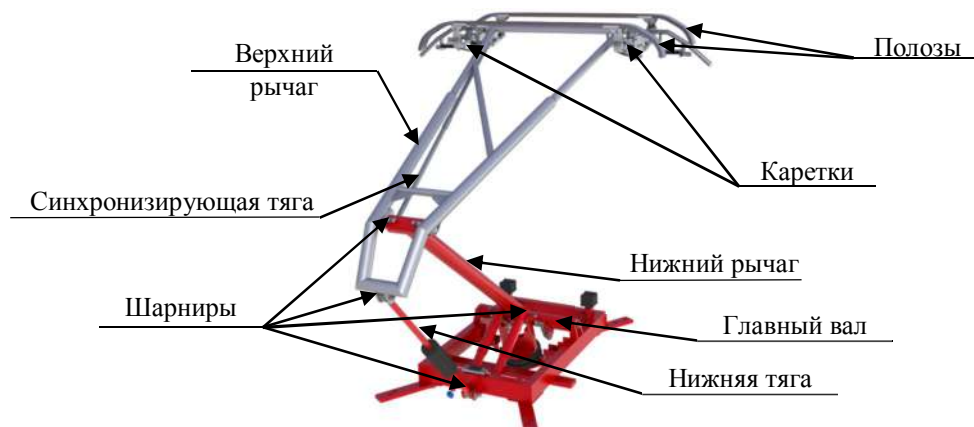


Рисунок 1 – Конструкция асимметричного токоприемника «Аист»

В данной работе рассмотрена возможность применения композитов в конструкции кареток токоприемника скоростного электрического транспорта, так как именно они во многом определяют динамические характеристики токоприемника и прямо влияют на его эксплуатационные характеристики.

На рисунке 2 изображена каретка токоприемника рычажной конструкции «Аист» [10]. Ее корпус и стойки для крепления полозов изготовлены из стального листа 30ХГС толщиной 2 мм, масса которых составляет 812 и 178 г соответственно. Цилиндры нажимного механизма выполнены из стали, их масса составляет 545 г. Верхний и нижний рычаги выполнены из алюминиевого сплава АМг6, масса каждого из которых составляет 236 г. Общая масса каретки составляет 3204 г. Механические характеристики традиционных конструкционных материалов, использованных при изготовлении каретки токоприемника, приведены в таблице 1.



Рисунок 2 – Каретка рычажной конструкции токоприемника «Аист»

Для использования в качестве токоведущих элементов представляют интерес композиты с металлической матрицей, поскольку они позволяют значительно улучшить свойства используемых металлических сплавов. Наибольший интерес представляют дисперсные металлматричные композиты, поскольку они изотропны, универсальны в применении и технология их изготовления достаточно проста. В качестве материала матрицы перспективно использование алюминия, поскольку он характеризуется малой плотностью и высокой электропроводностью. В качестве наполнителя могут быть использованы карбид кремния (SiC), углеродные нанотрубки (УНТ), карбид бора (B_4C), оксид алюминия (Al_2O_3), оксид титана и другие материалы [11, 12]. Однако электропроводность материалов для изготовления элементов каретки не

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

имеет решающего значения, так как ползотокоеприемника соединен с его рамой в обход каретки посредством медных шунтов, выполненных из провода МГГ с высокой электропроводностью.

Таблица 1 – Механические характеристики материалов

Материалы	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение, %
Традиционные материалы:					
сталь 30ХГС	7850	194	830	1080	10
АМг6	2640	71	180	350	18
Композиционные материалы:					
А6061 (Т6)	2700	69	260	320	12
А6061-15%SiC (Т6)	2769	91	342	364	3,2

На рисунке 3 изображены каретки токоприемника «Аист», выполненные из традиционных материалов и из алюмоматричного композита, который на рисунке выделен темно-серым цветом.

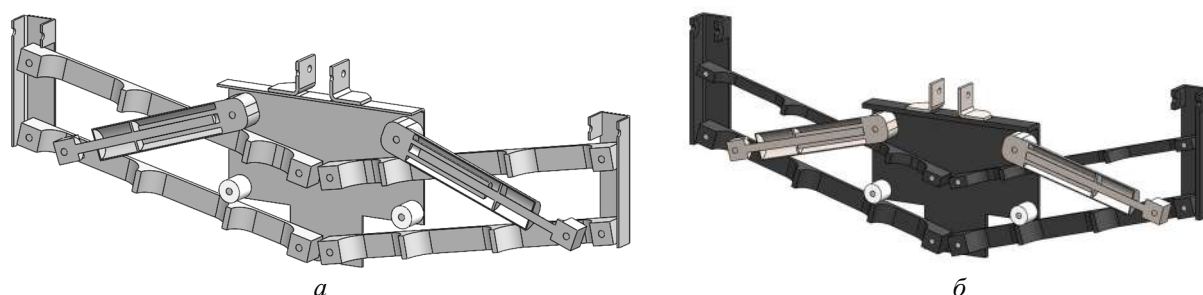


Рисунок 3 – Каретки токоприемника «Аист», выполненные из традиционных материалов (а) и из алюмоматричного композита (б)

Механические свойства алюмоматричных композитов во многом зависят от сплава, используемого в качестве материала матрицы. Поэтому рассмотрение механических свойств этих композитов необходимо проводить в сравнении с механическими свойствами материала матрицы. Плотность получаемых композитов сходна с плотностью материала матрицы и может быть вычислена по формуле:

$$\rho_k = \rho_m \cdot \phi_m + \rho_n \cdot \phi_n,$$

где ρ_m, ρ_n – плотность матрицы и наполнителя, кг/м³;
 ϕ_m, ϕ_n – объемная доля матрицы и наполнителя, %.

В таблице 1 представлены механические характеристики композиционного материала на основе алюминиевого сплава А6061 с наполнителем из карбида кремния, изготовленного методом литья под давлением, предлагаемого для замены традиционных материалов [13]. Анализ характеристик алюмоматричных композитов показывает, что они имеют большие значения пределов текучести и прочности, чем материал матрицы, но сниженную пластичность, что свидетельствует о повышении хрупкости материала. Рациональный подбор указанных выше показателей позволит уменьшить сечение деталей, изготовленных из алюмоматричных композитов и, соответственно, снизить массу конструкции.

Для анализа прочностных характеристик деталей каретки, выполненных из традиционных материалов и композита с алюминиевой матрицей, было произведено моделирование методом конечных элементов в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation.

Анализ статических и динамических характеристик каретки и токоприемника в сборе был проведен с использованием методов многотельного моделирования в программном комплексе

SOLIDWORKS Motion [14, 15]. Контактная подвеска была представлена в виде абсолютно жесткой синусоиды, генерирующей при движении амплитуду колебаний 10 мм. Частотный диапазон вертикальных воздействий со стороны подвески был принят от 0 до 2 Гц. Выбор данного частотного диапазона обусловлен ожидаемыми скоростями движения высокоскоростного электрического транспорта. Колебания токоприемника с частотой 2 Гц соответствуют прохождению двух пролетов контактной подвески в секунду, таким образом, при длине пролета 60 м скорость движения электроподвижного состава должна быть 430 км/ч. При моделировании момент на главном валу был принят постоянным (122 кН·м) и не зависящим от высотного положения ползца токоприемника.

В ходе конечно-элементного моделирования в состав модели были включены корпус, верхний и нижний рычаги, выполненные из композита A6061-15%SiC. Максимально допустимая сила растяжения, действующая на верхний рычаг, была равна 18 кН. На нижний рычаг действует изгибающая сила, максимально допустимая величина которой составила 3 кН. Поскольку применяемый композит A6061-15%SiC характеризуется большей прочностью, то его применение в качестве материала для изготовления верхнего и нижнего рычагов каретки позволило снизить их толщину с 20 мм до 11 мм и 14 мм соответственно и за счет снижения объема используемого материала снизить массу конструкции. Применение композита A6061-15%SiC в качестве материала для изготовления стоек и корпуса каретки потребовало увеличения их толщины с 3 до 5 мм ввиду меньшей прочности композиционного материала по сравнению со сталью 30ХГС. Снижение массы в данном случае обеспечивается меньшей плотностью композита по сравнению со сталью. На рисунке 4 приведен пример эпюры напряжений, получаемой при прочностном анализе методом конечных элементов. Характеристики элементов конструкции композитной каретки токоприемника, полученные в результате конечно-элементного моделирования, приведены в таблице 2. Таким образом, полученные в результате анализа данные показали, что замена деталей традиционных материалов в каретке на алюмоматричный композит позволяет снизить ее массу с 3,204 кг до 2,736 кг, т. е. на 14,6 %, при сохранении прочностных характеристик каретки токоприемника «Аист».

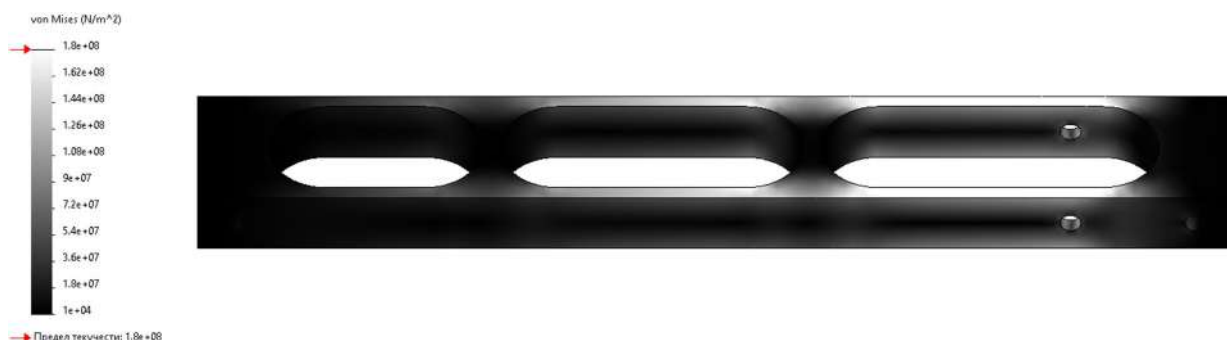


Рисунок 4 – Эпюра напряжений нижнего рычага каретки, полученная методом конечных элементов в SOLIDWORKS

Таблица 2 – Результаты конечно-элементного анализа

Элемент	Максимально допустимая сила, кН	Масса при применении традиционных материалов, г	Масса при применении композиционных материалов, г	Снижение массы, %
Верхний рычаг	18	236	133	43,6
Нижний рычаг:	3	236	170	28,0
корпус	45	812	720	11,3
стойка	18	178	162	9,0
Каретка в сборе	—	3204	2736	14,6

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Проведенный в среде SOLIDWORKS Motion анализ каретки позволил получить статическую и динамическую характеристики оригинальной и композитной кареток. На рисунке 5, а приведена зависимость статического нажатия одного рычага каретки (P_k) от хода каретки (h). Применение алюмоматричного композита не оказывает значительного влияния на статическую характеристику каретки, что подтверждает целесообразность его применения. Некоторое повышение контактного нажатия объясняется снижением влияния силы тяжести вследствие снижения массы элементов конструкции.

На рисунке 5, б приведена огибающая максимальных и минимальных значений контактного нажатия (P_{kk}) при частотах колебаний полоза токоприемника (f) в диапазоне 0 – 2 Гц с амплитудой колебаний 10 мм. Полученные в результате динамического анализа значения размаха контактного нажатия композитной каретки оказались меньше во всем диапазоне частот.

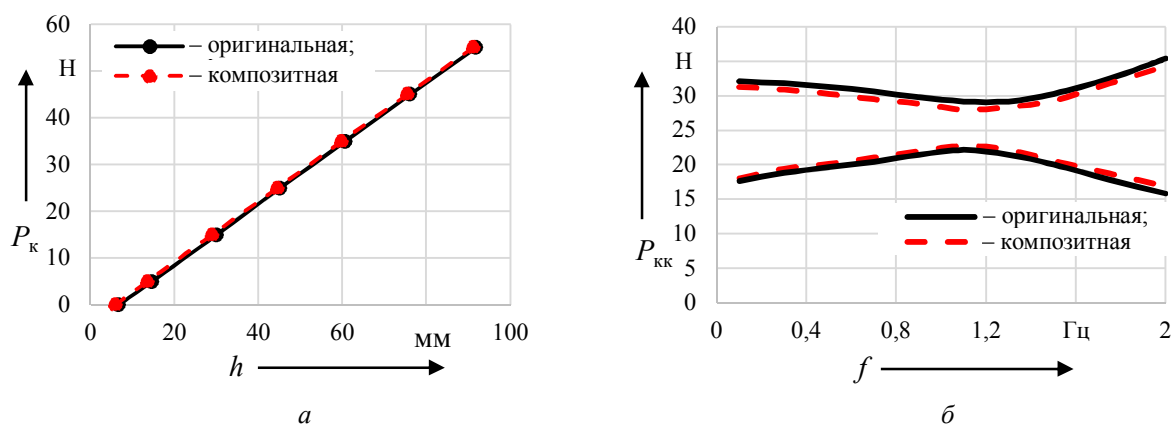


Рисунок 5 – Статическая (а) и динамическая (б) характеристики кареток, выполненных из традиционных и композиционных материалов

На рисунке 6 приведены огибающие максимальных и минимальных значений контактного нажатия ($P_{кт}$) в зависимости от частоты колебания (f) всего токоприемника. Результаты были получены с использованием модели токоприемника, описанной в статье [16]. Анализ показал, что применение облегченной композитной каретки позволит снизить размах величины контактного нажатия на 3,5 – 4 % по сравнению с кареткой, выполненной из традиционных материалов, что свидетельствует об улучшении динамической характеристики токоприемника.

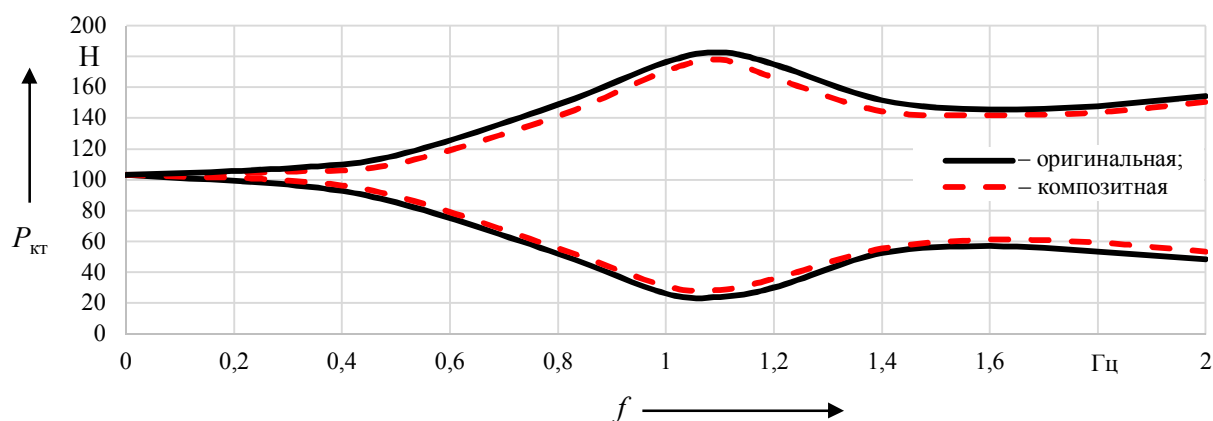


Рисунок 6 – Динамическая характеристика токоприемника с кареткой, выполненной из традиционных и композиционных материалов

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Для уменьшения массы элементов конструкции каретки токоприемника, выполненных из стали 30ХГС, может быть рекомендован алюмоматричный композиционный материал А6061-15%SiC с достаточной прочностью при меньшей плотности.

2. Применение алюмоматричного композита А6061-15%SiC придает каретке большую прочность по сравнению с алюминиевым сплавом АМг6 при сходной плотности и позволяет добиться облегчения элементов конструкции каретки токоприемника, выполненных из сплава алюминия АМг6, за счет снижения объема используемого материала.

3. Результаты прочностного анализа, выполненного методом конечных элементов, показали, что применение алюмоматричного композита в конструкции каретки токоприемника «Аист» позволит снизить ее массу на 14,6 %.

4. Результаты выполненного многотельного моделирования свидетельствуют об улучшении динамических характеристик токоприемника при использовании облегченной композитной каретки. Разброс максимальных и минимальных значений контактного нажатия уменьшился на 3,5 – 4 % по сравнению с аналогичными показателями токоприемника с традиционной кареткой, что позволит улучшить эксплуатационные характеристики системы токосъема за счет снижения износа контактных элементов токоприемника и контактного провода.

Список литературы

1. Bryja D., Hylński A. An influence of track stiffness discontinuity on pantograph base vibrations and catenary – pantograph dynamic interaction, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2020, vol.42 (2), pp.111 – 124.
2. Ambrósio J., Pombo J., Pereira M., Antunes P., Mósca A. A computational procedure for the dynamic analysis of the catenary-pantograph interaction in high-speed trains, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 50 (3), p. 681.
3. Sidorov O. A., Golubkov A. S., Goryunov V. N. Improvement of automatic control system for high-speed current collectors, *Journal of Physics: Conference Series*, Omsk: Institute of Physics Publishing, 2018, pp. 012108, DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012108.
4. Golubkov A., Ermachkov G., Smerdin A. [et al.]. Increasing the forecasting fidelity of current collection system operating capability by means of contact pressure simulation modelling, *E3S Web of Conferences*, Rostov-on-Don, 2020, pp. 03003, DOI 10.1051/e3sconf/202021703003.
5. Wang J., Ren C., Hong L. The construction parameter optimization of high-speed pantograph, *Journal of Physics: Conference Series*, Beijing: Institute of Physics Publishing, 2021, pp. 012094, DOI 10.1088/1742-6596/2025/1/012094.
6. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. Evaluation procedure of current collection system readiness at railway mainlines highspeed sections, *Vniizht Bulletin (Railway Research Institute Bulletin)*, 2012, no. 2, pp. 31 – 35.
7. Han M. G., Cho Y. H., Jeon S. W. [et al.]. Design and fabrication of a metal-composite hybrid pantograph upper arm by co-cure technique with a friction layer, *Composite Structures*, 2017, vol. 174, pp. 166 – 175, DOI 10.1016/j.compstruct.2017.04.041.
8. Mańka A., Hełka A., Ćwiek J. Influence of copper content on pantograph contact strip material on maximum temperature of railroad wire, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2020, vol. 106, pp. 97 – 105, DOI 10.20858/sjsutst.2020.106.8.
9. Fu X., Hu Y., Pan G. [et al.]. Effect of reinforcement content on the density, mechanical and tribological properties of Ti3SiC2/Al2O3 hybrid reinforced copper-matrix pantograph slide, *Science and Engineering of Composite Materials*, 2016, vol. 24(6), pp. 807 – 815, DOI 10.1515/secm-2015-0290.
10. Особенности конструкции инновационного магистрального токоприемника для условий Западно-Сибирской железной дороги / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин [и др.]. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч.-практ. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – С. 250–260.
11. Seetharaman S., Gupta M. Fundamentals of Metal Matrix Composites, *Encyclopedia of Materials: Composites*, edited by D. Brabazon, Elsevier, 2021, pp. 11 – 29.
12. Surappa M. K. Aluminium matrix composites: challenges and opportunities, *Sadhana*, 2003, vol. 28, pp. 319 – 334, DOI 10.1007/BF02717141.

13. Natrayan L., Senthil Kumar M. (2018). Study on Squeeze Casting of Aluminum Matrix Composites—A Review, *Advanced Manufacturing and Materials Science*, edited by K. Antony and J. P. Davim, Springer Nature, 2018, pp. 75 – 83.
14. Drugge L., Tobias L. A. Stensson. Modelling and simulation of catenary – pantograph interaction, *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 1999, vol. 33, pp. 490 – 501, DOI 10.1080/00423114.1999.12063106.
15. Massat J. P., Lautent Ch., Bianchi J. Ph. [et al.]. Pantograph catenary dynamic optimisation based on advanced multibody and finite element co-simulation tools, *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 2014, vol. 52, pp. 338 – 354, DOI 10.1080/00423114.2014.898780.
16. Голубков, А. С. Пути повышения эффективности систем автоматического регулирования нажатия токоприемников для высоких скоростей движения / А. С. Голубков, О. А. Сидоров, С. Н. Смердин. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2019. – № 78 (2). – С. 74–81. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-2-74-81.

References

1. Bryja D., Hylński A. An influence of track stiffness discontinuity on pantograph base vibrations and catenary – pantograph dynamic interaction, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2020, vol.42 (2), pp.111 – 124.
2. Ambrósio J., Pombo J., Pereira M., Antunes P., Mósca A. A computational procedure for the dynamic analysis of the catenary-pantograph interaction in high-speed trains, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 50 (3), p. 681.
3. Sidorov O. A., Golubkov A. S., Goryunov V. N. Improvement of automatic control system for high-speed current collectors, *Journal of Physics: Conference Series*, Omsk: Institute of Physics Publishing, 2018, pp. 012108, DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012108.
4. Golubkov A., Ermachkov G., Smerdin A. [et al.]. Increasing the forecasting fidelity of current collection system operating capability by means of contact pressure simulation modelling, *E3S Web of Conferences*, Rostov-on-Don, 2020, pp. 03003, DOI 10.1051/e3sconf/202021703003.
5. Wang J., Ren C., Hong L. The construction parameter optimization of high-speed pantograph, *Journal of Physics: Conference Series*, Beijing: Institute of Physics Publishing, 2021, pp. 012094, DOI 10.1088/1742-6596/2025/1/012094.
6. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. Evaluation procedure of current collection system readiness at railway mainlines highspeed sections, *Vniizht Bulletin (Railway Research Institute Bulletin)*, 2012, no. 2, pp. 31 – 35.
7. Han M. G., Cho Y. H., Jeon S. W. [et al.]. Design and fabrication of a metal-composite hybrid pantograph upper arm by co-cure technique with a friction layer, *Composite Structures*, 2017, vol. 174, pp. 166 – 175, DOI 10.1016/j.compstruct.2017.04.041.
8. Mańka A., Hełka A., Ćwiek J. Influence of copper content on pantograph contact strip material on maximum temperature of railroad wire, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2020, vol. 106, pp. 97 – 105, DOI 10.20858/sjsutst.2020.106.8.
9. Fu X., Hu Y., Pan G. [et al.]. Effect of reinforcement content on the density, mechanical and tribological properties of Ti3SiC2/Al2O3 hybrid reinforced copper-matrix pantograph slide, *Science and Engineering of Composite Materials*, 2016, vol. 24(6), pp. 807 – 815, DOI 10.1515/secm-2015-0290.
10. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zarenkov S. V., Golubkov A. S. Features of the design of an innovative main pantograph for the conditions of the West Siberian Railway [Osobennosti konstrukcii innovacionnogo magistral'nogo tokopriemnika dlya uslovij Zapadno-Sibirskoj zheleznoj dorogi]. *Innovacionnye proekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Innovative projects and new technologies in education, industry and transport: materials of the scientific and practical conference). – Omsk, 2012, pp. 250 – 260.
11. Seetharaman S., Gupta M. Fundamentals of Metal Matrix Composites, *Encyclopedia of Materials: Composites*, edited by D. Brabazon, Elsevier, 2021, pp. 11 – 29.

12. Surappa M. K. Aluminium matrix composites: challenges and opportunities, *Sadhana*, 2003, vol. 28, pp. 319 – 334, DOI 10.1007/BF02717141.

13. Natrayan L., Senthil Kumar M. (2018). Study on Squeeze Casting of Aluminum Matrix Composites—A Review, *Advanced Manufacturing and Materials Science*, edited by K. Antony and J. P. Davim, Springer Nature, 2018, pp. 75 – 83.

14. Drugge L., Tobias L. A. Stensson. Modelling and simulation of catenary – pantograph interaction, *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 1999, vol. 33, pp. 490 – 501, DOI 10.1080/00423114.1999.12063106.

15. Massat J. P., Lautent Ch., Bianchi J. Ph. [et al.]. Pantograph catenary dynamic optimisation based on advanced multibody and finite element co-simulation tools, *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 2014, vol. 52, pp. 338 – 354, DOI 10.1080/00423114.2014.898780.

16. Golubkov A. S., Sidorov O. A., Smerdin S. N. Ways to improve the efficiency of automatic control systems of pressing current collectors for railway service of high speeds [Puti povysheniia effektivnosti sistem avtomaticheskogo regulirovaniia nazhatiia tokopriemnikov dlia vysokikh skorostei dvizheniia]. *Vestnik VNIIZhTa – VNIIZHT Scientific Journal*, 2019, vol. 78 (2), pp. 74 – 81.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михайлов Михаил Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: mikhailovms54@gmail.com

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Смердин Александр Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: egt@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Михайлов, М. С. Применение алюмоматричных композиционных материалов в конструкции токоприемников электроподвижного состава / М. С. Михайлов, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 76 – 84.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhailov Mikhail Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: mikhailovms54@gmail.com

Sidorov Oleg Aseksseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, professor of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Smerdin Alexandr Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, head of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: egt@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mikhailov M. S., Sidorov O. A., Smerdin A. N. Using of aluminum matrix composite materials in the parts of electric railway vehicles current collectors. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 4 (48), pp. 76 – 84 (In Russian).

А. С. Вильгельм, В. И. Иванченко, А. А. Комяков, А. А. Штраухман

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПО КРИТЕРИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Аннотация. В статье рассматривается вопрос повышения энергоэффективности электровозов постоянного и переменного тока, эксплуатируемых на предприятиях ОАО «РЖД». Проанализированы и кратко рассмотрены основные цели и задачи программы развития и энергетической стратегии ОАО «РЖД». В соответствии с данными задачами обоснована актуальность научных исследований в области повышения энергоэффективности электровозов. Проанализированы актуальные данные по тяговому подвижному составу, по современным системам управления тяговыми ресурсами и по российским и зарубежным научным исследованиям в области энергоэффективности. В результате анализа установлено, что большинство исследований направлено на изучение влияния ключевых эксплуатационных факторов на показатели энергоэффективности, т. е. в данном случае на удельный расход электроэнергии на тягу поездов. Однако слабо изучен обратный вопрос – подбор массы состава и технической скорости на основе предварительной оценки удельного расхода электроэнергии на тягу поездов путем анализа статистических данных поездок на определенном участке железной дороги. Целью данного исследования является оценка возможности и разработка способа определения оптимальных значений ключевых параметров эксплуатации грузовых электровозов для достижения применительно к ним максимальной эффективности эксплуатации по критерию энергоэффективности. Были созданы две модели в программе «Комплекс расчетов тягового электроснабжения» (КОРТАС) – для электровозов постоянного и переменного тока, описывающие зависимость показателя энергоэффективности (удельного расхода электроэнергии) от эксплуатационных показателей, таких как масса состава и техническая скорость. Исходные данные для дальнейшего моделирования были получены при моделировании поездок на условном участке.

Ключевые слова: энергоэффективность, тяга поездов, электровозы постоянного тока, электровозы переменного тока, тяговый подвижной состав, электроподвижной состав, анализ данных, имитационное моделирование, КОРТАС.

Aleksandr S. Vilgelm, Vladimir I. Ivanchenko, Aleksandr A. Komyakov,
Aleksandr A. Shtraukhman

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

DETERMINATION OF ELECTRIC ROLLING STOCK OPERATIONAL INDICATORS OPTIMAL VALUES ACCORDING TO THE CRITERION OF ENERGY EFFICIENCY

Abstract. The article deals with the issue of improving the energy efficiency of DC and AC electric locomotives operated at the enterprises of JSC «Russian Railways». The main goals and objectives of the development program and energy strategy of JSC «Russian Railways» are analyzed and briefly considered. In accordance with these tasks, the relevance of scientific research in the field of improving the energy efficiency of electric locomotives is substantiated. The current data on traction rolling stock, on modern traction resource management systems and on Russian and foreign scientific research in the field of energy efficiency are analyzed. As a result of the analysis, it was found that most of the studies are aimed at studying the influence of key operational factors on energy efficiency indicators, so, in this case, on the specific power consumption for train traction. However, the reverse question has been poorly studied – the selection of the train mass and the technical speed on the basis of a preliminary assessment of the specific power consumption for train traction by analyzing the statistical data of trips on a certain section of the railway. The purpose of this study is to assess the possibility and develop a method for determining the optimal values of the key parameters of the operation of electric freight locomotives in order to achieve maximum operational efficiency in relation to them according to the criterion of energy efficiency. Two models were created in the program «Complex of calculations of traction power supply» (CORTES) – for DC and AC electric locomotives, describing the dependence of the energy efficiency indicator (specific power consumption for train traction) on operational indicators, such as the train mass and the technical speed. The initial data for further modeling were obtained by modeling trips on a conditional site.

Keywords: energy efficiency, train traction, DC electric locomotives, AC electric locomotives, traction rolling stock, electric rolling stock, data analysis, simulation modeling, CORTES.

В компании ОАО «РЖД» ежегодно формируется и реализуется Программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности. В частности, в настоящее время указанная программа реализуется в рамках Энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [1].

В соответствии с долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» по ключевому направлению повышения эффективности планируется снижение себестоимости железнодорожных перевозок [2].

Следует отметить также, что одними из основных задач в стратегии развития ОАО «РЖД» являются значительное повышение производственной эффективности тяги поездов и переход в ближайшем будущем к цифровизации железнодорожного транспорта.

Актуальной проблемой, стоящей перед ОАО «РЖД» и в целом перед железнодорожным транспортом, является увеличивающийся рост энергетической составляющей в общих эксплуатационных расходах. Наличие указанной проблемы обуславливает необходимость продолжения научных исследований, связанных с повышением энергоэффективности подвижного состава. В этом вопросе известны исследования, направленные на изучение влияния различных факторов на удельный расход электроэнергии на тягу поездов.

Так, широко известны расходные энергетические характеристики электровозов [3], позволяющие оценить удельный расход электроэнергии поезда с грузовым составом различной массы при движении по прямолинейному и горизонтальному участку пути. Указанные зависимости представлены в виде кривых, которые показывают, что с ростом технической скорости и с уменьшением массы состава наблюдается увеличение удельного расхода электроэнергии. В статье [4] приведены статистические данные для участка Входная – Московка – Барабинск, которые демонстрируют схожий характер зависимости удельного расхода электроэнергии на тягу поездов от указанных факторов. Следует отметить, что рассмотренный в данной статье участок характеризуется сравнительно легким профилем пути, вследствие чего результаты хорошо коррелируют с расходными энергетическими характеристиками. В ОАО «РЖД» для анализа и планирования расхода электроэнергии на тягу поездов используется методика, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» № 512 от 26.12.2014, согласно которой коэффициент влияния средней массы состава (поезда) на удельный расход электроэнергии всегда принимает отрицательные значения, а коэффициент влияния технической скорости – положительные, что совпадает с исследованиями [3, 4]. Для данных условий задача поиска оптимального значения эксплуатационных показателей с точки зрения энергоэффективности не имеет смысла, так как оптимальные оценки будут соответствовать максимизации массы состава и минимизации технической скорости.

С другой стороны, известно множество исследований, которые свидетельствуют о противоположном характере влияния указанных факторов на удельный расход электроэнергии на тягу поездов. Так, в монографии [5] авторы сравнивают удельный расход электроэнергии на тягу поездов при пропуске пакетов поездов массой 6300 – 6300 – 6300 т и 6300 – 9000 – 6300 т; при этом при использовании локомотивов 1,5ВЛ11 и стабилизированном напряжении на тяговой подстанции 3,5 кВ удельный расход электроэнергии на тягу поездов во втором случае оказался на 1,9 % выше, чем в первом. Рассмотренный в монографии [5] участок Екатеринбург-Сортировочный – Шаля характеризуется тяжелым профилем пути. Результаты экспериментов, приведенные в работе [6], показали, что для холмистого участка железной дороги увеличение технической скорости поездов с электровозами ВЛ80 привело к снижению расхода электроэнергии на тягу.

Таким образом, наблюдается некоторая противоречивость известных результатов исследований. Авторы выдвигают гипотезу о том, что характер зависимостей удельного расхода электроэнергии на тягу поездов от массы состава и технической скорости в значительной мере определяется профилем пути, при этом для тяжелых профилей возможны одна глобальная или несколько локальных оптимальных по критерию энергоэффективности оценок эксплуата-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ционных показателей. Определение этих оценок позволит усовершенствовать процесс управления показателями перевозочной работы электроподвижного состава для достижения заданного уровня энергоэффективности.

Цель данного исследования – оценка возможности и разработка способа определения оптимальных значений ключевых показателей эксплуатации грузовых электропоездов для достижения применительно к ним максимальной эффективности эксплуатации по критерию энергоэффективности.

Использование экспериментальных данных из маршрутов машинистов для формирования обучающих выборок в контексте решаемой задачи нецелесообразно, так как они в большинстве случаев содержат значительное количество ошибок, которые следует квалифицировать как промахи [7], поэтому в процессе исследования была сформирована модель, основанная на результатах тяговых расчетов, выполняемых в соответствии с требованиями Правил... [8] в программном комплексе «КОРТЭС», который позволяет провести тяговые расчеты для электропоездов как постоянного, так и переменного тока на условном участке со сложным профилем пути.

С помощью программного комплекса «КОРТЭС» были проведены 81 тяговый расчет для электропоезда переменного тока ВЛ80 и 74 тяговых расчета для электропоезда постоянного тока 2ЭС6. В качестве влияющих факторов для электропоезда ВЛ80 было выбрано два показателя: масса состава в диапазоне 1500 – 5500 т и техническая скорость в диапазоне 15,6 – 75,6 км/ч. Аналогичные показатели для электропоезда 2ЭС6 составили 1500 – 5000 т и 16,8 – 75,7 км/ч соответственно. Моделирование осуществлялось без учета энергии рекуперативного торможения. Результаты имитационного моделирования позволили сформировать выборку исходных данных для последующего формирования регрессионной модели.

Полученные в ходе тяговых расчетов данные и результаты расчета удельного расхода электроэнергии на тягу поездов в случае электропоезда ВЛ80 были сведены в таблицу Excel [9] и частично представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования в программе «КОРТЭС» для электропоезда ВЛ80

Масса состава m , кг	Техническая скорость V , км/ч	Расход электроэнергии на тягу поездов w , кВт · ч	Тонно-километровая работа A , 10^4 ткм брутто	Удельный расход электроэнергии на тягу поездов w_p , кВт · ч/ 10^4 ткм брутто
1500	59,1	4036	22,1	182,9
1500	70,8	4138	22,1	187,5
1500	74	4154	22,1	188,2
1500	75,4	4192	22,1	190
1500	75,6	4206	22,1	190,6
1500	66,2	4218	22,1	191,2
1500	50,8	4238	22,1	192,1
1500	40,9	4315	22,1	195,6
...	...	...	...	...
5500	44	13042	80,9	161,2
5500	46,4	13061	80,9	161,4
5500	48,9	13093	80,9	161,8
5500	39,8	13209	80,9	163,3
5500	36	13334	80,9	164,8
5500	31,4	13368	80,9	165,2
5500	26,3	14148	80,9	174,9

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На основе полученных данных был построен график зависимости удельного расхода электроэнергии на тягу поездов от массы состава и технической скорости для электровоза ВЛ80 (рисунок 1).

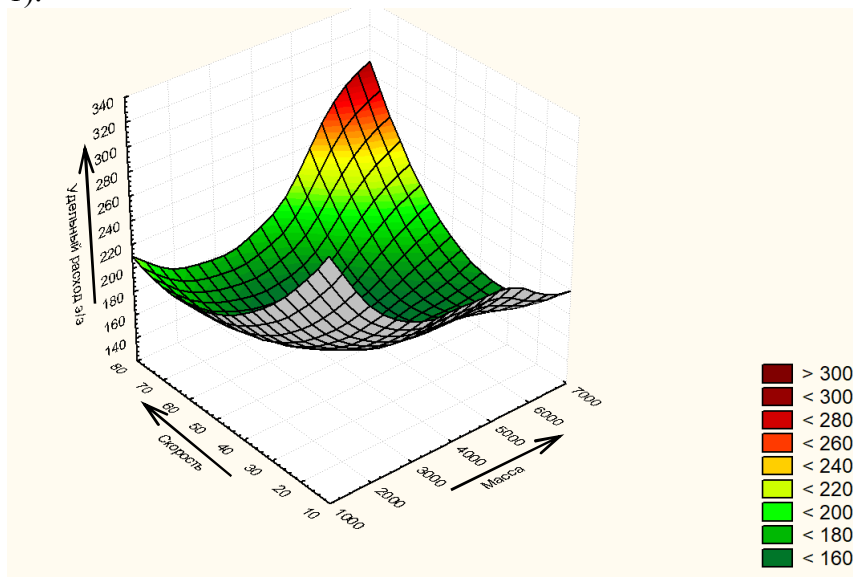


Рисунок 1 – Трехмерный график зависимости удельного расхода электроэнергии на тягу поездов от массы состава и технической скорости для электровоза ВЛ80

Как видно из графика, представленного на рисунке 1, экстремум функции удельного расхода электроэнергии на тягу поездов в случае электровоза ВЛ80 находится в пределах значений от 145 до 150 кВт · ч/10⁴ ткм брутто, а соответствующие диапазоны значений массы состава – от 4000 до 4500 т, технической скорости – от 55 до 60 км/ч.

Аппроксимация полученной выборки выполнена методом наименьших квадратов. В результате получена следующая функция:

$$w_p(V, m) = 334,710 - 0,0370 \cdot m - 3,662 \cdot V + 0,00000424 \cdot m^2 + 0,0319 \cdot V^2. \quad (1)$$

Подставив в функцию (1) значения массы состава и технической скорости из таблицы 1, получим график сходимости для электровоза ВЛ80, представленный на рисунке 2.

Для упрощения анализа графиков здесь и далее значения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов отсортированы в порядке возрастания.

Средняя относительная погрешность полученной модели составила 3,4 %, что позволяет говорить об удовлетворительной сходимости исходных данных модели из программы «КОРТЭС» и данных, полученных по уравнению (1) регрессионной модели.

Для определения экстремума функции (1) использован классический математический аппарат, подразумевающий вычисление частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial w_p}{\partial m} = -0,037 + 2 \cdot 0,00000424 \cdot m; \\ \frac{\partial w_p}{\partial V} = -3,662 + 2 \cdot 0,0319 \cdot V. \end{cases} \quad (2)$$

Решив систему уравнений (2), получаем:

$$m = 4363 \text{ т}; \quad V = 57,4 \frac{\text{км}}{\text{ч}}; \quad w_p = 149 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{10^4} \text{ ткм брутто}. \quad (3)$$

Для определения типа экстремума (минимум или максимум) вычисляются частные производные второго порядка:

$$A = \frac{\partial^2 w_p}{\partial m^2} = 0,00000848; \quad B = \frac{\partial^2 w_p}{\partial m \partial V} = 0; \quad C = \frac{\partial^2 w_p}{\partial V^2} = 0,0638. \quad (4)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Так как $A \cdot C - B^2 > 0$, то в исследуемой точке, характеризуемой значениями (3), наблюдается минимум функции (1).

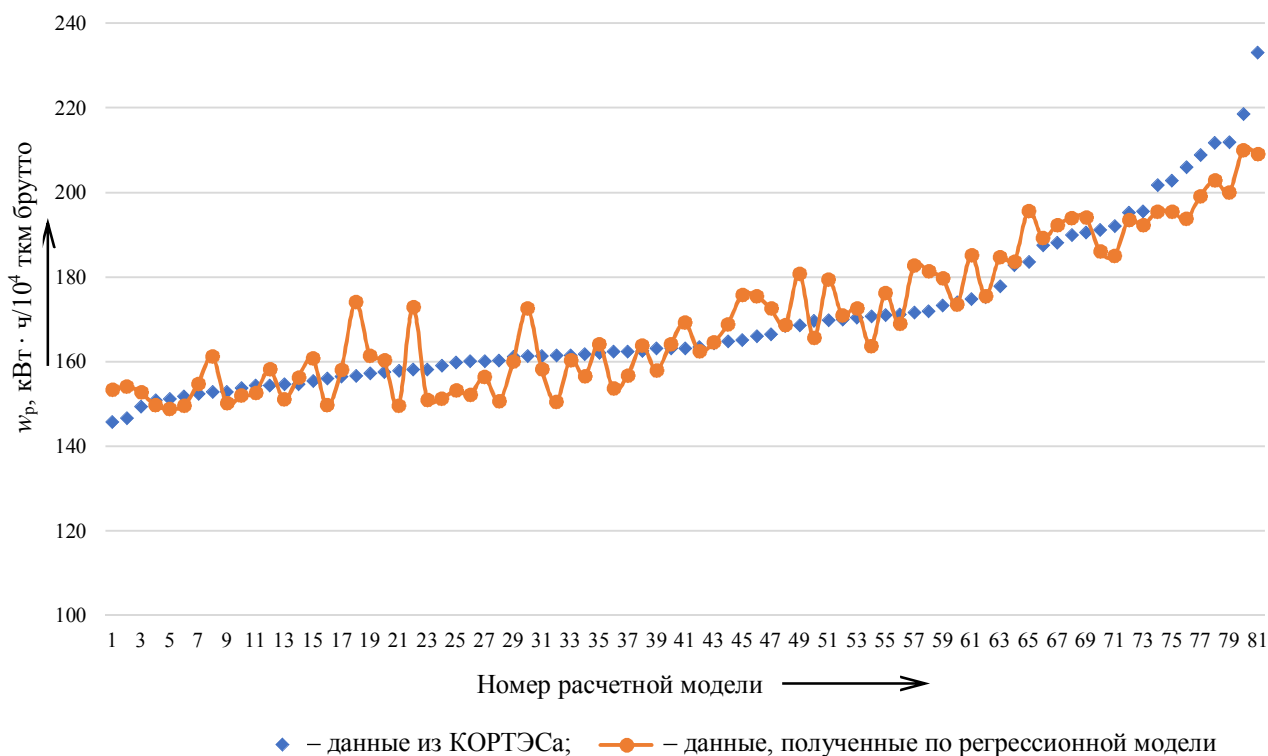


Рисунок 2 – График сходимости значений удельного расхода электроэнергии на тягу поездов w_p , смоделированных в программе «КОРТЭС», и результатов математического моделирования (точки) для электровоза ВЛ80

Далее в программе «КОРТЭС» было проведено моделирование работы электровоза 2ЭС6 на том же сложном участке пути. Полученные в ходе тяговых расчетов данные и результаты расчета удельного расхода электроэнергии на тягу поездов в случае электровоза 2ЭС6 были сведены в таблицу Excel и частично представлены таблице 2.

Таблица 2 – Результаты моделирования в программе «КОРТЭС» для электровоза 2ЭС6

Масса состава m , кг	Техническая скорость V , км/ч	Расход электроэнергии на тягу поездов w , кВт · ч	Тонно-километровая работа A , 10^4 ткм брутто	Удельный расход электроэнергии на тягу поездов w_p , кВт · ч/ 10^4 ткм брутто
1500	37,3	3874	22,1	175,6
1500	43,6	3876	22,1	175,7
1500	49,1	3897	22,1	176,6
1500	54,2	3937	22,1	178,4
1500	59,7	4004	22,1	181,5
1500	68,8	4121	22,1	186,7
1500	72	4170	22,1	189,0
1500	75,7	4243	22,1	192,3
...	...	...	...	...
5000	16,8	16380	73,6	222,7
5000	18,6	16171	73,6	219,9
5000	22,7	15128	73,6	205,7
5000	24,4	15115	73,6	205,5
5000	25,9	15040	73,6	204,5
5000	29,8	14403	73,6	195,8
5000	32,7	14130	73,6	192,1

На основе полученных данных был построен график зависимости удельного расхода электроэнергии на тягу поездов от массы состава и технической скорости для электровоза 2ЭС6 (рисунок 3).

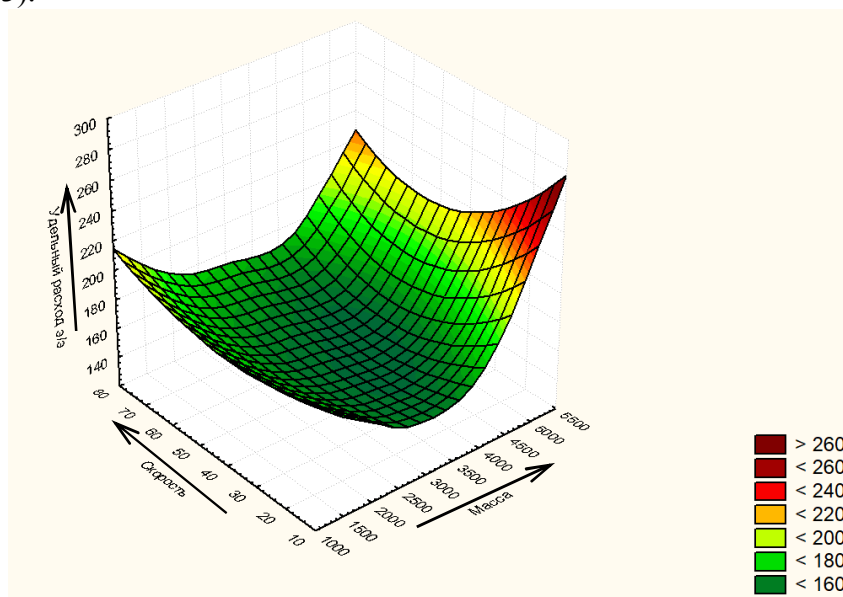


Рисунок 3 – Трехмерный график зависимости удельного расхода электроэнергии на тягу поездов от массы состава и технической скорости для электровоза 2ЭС6

Как видно из графика, представленного на рисунке 3, экстремум функции удельного расхода электроэнергии на тягу поездов для электровоза 2ЭС6 находится в пределах значений от 140 до 145 кВт · ч/10⁴ ткм брутто, а соответствующие пределы значений массы состава – от 3000 до 4000 т, технической скорости – от 40 до 50 км/ч.

На основе функции корреляционно-регрессионного анализа в программе Statistica [10] были получены значения коэффициентов для функции (3). Данные коэффициенты говорят о том, что полученная регрессионная математическая модель характеризует зависимость изучаемого показателя – удельного расхода электроэнергии на тягу поездов – от исследуемых факторов – массы состава и технической скорости:

$$w_p(V, m) = 331,17 - 0,07 \cdot m - 2,96 \cdot V + 0,000011 \cdot m^2 + 0,03 \cdot V^2. \quad (5)$$

Подставив в функцию (5) значения массы состава и технической скорости из таблицы 3, получим график сходимости для электровоза 2ЭС6, представленный на рисунке 4.

Здесь, как и в предыдущем случае, наблюдается удовлетворительная сходимость данных модели из программы «КОРТЭС» и данных, полученных по уравнению (5) регрессионной модели, со средней относительной погрешностью 3,5 %.

Аналогично расчетам по ВЛ80 был определен минимум функции (5) для электровоза 2ЭС6:

$$m = 3227 \text{ т}; \quad V = 49,4 \frac{\text{км}}{\text{ч}}; \quad w_p = 143,49 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм брутто}. \quad (6)$$

На основе полученных результатов математического моделирования удельного расхода электроэнергии на тягу поездов на примере электровоза ВЛ80 построено семейство кривых, характеризующих зависимость $w_p(V)$ при различных массах состава m (рисунок 5).

Данные графиков рисунка 5 позволяют по заданному значению удельного расхода электроэнергии на тягу поездов выбирать оптимальные значения технической скорости и массы состава.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

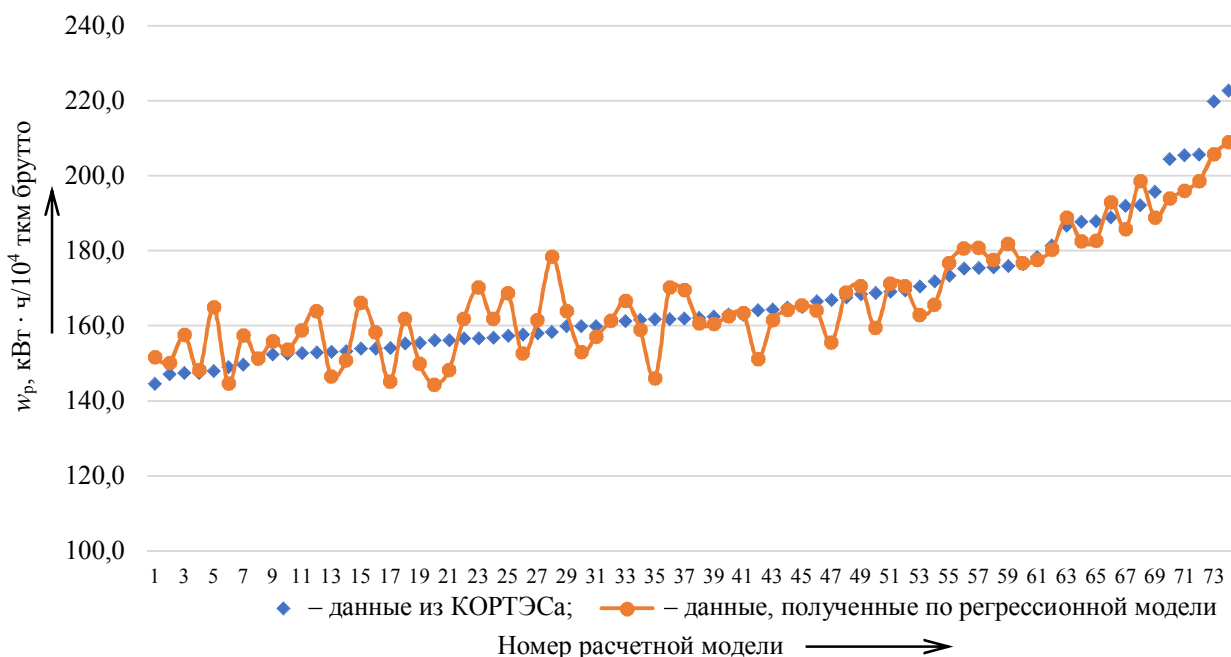


Рисунок 4 – График сходимости значений удельного расхода электроэнергии на тягу поездов w_p , смоделированных в программе «КОРТЭС», и результатов математического моделирования (точки) для электровоза 2ЭС6

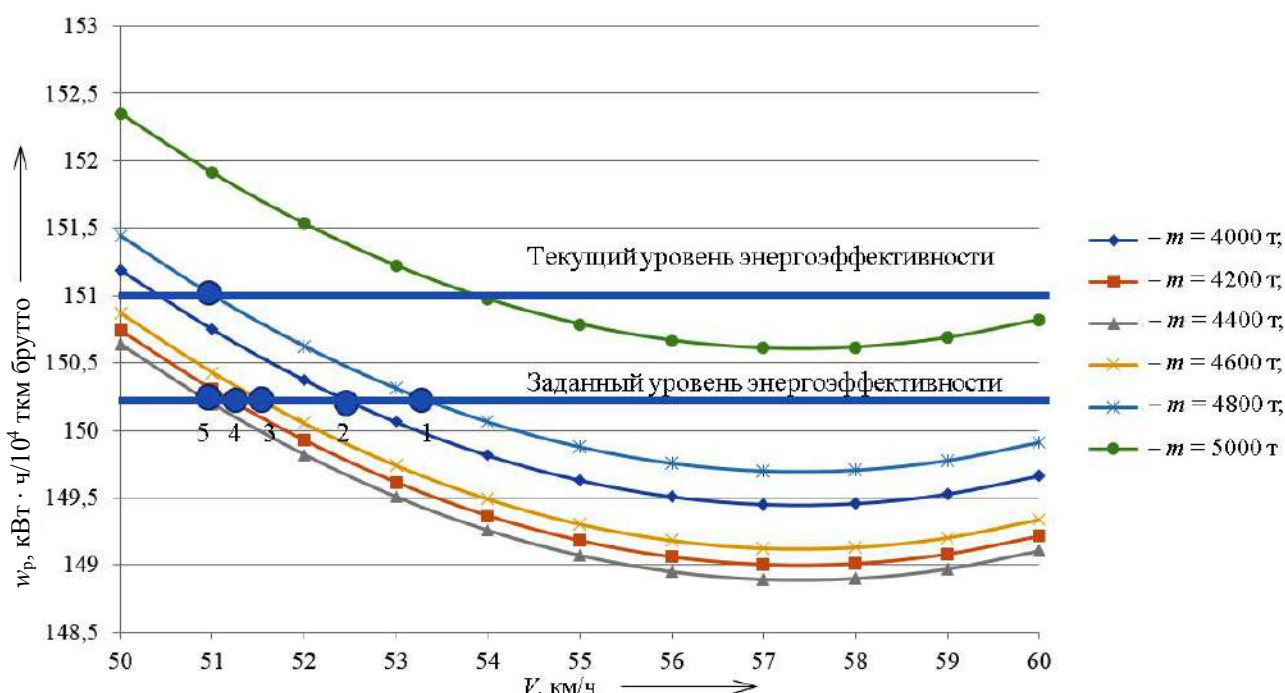


Рисунок 5 – Графики зависимости удельного расхода электроэнергии на тягу поездов от технической скорости $w_p(V)$ при различных значениях массы состава m для электровоза ВЛ80

Допустим, что текущий уровень энергоэффективности, т. е. показатель удельного расхода электроэнергии на тягу поездов, составляет $151 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм брутто}$. При этом средняя масса состава 4800 т , а техническая скорость – 51 км/ч . Если будет поставлена задача снизить удельный расход электроэнергии на тягу поездов на $0,5 \%$ (до значения $150,25 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/10^4 \text{ ткм брутто}$), то для ее решения можно воспользоваться представленными на рисунке 5 графиками.

Рассмотрим несколько альтернативных вариантов, которые возможны в данном примере:

- 1) при сохранении текущей массы состава увеличить техническую скорость до 53,2 км/ч;
- 2) снизить массу состава до 4000 т и увеличить техническую скорость до 52,5 км/ч;
- 3) снизить массу состава до 4600 т и увеличить техническую скорость до 51,4 км/ч;
- 4) снизить массу состава до 4200 т и увеличить техническую скорость до 51,2 км/ч;
- 5) снизить массу состава до 4400 т при сохранении технической скорости на уровне 51 км/ч.

Очевидно, что в данном случае лучшим решением будет вариант 1, позволяющий увеличить провозную и пропускную способности участка со снижением показателя удельного расхода электроэнергии на тягу поездов, т. е. с повышением уровня энергоэффективности.

В более сложных случаях для выбора наилучшего альтернативного варианта показателей эксплуатации грузовых электровозов можно использовать критерии Гурвица или Парето [11 – 14].

Полученные в результате проведенных исследований поверхности (см. рисунки 1 и 3) и их математическое описание, характеризующие зависимость удельного расхода электроэнергии на тягу поездов электровозами постоянного и переменного тока от массы состава и технической скорости движения поезда, имеют один экстремум, показывающий минимум по критерию энергоэффективности, которым является определенное значение удельного расхода электроэнергии на тягу поездов. Такие результаты отличаются от известных расходных энергетических характеристик электроподвижного состава и объясняются более широким диапазоном принятых к расчету аргументов функции. Например, если анализировать расходные энергетические характеристики электровозов при их работе на прямолинейном и горизонтальном пути [3], то величина удельного расхода электроэнергии на тягу поездов вероятнее всего будет снижаться при росте массы состава и подобная зависимость будет выдерживаться во всем анализируемом диапазоне масс (вплоть до 10 000 т). Если продолжить исследования, то для больших масс состава появится некая «точка» (экстремум) функции, после которой произойдет рост удельного расхода электроэнергии на тягу поездов. Если исследовать расходные энергетические характеристики для того же электровоза с теми же массами состава, но на участке с более сложным профилем пути, то такая «точка» (экстремум) функции будет обнаружена уже в исследованном диапазоне (т. е. до 10 000 т), что согласуется с полученными результатами исследования.

Наличие таких экстремумов (не очевидных и не определяемых на основании классических теорий тяги) обусловлено и самой природой электроподвижного состава, кривые коэффициента полезного действия которого также имеют форму с ярко выраженными экстремумами в области токовых нагрузок электровоза, близких к оптимальным по его наличной мощности. Вычисление таких экстремумов с одной стороны важно для определения оптимальных параметров эксплуатационной работы (аргументов целевой функции). С другой стороны, этот вопрос представляет собой нетривиальную задачу, поскольку сама форма кривых (или поверхностей) будет отличаться в зависимости от числа анализируемых аргументов, характеристик профиля пути, серий электровозов и т. д.

Следует отметить, что критерий энергоэффективности не может являться единственным показателем системы управления тяговыми ресурсами. Безусловно, большое значение имеют существующие и перспективные грузопотоки по направлениям, финансовые и временные затраты на изменение составности поезда, значения участковой скорости и т. д. Учет этих факторов является тематикой дальнейших исследований авторов.

Кроме того, в качестве направлений дальнейшего развития методологии определения оптимальных значений эксплуатационных показателей электроподвижного состава по критерию энергоэффективности могут рассматриваться следующие:

моделирование поездок по разным участкам с разными локомотивами и в разных условиях с целью формирования исходных выборок большего объема для последующего моделирования;

учет большего числа влияющих факторов и информативных признаков модели (коэффициент участковой скорости, непроизводительный расход электроэнергии из-за остановок, нагон опоздания пассажирских поездов, климатические показатели и т. д.), в том числе не предусмотренных программным комплексом «КОРТЭС»;

применение моделей, построенных с помощью методов, альтернативных множественной регрессии, например, искусственных нейронных сетей, нечетких нейронных сетей, метода опорных векторов [15].

Список литературы

1. Энергоэффективность и энергосбережение // <https://ar2020.rzd.ru>: сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://ar2020.rzd.ru/ru/sustainable-development/energy-efficiency-conservation> (дата обращения: 26.01.2022).
2. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года : Распоряжение ОАО «РЖД» № 2718р от 15 декабря 2011 г. // <http://www.rzd-expo.ru>: сайт. – Текст : электронный. – URL: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (дата обращения: 26.01.2022).
3. Сопов, В. И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе : учебник / В. И. Сопов, Н. И. Щуров. – Новосибирск : Новосибирский гос. техн. ун-т, 2013. – 728 с. – Текст : непосредственный.
4. Бакланов, А. А. Анализ тягово-энергетической эффективности новых электровозов / А. А. Бакланов, Н. В. Есин, А. П. Шиялков. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 4. – С. 70–80.
5. Аржанников, Б. А. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : монография / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – 258 с. – Текст : непосредственный.
6. Абляимов, О. С. Оценка эффективности перевозочной работы локомотивов в условиях эксплуатации / О. С. Абляимов, Ф. С. Равшанов, Ф. А. Салимов. – Текст : непосредственный // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Москва : ООО «Локомотивные технологии», 2015. – С. 98–103.
7. Истомин, С. Г. Анализ систем учета, нормирования и мониторинга потребления топливно-энергетических ресурсов моторвагонным подвижным составом / С. Г. Истомин, А. А. Штраухман. – Текст : непосредственный // Наука молодых – будущее России : сборник научных статей междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. – Курск : ЗАО «Университетская книга», 2017. – С. 254–263.
8. Правила тяговых расчетов для поездной работы : Распоряжение ОАО «РЖД» № 867р от 12.05.2016 // <https://docs.cntd.ru/> : сайт. – Текст : электронный. – URL <https://docs.cntd.ru/document/1200079084> (дата обращения: 26.01.2022).
9. Петрова, В. А. Программирование и решение сложных задач в Excel : учебное пособие / В. А. Петрова. – Екатеринбург : Уральский федеральный ун-т, 2016. – 88 с. – Текст : непосредственный.
10. Халафян, А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных / А. А. Халафян. – Москва : Бином, 2007. – 512 с. – Текст : непосредственный.
11. Носков, С. И. Оценка результатов среднесрочного прогнозирования эксплуатационных характеристик железной дороги / С. И. Носков, М. П. Базилевский, И. П. Врублевский. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (45). – С. 51–57.
12. Криворотова, В. В. Повышение энергоэффективности перевозочного процесса посредством снижения непроизводительных потерь на тягу поездов / В. В. Криворотова, А. Н. Кудряшов, Т. В. Коваль. – Текст : непосредственный // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 3 (27). – С. 85–90.

13. ГОСТ 57670–2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 48 с. – Текст : непосредственный.

14. Каштанов, А. Л. Применение многокритериальной оптимизации для отбора математических моделей энергопотребления в производственных процессах / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 258–263.

15. Черемисин, В. Т. Математическое моделирование процесса электропотребления на тягу поездов с применением метода опорных векторов / В. Т. Черемисин, А. А. Комяков, В. И. Иванченко. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2016. – № 6 (150). – С. 77–81.

References

1. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie* (Energy efficiency and energy conservation), Available at: <https://ar2020.rzd.ru/ru/sustainable-development/energy-efficiency-conservation> (accessed 26 January 2022).

2. *Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda : Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 2718r ot 15 dekabrya 2011 g.* (Energy Strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2015 and for the future up to 2030 : Order of JSC «Russian Railways» No. 2718r dated December 15, 2011), Available at: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (accessed 26 January 2022).

3. Sopov V. I., Shchurov N. I. *Sistemy elektrosnabzheniya elektricheskogo transporta na postoiannom toke: uchebnik* (DC electric transport power supply systems: textbook). Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publ., 2013, 728 p.

4. Baklanov A. A., Esin N. V., Shilyakov A. P. Analysis of traction and energy efficiency of new electric locomotives [Analiz tiagovo-energeticheskoi effektivnosti novykh elektrovozov]. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research result*, 2017, no. 4, pp. 70 – 80.

5. Arzhannikov B. A., Naboichenko I. O. *Kontseptsiya usileniya sistemy tiagovogo elektrosnabzheniya postoiannogo toka 3,0 kV: monografiya* (The concept of strengthening the 3.0 kV DC traction power supply system: monograph). Ekaterinburg: Ural State University of Railway Transport Publ., 2015, 258 p.

6. Ablialimov O. S., Ravshanov F. S., Salimov F. A. Evaluation of the efficiency of locomotives' transportation work under operating conditions [Otsenka effektivnosti perevozhnoy raboty lokomotivov v usloviyakh ekspluatatsii]. *Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Prospects for the development of locomotive maintenance: materials of the International scientific and practical conference). – Moscow, 2015, pp. 98 – 103.

7. Istomin S. G., Shtraukhman A. A. Analysis of accounting systems, rationing and monitoring of fuel and energy resources consumption by motor car rolling stock [Analiz sistem ucheta, normirovaniya i monitoringa potrebleniya toplivno-energeticheskikh resursov motorvagonnym podvizhnym sostavom]. *Nauka molodykh – budushchee Rossii: sbornik nauchnykh statei mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh* (Science of the Young – the future of Russia: collection of scientific articles of the international scientific conference of promising developments of young scientists). – Kursk, 2017, pp. 254 – 263.

8. *Pravila tiagovykh raschetov dlia poezdnoi raboty: Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 867r ot 12.05.2016* (Rules of traction calculations for train work: Order of JSC «Russian Railways» No. 867r dated 12.05.2016), Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200079084> (accessed 26 January 2022).

9. Petrova V. A. *Programmirovaniye i reshenie slozhnykh zadach v Excel: uchebnoye posobie* (Programming and solving complex problems in Excel: tutorial). Ekaterinburg: Ural Federal University Publ., 2016, 88 p.
10. Khalafian A. A. *Statistica 6. Statisticheskii analiz dannykh* (Statistica 6. Statistical data analysis). Moscow: Binom Publ., 2007, 512 p.
11. Noskov S. I., Bazilevskii M. P., Vrublevskii I. P. Evaluation of the results of the medium-term forecasting of the operational characteristics of the railway [Otsenka rezul'tatov srednesrochnogo prognozirovaniia ekspluatatsionnykh kharakteristik zheleznoi dorogi]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – Herald of the Ural State University of Railway transport*, 2020, no. 1 (45), pp. 51 – 57.
12. Krivorotova V. V., Kudriashov A. N., Koval' T. V. Improving the energy efficiency of the transportation process by reducing unproductive losses on train traction [Povysheniye energoeffektivnosti perevozochnogo protsessa posredstvom snizheniia neproizvoditel'nykh poter' na tiagu poezdov]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii. – Systems. Methods. Technologies*, 2015, no. 3 (27), pp. 85 – 90.
13. *Sistemy tiagovogo elektrosnabzheniia zheleznoi dorogi. Metodika vybora osnovnykh parametrov, GOST 57670–2017* (Traction power supply systems of the railway. The method of selecting the main parameters, GOST 57670-2017). Moscow, Standardinform, 2017, 48 p.
14. Kashtanov A. L., Komyakov A. A., Nikiforov M. M. Application of multi-criteria optimization for the selection of mathematical models of energy consumption in production processes [Primeneniye mnogokriterial'noi optimizatsii dlia otbora matematicheskikh modelei energopotrebleniia v proizvodstvennykh protsessakh]. *Pribory i metody izmerenii, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte: materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport: materials of the All-Russian scientific and Technical conference with international participation). – Omsk, 2020, pp. 258 – 263.
15. Cheremisin V. T., Komyakov A. A., Ivanchenko V. I. Mathematical modeling of the process of electric power consumption for train traction using the method of support vectors [Matematicheskoe modelirovaniye protsessa elektropotrebleniia na tiagu poezdov s primeneniem metoda opornykh vektorov]. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk scientific bulletin*, 2016, no. 6 (150), pp. 77 – 81.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вильгельм Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7-983-528-93-74.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

Иванченко Владимир Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7-913-602-60-30.

E-mail: ivanchenko-v.i@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vilgelm Aleksandr Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Docent, associate professor of the department «Electric railways rolling stock», OSTU.

Phone: +7-983-528-93-74.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

Ivanchenko Vladimir Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, lecturer of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7-913-602-60-30.

E-mail: ivanchenko-v.i@yandex.ru

Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

Штраухман Александр Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7-904-828-93-07.

E-mail: shtraukhman.aa@gmail.com

Komyakov Aleksandr Anatol'evich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor Of Sciences in Engineering, Docent, professor of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: +7-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

Shtraukhman Aleksandr Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: +7-904-828-93-07.

E-mail: shtraukhman.aa@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Определение оптимальных значений эксплуатационных показателей электроподвижного состава по критерию энергоэффективности / А. С. Вильгельм, В. И. Иванченко, А. А. Комяков, А. А. Штраухман. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 85 – 96.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Vilgelm A. S., Ivanchenko V. I., Komyakov A. A., Shtraukhman A. A. Determination of electric rolling stock operational indicators optimal values according to the criterion of energy efficiency. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 4 (48), pp. 85 – 96 (In Russian).

УДК 629.4.015

И. И. Галиев, М. Х. Минжасаров, Д. В. Липунов

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

ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ 2ЭС6 С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ КОЛЕСНО-МОТОРНЫХ БЛОКОВ

Аннотация. В статье представлен анализ отказов узлов механической части магистральных электровозов 2ЭС6 «Синара» в эксплуатации на полигоне Западно-Сибирской железной дороги, определены причины и следствия выхода из строя наиболее уязвимых узлов. Анализ отказов узлов механической части показал, что значительная их доля приходится на узлы колесно-моторного блока локомотива. Проведен анализ конструктивных особенностей экипажной части. Основное конструктивное отличие подвешивания заключается в отсутствии в буксовой ступени рессорного подвешивания листовых рессор, которые имели широкое применение на электровозах предыдущих поколений. В кузовной ступени взамен люлечного подвешивания применены винтовые пружины (Flexicoil). Связь тягового двигателя с рамой тележки маятниковая. Подвешивание тягового двигателя к раме тележки осуществлено через поводок. При рассмотрении колебаний железнодорожных экипажей принято представлять локомотив и путь единой механической системой. Поставлена задача формирования математической модели системы «электровоз – путь» и сформирована математическая модель вертикальных колебаний электровоза с учетом динамики колесно-моторных блоков на основе уравнения Лагранжа второго рода в виде матричного уравнения, которая позволяет оценить нагруженность узлов механической части в эксплуатации. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, в которой шесть уравнений определяют колебания подпрыгивания и галопирования кузова и тележек, четыре – галопирование колесно-моторных блоков, четыре – подпрыгивание колесных пар вместе с приведенной массой пути.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Полученная математическая модель позволяет определить уровень динамической нагруженности узлов механической части электровоза 2ЭС6 «Синара» путем интегрирования матричного уравнения с помощью прикладного пакета MathCAD.

Ключевые слова: тяговый подвижной состав, колесно-моторный блок, математическая модель, расчетная схема, динамическая нагруженность, вертикальные колебания, галопирование тягового электродвигателя.

Ilkham I. Galiev, Marat Kh. Minzhasarov, Dmitry V. Lipunov

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

FORMATION OF A MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRIC LOCOMOTIVES 2ES6 VERTICAL OSCILLATIONS TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS WHEEL-MOTOR UNITS

Abstract. The article presents an analysis of the failures of the mechanical components of the mainline electric locomotives 2ES6 «Sinara» in operation at the landfill of the West Siberian Railway, the causes and consequences of failures of the most vulnerable nodes are determined. The analysis of failures of the mechanical components showed that a significant share of them falls on the components of the wheel-motor unit of the locomotive. The analysis of the design features of the crew part is carried out. The main structural difference of suspension is the absence of leaf springs in the axle box stage, which were widely used on electric locomotives of previous generations. In the body stage, helical springs (Flexicoil) are used instead of the cradle suspension. The connection of the traction motor with the trolley frame is a pendulum. The suspension of the traction motor to the trolley frame is carried out through a leash. When considering the vibrations of railway carriages, it is customary to represent the locomotive and the track as a single mechanical system. The task of forming a mathematical model of the «electric locomotive – path» system is set and a mathematical model of vertical vibrations of an electric locomotive is formed taking into account the dynamics of wheel-motor blocks based on the Lagrange equation of the second kind in the form of a matrix equation, which allows us to assess the loading of mechanical components in operation. The mathematical model represents a system of differential equations in which six equations determine the fluctuations of the bouncing and galloping of the body and trolleys, four – the galloping of wheel-motor blocks, four – the bouncing of wheel pairs together with the reduced mass of the track. The obtained mathematical model makes it possible to determine the level of dynamic loading of the components of the mechanical part of the electric locomotive 2ES6 «Sinara» by integrating the matrix equation using the MathCAD application package.

Keywords: traction rolling stock, wheel-motor unit, mathematical model, design scheme, dynamic loading, vertical oscillations, galloping of the traction motor.

Анализ отказов узлов механической части электровозов 2ЭС6 показал, что значительная их доля приходится на узлы колесно-моторного блока [1, 2] (рисунок 1).

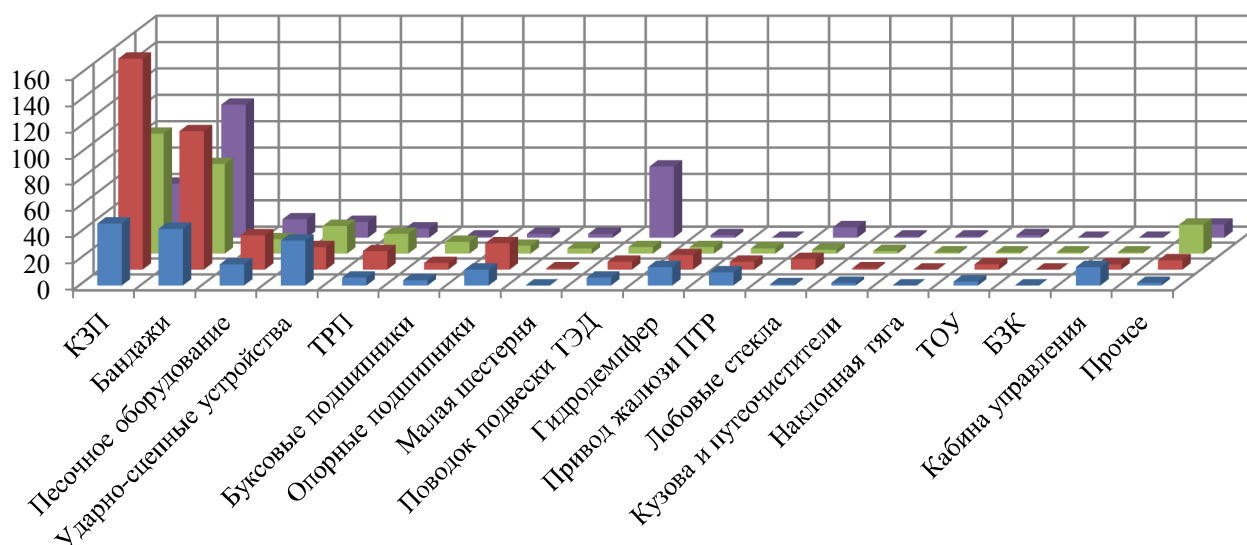


Рисунок 1 – Выход из строя узлов механической части электровозов 2ЭС6 за 2017 – 2020 гг.

Опорно-осевое подвешивание тягового электродвигателя обуславливает повышенное силовое взаимодействие необрессоренной массы с верхним строением пути, что приводит к возрастанию динамической нагруженности локомотива. Система «локомотив – путь» представляет собой сложную механическую систему, от динамического взаимодействия подсистем которой, в частности «необрессоренная масса – верхнее строение пути», зависит процесс изнашивания узлов всей системы [3]. Определение уровня динамической нагруженности в подсистеме «тележка – поводок – тяговый электродвигатель» является актуальной задачей в связи с необходимостью снижения уровня сил в системе.

Для исследования динамической нагруженности подвешивания тягового электродвигателя необходимо формирование адекватной математической модели вертикальных колебаний локомотива 2ЭС6 «Синара», экипаж которого является симметричным в продольной вертикальной и горизонтальной плоскостях, что позволяет рассмотреть эти колебания независимо друг от друга, считая их несвязанными [4]. Для исследования вертикальных колебаний колесно-моторного блока необходимо разработать расчетную схему, которая должна учитывать конструктивные особенности железнодорожного экипажа.

В конструкции механической части электровоза 2ЭС6 «Синара» применены новые для отечественного электровозостроения технические решения [3]:

- малая жесткость поперечной связи колесной пары с рамой тележки;
- раздельное демпфирование основных видов колебаний (причем вертикальные и горизонтальные гидродемпферы кузовной ступени разнесены по длине боковой рамы тележки, что способствует гашению колебаний галопирования рамы тележки и колебаний виляния);
- облегченная рама тележки;
- многофункциональные опоры типа Flexicoil в кузовной ступени подвешивания;
- несимметричная характеристика гидродемпфера буксовой ступени (сила вязкого сопротивления при сжатии меньше силы сопротивления при отбое, что способствует снижению воздействия локомотива на путь).

Рессорное подвешивание электровозов 2ЭС6 «Синара» двухъярусное. Основное конструктивное отличие подвешивания заключается в отсутствии в буксовой ступени рессорного подвешивания листовых рессор, которые имели широкое применение на электровозах предыдущих поколений. Функции листовых рессор выполняет буксовый гидродемпфер (рисунок 2), установленный параллельно несущим упругим элементам.

Гидродемпфер буксовой ступени подвешивания предназначен для гашения вертикальных колебаний рамы тележки относительно колесных пар.

Буксовое рессорное подвешивание состоит из гидравлического гасителя 7, который функционирует параллельно двум цилиндрическим пружинам 5, установленным на корпус буксы посредством верхней и нижней направляющих 2 и 4. На верхнюю направляющую через резиновый амортизатор устанавливается рама тележки. В случае увеличения осевой нагрузки

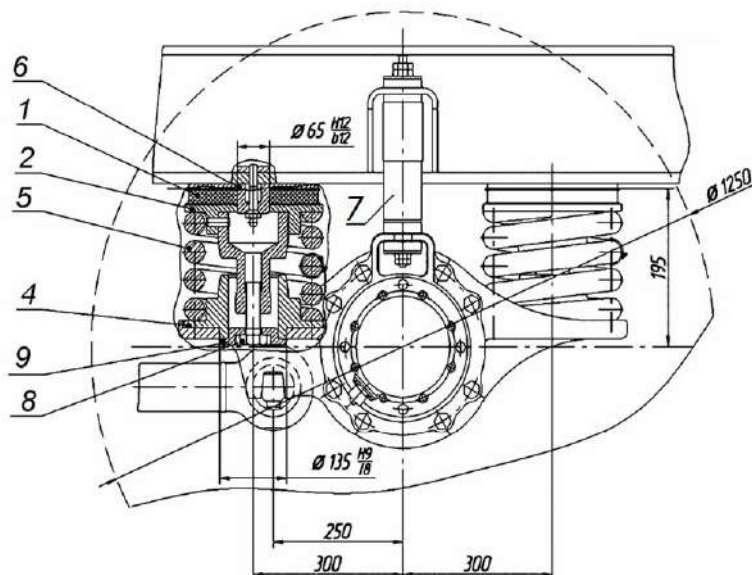


Рисунок 2 – Буксовое рессорное подвешивание электровоза 2ЭС6:

- 1 – резинометаллические амортизаторы; 2 – верхняя направляющая; 4 – нижняя направляющая; 5 – наружная пружина; 6 – втулка; 7 – гидродемпфер; 8 – стяжной болт; 9 – втулка

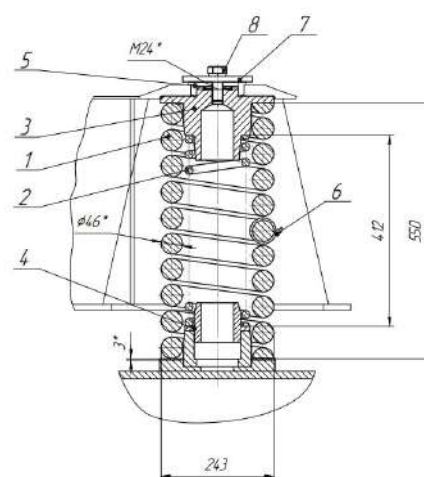
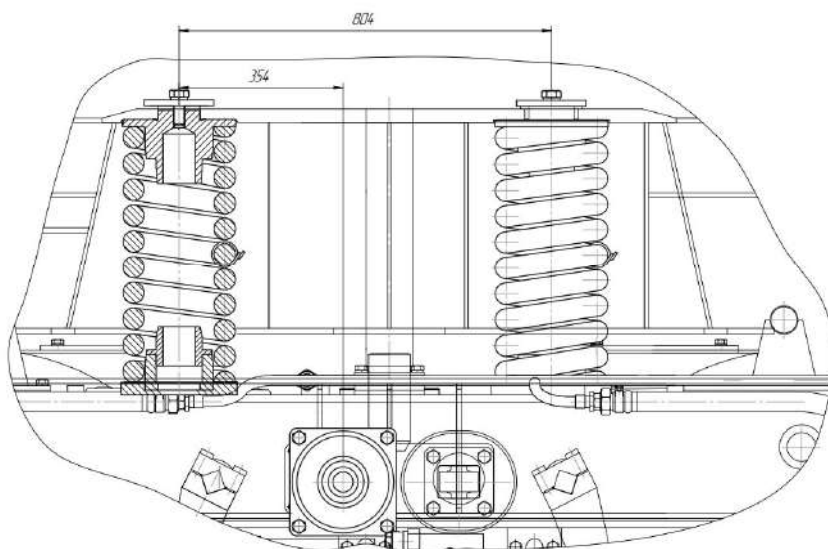
Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

электровоза до 25 т, параллельно основным упругим элементам устанавливаются еще две внутренние пружины. Статический прогиб пружин равняется 58 мм, высота при действии расчетной нагрузки – 206 мм.

В кузовной ступени взамен люлечного подвешивания применены винтовые пружины (Flexicoil) (рисунок 3), которые предназначены как для восприятия вертикальных нагрузок, так и для создания возвращающих моментов при поперечном и угловом перемещениях тележки относительно кузова в прямом и в кривом участках пути.

Для осевой нагрузки до 25 т

Для осевой нагрузки до 25 т

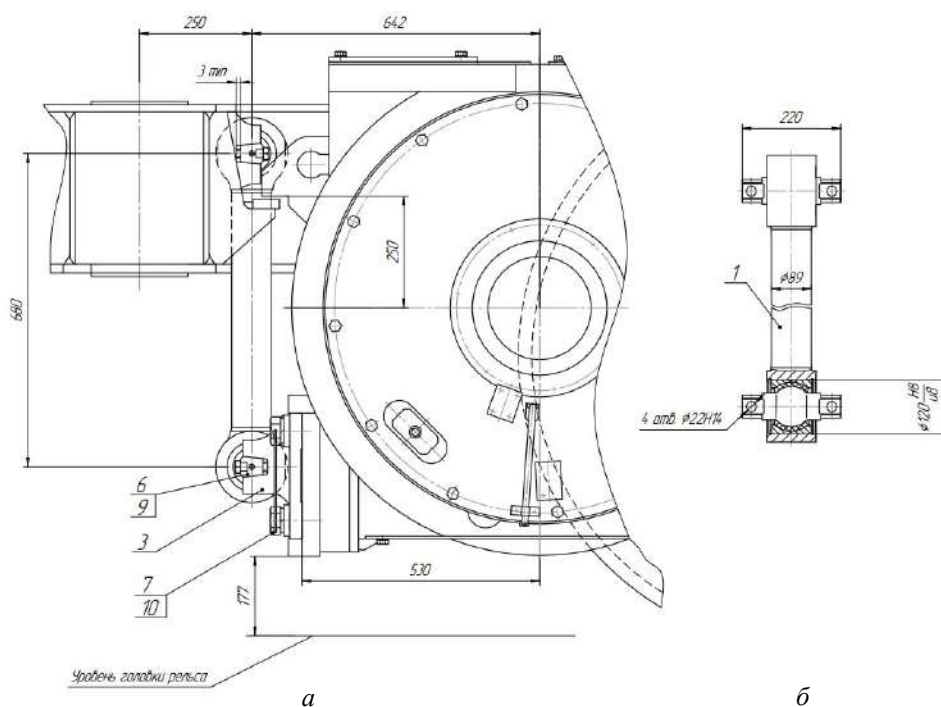


а

б

Рисунок 3 – Кузовное рессорное подвешивание электровоза 2ЭС6: 1 – пружина; 2 – внутренняя пружина; 3 – верхний стакан; 4 – направляющая чаша; 5 – «бонка»; 7 – стопорная планка; 8 – болт

Опорно-осевое подвешивание тягового электродвигателя электровоза показано на рисунке 4.



а

б

Рисунок 4 – Подвешивание тягового электродвигателя электровоза 2ЭС6

Тяговый электродвигатель одним концом опирается через моторно-осевые подшипники качения на ось колесной пары, а другим – на раму тележки через специальную подвеску. При этом обеспечивается смягчение ударов, передающихся на тяговый электродвигатель при прохождении колесной парой неровностей пути и при трогании с места, а также возможность изменения взаимного положения тягового электродвигателя и рамы тележки при движении электровоза [5, 6].

Связь тягового двигателя с рамой тележки маятниковая. Подвешивание тягового двигателя к раме тележки осуществлено через поводок. На концах поводка установлены две головки с резиновыми или полиуретановыми амортизаторами. Недостаточный статический прогиб буксовой ступени обрессоривания, выполненной в виде винтовых пружин и гидродемпферов, а также несовершенство конструкции маятникового подвешивания тягового электродвигателя электровоза в суровых условиях климата являются причинами повышения уровня силового взаимодействия локомотива и пути, что в свою очередь приводит к увеличению вибронагруженности узлов электровоза.

При рассмотрении колебаний железнодорожных экипажей принято представлять локомотив и путь единой механической системой, в которой модель пути может быть выбрана исследователем в зависимости от поставленной цели исследования. В тех случаях, когда задачи касаются колебаний обрессоренных масс железнодорожных экипажей, достаточно ограничиться более простой моделью пути: одномассовой дискретной моделью. Для исследования процессов, происходящих в рельсовом основании, необходимы континуальная или двухмассовая дискретная модель пути.

Поскольку целью нашего исследования является анализ процессов, происходящих в экипаже, целесообразно составить более подробную модель экипажа и с целью упрощения расчета в рамках инженерной погрешности ограничиться применением одномассовой дискретной модели пути.

Принимаем ряд допущений, позволяющих не учитывать определенные параметры и перемещения тел [7 – 10]:

- 1) кузов, тележка, колесно-моторный блок и колесные пары являются абсолютно твердыми телами, так как их жесткость во много раз превосходит жесткость упругих связей;
- 2) рассматривается безотрывное движение колесных пар по рельсам;
- 3) модель пути дискретная;
- 4) локомотив движется с постоянной скоростью.

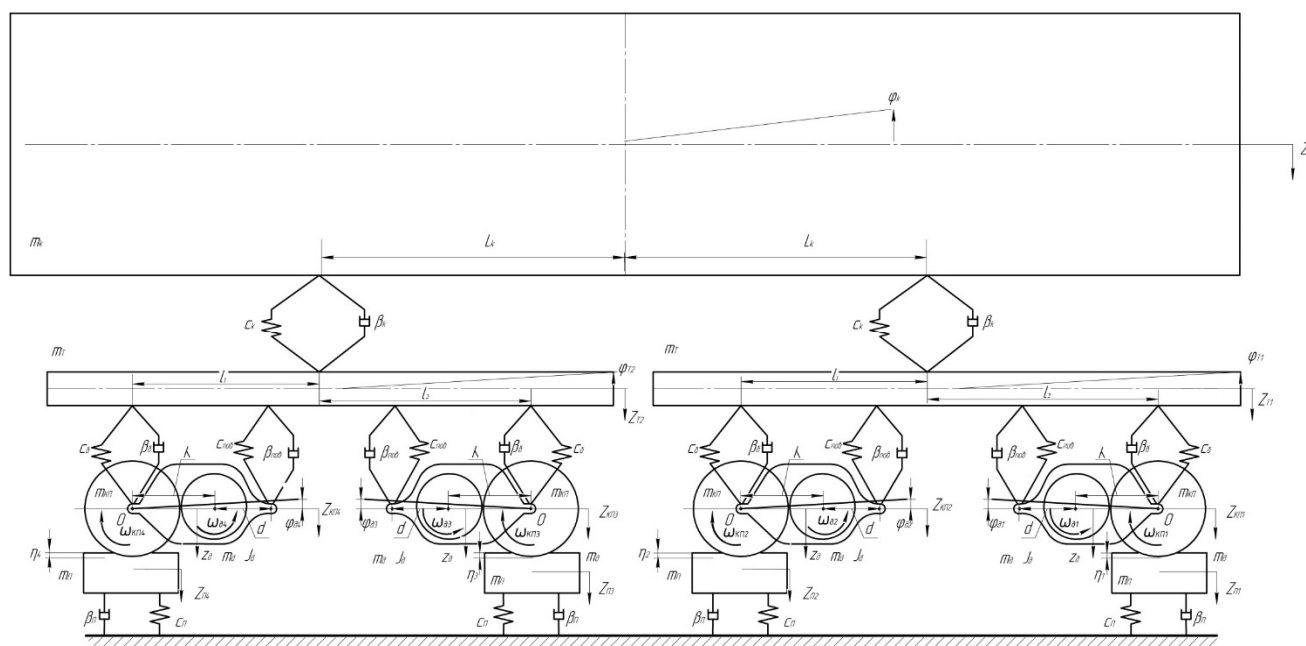


Рисунок 5 – Расчетная схема электровоза 2ЭС6

В расчетной схеме (рисунок 5) приняты следующие обозначения: z_k – обобщенная координата подпрыгивания кузова; φ_k – угловое перемещение кузова; z_{Ti} – обобщенные координаты подпрыгивания тележек; φ_{Ti} – угловые перемещения тележек; $z_{k, pi}$ – обобщенные координаты подпрыгивания колесных пар; z_{di} – обобщенные координаты подпрыгивания тягового двигателя; z_{pi} – перемещения приведенных масс пути; φ_{di} – углы поворота тяговых двигателей относительно оси колесной пары; J_k – момент инерции кузова; J_{Ti} – моменты инерции тележек; J_{di} – моменты инерции тяговых двигателей; m_k – масса кузова; m_T – масса обрессоренных частей тележки; $m_{k, п}$ – масса колесной пары; m_d – масса тягового двигателя; m_p – приведенная масса пути; c_k – жесткость центральной ступени подвешивания; $c_б$ – жесткость буксовой ступени подвешивания; $c_{пов}$ – жесткость поводка; c_p – приведенная жесткость пути; β_k – коэффициент вязкого трения центральной ступени подвешивания; $\beta_б$ – коэффициент вязкого трения буксовой ступени подвешивания; $\beta_{пов}$ – коэффициент вязкого трения в резинометаллических элементах поводка; β_p – приведенный коэффициент вязкого трения пути; η – случайная функция неровности рельса под колесной парой; $\omega_{я}$ – угловая скорость вращения якоря.

Гипотеза о безотрывном движении колеса по рельсу позволяет применить уравнения Лагранжа второго рода для формирования математической модели рассматриваемой системы. Условия (1) позволяют установить связь между перемещением приведенной массы пути и подпрыгиванием колесной пары, (2) устанавливает зависимость между подпрыгиваниями колесной пары и тягового электродвигателя, (3) следует из того, что колесная пара вращается вокруг собственной оси и совершает подпрыгивания, это приводит к тому, что скорость вращения якоря тягового двигателя будет зависеть от скорости движения локомотива, передаточного отношения, диаметра колесной пары и галопирования тягового электродвигателя:

$$\begin{cases} z_{pi} = z_{k, pi} - \eta_i; \\ \dot{z}_{pi} = \dot{z}_{k, pi} - \dot{\eta}_i. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} z_{d1} = z_{k, п1} - \lambda \varphi_{d1}; \\ z_{d2} = z_{k, п2} + \lambda \varphi_{d2}; \\ z_{d3} = z_{k, п3} - \lambda \varphi_{d3}; \\ z_{d4} = z_{k, п4} + \lambda \varphi_{d4}. \end{cases} \quad (2)$$

$$\omega_{я} = \frac{2V}{D_{к\text{тр}}} \frac{i_{тр} + 1}{i_{тр}} \dot{\varphi}_{дi}. \quad (3)$$

Математическая модель вертикальных колебаний рассматриваемой системы составлена на основе уравнений Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \quad (i = 1 \dots 14), \quad (4)$$

где T – кинетическая энергия механической системы; Π – потенциальная энергия; Φ – функция рассеяния; Q_i – обобщенная сила; q_i и $\dot{q}_i$ – обобщенные координаты и их производные (обобщенные скорости).

Кинетическая энергия системы является суммой кинетических энергий движения кузова, тележки, колесной пары, остова тягового электродвигателя и приведенной массы пути, а также вращения якоря тягового двигателя вокруг собственной оси и с учетом связей, наложенных на механическую систему, может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned}
 T = & \frac{1}{2} m_k \dot{z}_k^2 + \frac{1}{2} J_k \dot{\phi}_k^2 + \frac{1}{2} m_{\tau} \sum_{i=1}^2 \dot{z}_{\tau i}^2 + \frac{1}{2} J_{\tau} \sum_{i=1}^2 \dot{\phi}_{\tau i}^2 + \frac{1}{2} m_{\kappa \text{ п}} \cdot \sum_{i=1}^4 \dot{z}_{\kappa \text{ п} i}^2 + \\
 & + \frac{1}{2} m_{\text{д}} \cdot \sum_{i=1}^4 \dot{z}_{\kappa \text{ п} i}^2 \pm \frac{1}{2} m_{\text{д}} \cdot \lambda \cdot \sum_{i=1}^4 \dot{z}_{\kappa \text{ п} i}^2 \dot{\phi}_{\text{д} i} + \frac{1}{2} m_{\text{д}} \cdot \lambda^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \dot{\phi}_{\text{д} i}^2 + \frac{1}{2} J_{\text{д}} \cdot \sum_{i=1}^4 \dot{\phi}_{\text{д} i}^2 + \frac{1}{2} m_{\text{п}} \cdot \sum_{i=1}^4 \dot{z}_{\kappa \text{ п} i}^2 - \\
 & - \frac{1}{2} m_{\text{п}} \cdot \sum_{i=1}^4 \dot{z}_{\kappa \text{ п} i} \dot{\eta}_i + \frac{1}{2} m_{\text{п}} \cdot \sum_{i=1}^4 \dot{\eta}_i + \frac{1}{2} J_{\text{я}} \left(\frac{2V}{D_{\kappa \text{ пр}}} \right)^2 \cdot 4 - J_{\text{я}} \frac{2V}{D_{\kappa \text{ пр}}} \cdot \frac{i_{\text{пр}} + 1}{i_{\text{пр}}} \sum_{i=1}^4 \dot{\phi}_{\text{д} i}^2 + \frac{1}{2} J_{\text{я}} \left(\frac{i_{\text{пр}} + 1}{i_{\text{пр}}} \right)^2 \sum_{i=1}^4 \dot{\phi}_{\text{д} i}^2,
 \end{aligned} \quad (5)$$

где $J_{\text{я}}$ – момент инерции якоря; V – продольная скорость движения экипажа; D_{κ} – диаметр катания колесной пары; $i_{\text{пр}}$ – передаточное отношение большой зубчатой передачи.

Потенциальная энергия системы для сил, возникающих в упругих связях рессорного подвешивания локомотива и в упругом основании пути, определится соответствующими прогибами, возникающими в них.

Прогибы и скорости прогибов центральной ступени подвешивания:

$$\Delta_{\kappa 1} = z_{\kappa} - z_{\tau 1} - L_{\kappa} \phi_{\kappa}, \quad \dot{\Delta}_{\kappa 1} = \dot{z}_{\kappa} - \dot{z}_{\tau 1} - L_{\kappa} \dot{\phi}_{\kappa} - \text{первой тележки};$$

$$\Delta_{\kappa 2} = z_{\kappa} - z_{\tau 2} + L_{\kappa} \phi_{\kappa}, \quad \dot{\Delta}_{\kappa 2} = \dot{z}_{\kappa} - \dot{z}_{\tau 2} + L_{\kappa} \dot{\phi}_{\kappa} - \text{второй тележки}.$$

Прогибы и скорости прогибов буксовых пружин:

$$\Delta_{\text{б} 1} = z_{\tau 1} - z_{\kappa \text{ п} 1} - l_1 \phi_{\tau 1}, \quad \dot{\Delta}_{\text{б} 1} = \dot{z}_{\tau 1} - \dot{z}_{\kappa \text{ п} 1} - l_1 \dot{\phi}_{\tau 1} - \text{первой колесной пары};$$

$$\Delta_{\text{б} 2} = z_{\tau 1} - z_{\kappa \text{ п} 2} + l_2 \phi_{\tau 1}, \quad \dot{\Delta}_{\text{б} 2} = \dot{z}_{\tau 1} - \dot{z}_{\kappa \text{ п} 2} + l_2 \dot{\phi}_{\tau 1} - \text{второй колесной пары};$$

$$\Delta_{\text{б} 3} = z_{\tau 2} - z_{\kappa \text{ п} 3} - l_2 \phi_{\tau 2}, \quad \dot{\Delta}_{\text{б} 3} = \dot{z}_{\tau 2} - \dot{z}_{\kappa \text{ п} 3} - l_2 \dot{\phi}_{\tau 2} - \text{третьей колесной пары};$$

$$\Delta_{\text{б} 4} = z_{\tau 2} - z_{\kappa \text{ п} 4} + l_1 \phi_{\tau 2}, \quad \dot{\Delta}_{\text{б} 4} = \dot{z}_{\tau 2} - \dot{z}_{\kappa \text{ п} 4} + l_1 \dot{\phi}_{\tau 2} - \text{четвертой колесной пары}.$$

Прогибы и скорости прогибов амортизаторов поводков:

$$\Delta_{\text{пов} 1} = z_{\tau 1} - (l_1 - \lambda - d) \phi_{\tau 1} - z_{\kappa \text{ п} 1} + (\lambda + d) \phi_{\text{д} 1}, \quad \dot{\Delta}_{\text{пов} 1} = \dot{z}_{\tau 1} - (l_1 - \lambda - d) \dot{\phi}_{\tau 1} - \dot{z}_{\kappa \text{ п} 1} + (\lambda + d) \dot{\phi}_{\text{д} 1} - \text{первого поводка};$$

$$\Delta_{\text{пов} 2} = z_{\tau 1} + (l_2 - \lambda - d) \phi_{\tau 1} - z_{\kappa \text{ п} 2} - (\lambda + d) \phi_{\text{д} 2}, \quad \dot{\Delta}_{\text{пов} 2} = \dot{z}_{\tau 1} + (l_2 - \lambda - d) \dot{\phi}_{\tau 1} - \dot{z}_{\kappa \text{ п} 2} - (\lambda + d) \dot{\phi}_{\text{д} 2} - \text{второго поводка};$$

$$\Delta_{\text{пов} 3} = z_{\tau 2} - (l_2 - \lambda - d) \phi_{\tau 2} - z_{\kappa \text{ п} 3} + (\lambda + d) \phi_{\text{д} 3}, \quad \dot{\Delta}_{\text{пов} 3} = \dot{z}_{\tau 2} - (l_2 - \lambda - d) \dot{\phi}_{\tau 2} - \dot{z}_{\kappa \text{ п} 3} + (\lambda + d) \dot{\phi}_{\text{д} 3} - \text{третьего поводка};$$

$$\Delta_{\text{пов} 4} = z_{\tau 2} + (l_1 - \lambda - d) \phi_{\tau 2} - z_{\kappa \text{ п} 4} - (\lambda + d) \phi_{\text{д} 4}, \quad \dot{\Delta}_{\text{пов} 4} = \dot{z}_{\tau 2} + (l_1 - \lambda - d) \dot{\phi}_{\tau 2} - \dot{z}_{\kappa \text{ п} 4} - (\lambda + d) \dot{\phi}_{\text{д} 4} - \text{четвертого поводка}.$$

Прогибы и скорости прогибов верхнего строения пути:

$$\Delta_{п1} = z_{к. п1} - \eta_1, \dot{\Delta}_{п1} = \dot{z}_{к. п1} - \dot{\eta}_1 - \text{первой колесной пары};$$

$$\Delta_{п2} = z_{к. п2} - \eta_2, \dot{\Delta}_{п2} = \dot{z}_{к. п2} - \dot{\eta}_2 - \text{второй колесной пары};$$

$$\Delta_{п3} = z_{к. п3} - \eta_3, \dot{\Delta}_{п3} = \dot{z}_{к. п3} - \dot{\eta}_3 - \text{третьей колесной пары};$$

$$\Delta_{п4} = z_{к. п4} - \eta_4, \dot{\Delta}_{п4} = \dot{z}_{к. п4} - \dot{\eta}_4 - \text{четвертой колесной пары}.$$

Потенциальная энергия системы:

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} c_k \cdot (\Delta_{к1}^2 + \Delta_{к2}^2) + \frac{1}{2} c_6 (\Delta_{61}^2 + \Delta_{62}^2 + \Delta_{63}^2 + \Delta_{64}^2) + \\ & + \frac{1}{2} c_{пов} (\Delta_{пов1}^2 + \Delta_{пов2}^2 + \Delta_{пов3}^2 + \Delta_{пов4}^2) + \frac{1}{2} c_n (\Delta_{п1}^2 + \Delta_{п2}^2 + \Delta_{п3}^2 + \Delta_{п4}^2) = \\ = & \frac{1}{2} c_k (z_k^2 + z_{т1}^2 + L_k^2 \varphi_k^2 - 2z_k z_{т1} - 2z_k L_k \varphi_k + 2z_{т1} L_k \varphi_k) + \\ & + \frac{1}{2} c_k (z_k^2 + z_{т2}^2 + L_k^2 \varphi_k^2 - 2z_k z_{т2} + 2z_k L_k \varphi_k - 2z_{т2} L_k \varphi_k) + \\ & + \frac{1}{2} c_6 (z_{т1}^2 + z_{к. п1}^2 + l_1^2 \varphi_{т1}^2 - 2z_{т1} z_{к. п1} - 2z_{т1} l_1 \varphi_{т1} + 2z_{к. п1} l_1 \varphi_{т1}) + \\ & + \frac{1}{2} c_6 (z_{т1}^2 + z_{к. п2}^2 + l_2^2 \varphi_{т1}^2 - 2z_{т1} z_{к. п2} + 2z_{т1} l_2 \varphi_{т1} - 2z_{к. п2} l_2 \varphi_{т1}) + \\ & + \frac{1}{2} c_6 (z_{т2}^2 + z_{к. п3}^2 + l_2^2 \varphi_{т2}^2 - 2z_{т2} z_{к. п3} - 2z_{т2} l_2 \varphi_{т2} + 2z_{к. п3} l_2 \varphi_{т2}) + \\ & + \frac{1}{2} c_6 (z_{т2}^2 + z_{к. п4}^2 + l_1^2 \varphi_{т2}^2 - 2z_{т2} z_{к. п4} + 2z_{т2} l_1 \varphi_{т2} - 2z_{к. п4} l_1 \varphi_{т2}) + \\ & + \frac{1}{2} c_{пов} (z_{т1}^2 + (l_1 - \lambda - d)^2 \varphi_{т1}^2 + z_{к. п1}^2 + (\lambda + d)^2 \varphi_{д1}^2 - 2z_{т1} (l_1 - \lambda - d) \varphi_{т1} - 2z_{т1} z_{к. п1} + \\ & + 2z_{т1} (\lambda + d) \varphi_{д1} + 2(l_1 - \lambda - d) \varphi_{т1} z_{к. п1} - 2(l_1 - \lambda - d) \varphi_{т1} (\lambda + d) \varphi_{д1} - 2z_{к. п1} (\lambda + d) \varphi_{д1}) + \\ & + \frac{1}{2} c_{пов} (z_{т1}^2 + (l_2 - \lambda - d)^2 \varphi_{т1}^2 + z_{к. п2}^2 + (\lambda + d)^2 \varphi_{д2}^2 + 2z_{т1} (l_2 - \lambda - d) \varphi_{т1} - 2z_{т1} z_{к. п2} - \\ & - 2z_{т1} (\lambda + d) \varphi_{д2} - 2(l_2 - \lambda - d) \varphi_{т1} z_{к. п2} - 2(l_2 - \lambda - d) \varphi_{т1} (\lambda + d) \varphi_{д2} + 2z_{к. п2} (\lambda + d) \varphi_{д2}) + \\ & + \frac{1}{2} c_{пов} (z_{т2}^2 + (l_2 - \lambda - d)^2 \varphi_{т2}^2 + z_{к. п3}^2 + (\lambda + d)^2 \varphi_{д3}^2 - 2z_{т2} (l_2 - \lambda - d) \varphi_{т2} - 2z_{т2} z_{к. п3} + \\ & + 2z_{т2} (\lambda + d) \varphi_{д3} + 2(l_2 - \lambda - d) \varphi_{т2} z_{к. п3} - 2(l_2 - \lambda - d) \varphi_{т2} (\lambda + d) \varphi_{д3} - 2z_{к. п3} (\lambda + d) \varphi_{д3}) + \\ & + \frac{1}{2} c_{пов} (z_{т2}^2 + (l_1 - \lambda - d)^2 \varphi_{т2}^2 + z_{к. п4}^2 + (\lambda + d)^2 \varphi_{д4}^2 + 2z_{т2} (l_1 - \lambda - d) \varphi_{т2} - 2z_{т2} z_{к. п4} - \\ & - 2z_{т2} (\lambda + d) \varphi_{д4} - 2(l_1 - \lambda - d) \varphi_{т2} z_{к. п4} - 2(l_1 - \lambda - d) \varphi_{т2} (\lambda + d) \varphi_{д4} + 2z_{к. п4} (\lambda + d) \varphi_{д4}) + \\ & + \frac{1}{2} c_n (z_{к. п1}^2 - 2z_{к. п1} \eta_1 + \eta_1^2) + \frac{1}{2} c_n (z_{к. п2}^2 - 2z_{к. п2} \eta_2 + \eta_2^2) + \frac{1}{2} c_n (z_{к. п3}^2 - 2z_{к. п3} \eta_3 + \eta_3^2) + \\ & + \frac{1}{2} c_n (z_{к. п4}^2 - 2z_{к. п4} \eta_4 + \eta_4^2). \end{aligned} \tag{6}$$

Диссипативная функция системы представляется выражением:

$$\begin{aligned}
 \Phi = & \frac{1}{2} \beta_k \cdot (\dot{\Delta}_{k1}^2 + \dot{\Delta}_{k2}^2) + \frac{1}{2} \beta_6 (\dot{\Delta}_{61}^2 + \dot{\Delta}_{62}^2 + \dot{\Delta}_{63}^2 + \dot{\Delta}_{64}^2) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_{пов} (\dot{\Delta}_{пов1}^2 + \dot{\Delta}_{пов2}^2 + \dot{\Delta}_{пов3}^2 + \dot{\Delta}_{пов4}^2) + \frac{1}{2} \beta_{п} (\dot{\Delta}_{п1}^2 + \dot{\Delta}_{п2}^2 + \dot{\Delta}_{п3}^2 + \dot{\Delta}_{п4}^2) = \\
 = & \frac{1}{2} \beta_k (\dot{z}_k^2 + \dot{z}_{т1}^2 + L_k^2 \dot{\phi}_k^2 - 2 \dot{z}_k \dot{z}_{т1} - 2 \dot{z}_k L_k \dot{\phi}_k + 2 \dot{z}_{т1} L_k \dot{\phi}_k) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_k (\dot{z}_k^2 + \dot{z}_{т2}^2 + L_k^2 \dot{\phi}_k^2 - 2 \dot{z}_k \dot{z}_{т2} + 2 \dot{z}_k L_k \dot{\phi}_k - 2 \dot{z}_{т2} L_k \dot{\phi}_k) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_6 (\dot{z}_{т1}^2 + \dot{z}_{к.п1}^2 + l_1^2 \dot{\phi}_{т1}^2 - 2 \dot{z}_{т1} \dot{z}_{к.п1} - 2 \dot{z}_{т1} l_1 \dot{\phi}_{т1} + 2 \dot{z}_{к.п1} l_1 \dot{\phi}_{т1}) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_6 (\dot{z}_{т1}^2 + \dot{z}_{к.п2}^2 + l_2^2 \dot{\phi}_{т1}^2 - 2 \dot{z}_{т1} \dot{z}_{к.п2} + 2 \dot{z}_{т1} l_2 \dot{\phi}_{т1} - 2 \dot{z}_{к.п2} l_2 \dot{\phi}_{т1}) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_6 (\dot{z}_{т2}^2 + \dot{z}_{к.п3}^2 + l_2^2 \dot{\phi}_{т2}^2 - 2 \dot{z}_{т2} \dot{z}_{к.п3} - 2 \dot{z}_{т2} l_2 \dot{\phi}_{т2} + 2 \dot{z}_{к.п3} l_2 \dot{\phi}_{т2}) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_6 (\dot{z}_{т2}^2 + \dot{z}_{к.п4}^2 + l_1^2 \dot{\phi}_{т2}^2 - 2 \dot{z}_{т2} \dot{z}_{к.п4} + 2 \dot{z}_{т2} l_1 \dot{\phi}_{т2} - 2 \dot{z}_{к.п4} l_1 \dot{\phi}_{т2}) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_{пов} (\dot{z}_{т1}^2 + (l_1 - \lambda - d)^2 \dot{\phi}_{т1}^2 + \dot{z}_{к.п1}^2 + (\lambda + d)^2 \dot{\phi}_{д1}^2 - 2 \dot{z}_{т1} (l_1 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т1} - 2 \dot{z}_{т1} \dot{z}_{к.п1} + \\
 & + 2 \dot{z}_{т1} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д1} + 2 (l_1 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т1} \dot{z}_{к.п1} - 2 (l_1 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т1} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д1} - 2 \dot{z}_{к.п1} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д1}) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_{пов} (\dot{z}_{т1}^2 + (l_2 - \lambda - d)^2 \dot{\phi}_{т1}^2 + \dot{z}_{к.п2}^2 + (\lambda + d)^2 \dot{\phi}_{д2}^2 + 2 \dot{z}_{т1} (l_2 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т1} - 2 \dot{z}_{т1} \dot{z}_{к.п2} - \\
 & - 2 \dot{z}_{т1} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д2} - 2 (l_2 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т1} \dot{z}_{к.п2} - 2 (l_2 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т1} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д2} + 2 \dot{z}_{к.п2} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д2}) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_{пов} (\dot{z}_{т2}^2 + (l_2 - \lambda - d)^2 \dot{\phi}_{т2}^2 + \dot{z}_{к.п3}^2 + (\lambda + d)^2 \dot{\phi}_{д3}^2 - 2 \dot{z}_{т2} (l_2 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т2} - 2 \dot{z}_{т2} \dot{z}_{к.п3} + \\
 & + 2 \dot{z}_{т2} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д3} + 2 (l_2 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т2} \dot{z}_{к.п3} - 2 (l_2 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т2} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д3} - 2 \dot{z}_{к.п3} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д3}) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_{пов} (\dot{z}_{т2}^2 + (l_1 - \lambda - d)^2 \dot{\phi}_{т2}^2 + \dot{z}_{к.п4}^2 + (\lambda + d)^2 \dot{\phi}_{д4}^2 + 2 \dot{z}_{т2} (l_1 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т2} - 2 \dot{z}_{т2} \dot{z}_{к.п4} - \\
 & - 2 \dot{z}_{т2} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д4} - 2 (l_1 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т2} \dot{z}_{к.п4} - 2 (l_1 - \lambda - d) \dot{\phi}_{т2} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д4} + 2 \dot{z}_{к.п4} (\lambda + d) \dot{\phi}_{д4}) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_{п} (\dot{z}_{к.п1}^2 - 2 \dot{z}_{к.п1} \dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_1^2) + \frac{1}{2} \beta_{п} (\dot{z}_{к.п2}^2 - 2 \dot{z}_{к.п2} \dot{\eta}_2 + \dot{\eta}_2^2) + \frac{1}{2} \beta_{п} (\dot{z}_{к.п3}^2 - 2 \dot{z}_{к.п3} \dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_3^2) + \\
 & + \frac{1}{2} \beta_{п} (\dot{z}_{к.п4}^2 - 2 \dot{z}_{к.п4} \dot{\eta}_4 + \dot{\eta}_4^2).
 \end{aligned} \tag{7}$$

Подставим выражения (5) – (7) в уравнение Лагранжа второго рода (4), взяв соответствующие производные по выбранным 14 обобщенным координатам, получим систему уравнений, которая представлена ниже в виде одного матричного уравнения:

$$\{M\} \ddot{\bar{q}} + \{B\} \dot{\bar{q}} + \{C\} \bar{q} = \{M'\} \ddot{\bar{\eta}} + \{B'\} \dot{\bar{\eta}} + \{C'\} \bar{\eta}, \tag{8}$$

где $\{M\}, \{B\}, \{C\}$ – матрицы инерционных, диссипативных и жесткостных коэффициентов железнодорожного экипажа соответственно (приведены ниже); $\{M'\} = diag\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, m_{п1}, m_{п2}, m_{п3}, m_{п4}\}$, $\{B'\} = diag\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \beta_{п1}, \beta_{п2}, \beta_{п3}, \beta_{п4}\}$, $\{C'\} = diag\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, c_{п1}, c_{п2}, c_{п3}, c_{п4}\}$ – вспомогательные матрицы, характеризующие инерционные, диссипативные и жесткостные параметры железнодорожного пути (обычно они

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

являются диагональными, но отличны от нуля только элементы в конце и их число равно числу колесных пар в экипаже); $\bar{q}$ – вектор обобщенных координат, выбранных исследователем для описания динамического поведения экипажа; $\bar{\eta}$ – вектор возмущения.

Матрица инерционных коэффициентов экипажа $\{M\}$:

$$\{M\} = \begin{pmatrix} m_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{i1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{i1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{i2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{i2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{i1}\lambda^2 + J_{i1} + J_a(i_{ip}+1)^2/i_{ip}^2 & 0 & 0 & 0 & -m_{i1}\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{i2}\lambda^2 + J_{i2} + J_a(i_{ip}+1)^2/i_{ip}^2 & 0 & 0 & 0 & m_{i2}\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{i3}\lambda^2 + J_{i3} + J_a(i_{ip}+1)^2/i_{ip}^2 & 0 & 0 & 0 & -m_{i3}\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{i4}\lambda^2 + J_{i4} + J_a(i_{ip}+1)^2/i_{ip}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{i4}\lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -m_{i1}\lambda & 0 & 0 & 0 & m_{k i1} + m_{i1} + m_{i1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{i2}\lambda & 0 & 0 & 0 & m_{k i2} + m_{i2} + m_{i2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -m_{i3}\lambda & 0 & 0 & 0 & m_{k i3} + m_{i3} + m_{i3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{i4}\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{k i4} + m_{i4} + m_{i4} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Матрица диссипативных коэффициентов экипажа $\{B\}$:

$$\{B\} = \begin{pmatrix} 2\beta_k & 0 & -\beta_k & 0 & -\beta_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\beta_k i_k & \beta_k i_k & 0 & -\beta_k i_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta_k & \beta_k i_k & \beta_k + 2\beta_k + 2\beta_{i1} & -\beta_{i1} i_1 + \beta_{i1} i_1 - \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) + \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) & 0 & 0 & \beta_{i1}(\lambda + d) & -\beta_{i1}(\lambda + d) & 0 & 0 & -\beta_{i1} - \beta_{i1} & -\beta_{i1} - \beta_{i1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_{i1} i_1 + \beta_{i1} i_1 - \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) + \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) & \beta_{i1} i_1^2 + \beta_{i1} i_1^2 + \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d)^2 + \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d)^2 & 0 & 0 & -\beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) \cdot (\lambda + d) & -\beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) \cdot (\lambda + d) & 0 & 0 & \beta_{i1} i_1 + \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) & -\beta_{i1} i_1 - \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) & 0 & 0 & 0 \\ -\beta_k & -\beta_k i_k & 0 & 0 & \beta_k + 2\beta_k + 2\beta_{i2} & -\beta_{i2} i_2 + \beta_{i2} i_2 - \beta_{i2}(i_2 - \lambda - d) + \beta_{i2}(i_2 - \lambda - d) & 0 & 0 & \beta_{i2}(\lambda + d) & -\beta_{i2}(\lambda + d) & 0 & 0 & -\beta_{i2} - \beta_{i2} & -\beta_{i2} - \beta_{i2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{i2} i_2 + \beta_{i2} i_2 - \beta_{i2}(i_2 - \lambda - d) + \beta_{i2}(i_2 - \lambda - d) & \beta_{i2} i_2^2 + \beta_{i2} i_2^2 + \beta_{i2}(i_2 - \lambda - d)^2 + \beta_{i2}(i_2 - \lambda - d)^2 & 0 & 0 & -\beta_{i2}(i_2 - \lambda - d) \cdot (\lambda + d) & -\beta_{i2}(i_2 - \lambda - d) \cdot (\lambda + d) & 0 & 0 & \beta_{i2} i_2 + \beta_{i2}(i_2 - \lambda - d) & -\beta_{i2} i_2 - \beta_{i2}(i_2 - \lambda - d) & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{i1}(\lambda + d) & -\beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) \cdot (\lambda + d) & 0 & 0 & \beta_{i1}(\lambda + d)^2 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{i1}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_{i1}(\lambda + d) & -\beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) \cdot (\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & \beta_{i1}(\lambda + d)^2 & 0 & 0 & 0 & \beta_{i1}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{i2}(\lambda + d) & -\beta_{i2}(i_2 - \lambda - d) \cdot (\lambda + d) & 0 & 0 & \beta_{i2}(\lambda + d)^2 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{i2}(\lambda + d) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{i2}(\lambda + d) & -\beta_{i2}(i_2 - \lambda - d) \cdot (\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & \beta_{i2}(\lambda + d)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{i2}(\lambda + d) \\ 0 & 0 & -\beta_{i1} - \beta_{i1} & \beta_{i1} i_1 + \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) & 0 & 0 & -\beta_{i1}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & \beta_{i1} + \beta_{i1} + \beta_{i1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_{i1} - \beta_{i1} & -\beta_{i1} i_1 - \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) & 0 & 0 & 0 & \beta_{i1}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & \beta_{i1} + \beta_{i1} + \beta_{i1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{i1} - \beta_{i1} & \beta_{i1} i_1 + \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) & 0 & 0 & -\beta_{i1}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & \beta_{i1} + \beta_{i1} + \beta_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{i1} - \beta_{i1} & -\beta_{i1} i_1 - \beta_{i1}(i_1 - \lambda - d) & 0 & 0 & 0 & \beta_{i1}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{i1} + \beta_{i1} + \beta_{i1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Матрица жесткостных коэффициентов экипажа $\{C\}$:

$$\{C\} = \begin{pmatrix} 2c_0 & 0 & -c_1 & 0 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2c_1^2 & c_1^2 & 0 & -c_2^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & -c_1^2 + c_2^2 - & & & & & & & & & & & \\ -c_2 & c_1^2 & c_2 + 2c_0 + 2c_{\text{пс}} & -c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) + & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d) & -c_{\text{пс}}(\lambda + d) & 0 & 0 & -c_0 - c_{\text{пс}} & -c_0 - c_{\text{пс}} & 0 & 0 \\ & & & + c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & -c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) + & c_1^2 + c_2^2 + & 0 & 0 & -c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) \cdot & -c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) \cdot & 0 & 0 & c_1^2 + & -c_2^2 - & 0 & 0 \\ & & + c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) & + c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d)^2 + & & & (\lambda + d) & (\lambda + d) & & & + c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) & - c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) & & \\ & & & + c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d)^2 & & & & & & & & & & \\ -c_2 & -c_1^2 & 0 & 0 & c_2 + 2c_0 + 2c_{\text{пс}} & -c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) + & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d) & -c_{\text{пс}}(\lambda + d) & 0 & 0 & -c_0 - c_{\text{пс}} & -c_0 - c_{\text{пс}} \\ & & & & & + c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_2^2 + c_1^2 - & c_1^2 + c_2^2 + & 0 & 0 & -c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) \cdot & -c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) \cdot & 0 & 0 & c_1^2 + & -c_2^2 - \\ & & & & - c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) + & + c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d)^2 + & & & (\lambda + d) & (\lambda + d) & & & + c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) & - c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) \\ & & & & + c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) & + c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d)^2 & & & & & & & & \\ 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d) & -c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) \cdot & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d)^2 & 0 & 0 & 0 & -c_{\text{пс}}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 \\ & & & (\lambda + d) & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & -c_{\text{пс}}(\lambda + d) & -c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) \cdot & 0 & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d)^2 & 0 & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d) & 0 & 0 \\ & & & (\lambda + d) & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d) & -c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) \cdot & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d)^2 & 0 & 0 & 0 & -c_{\text{пс}}(\lambda + d) & 0 \\ & & & & & (\lambda + d) & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{\text{пс}}(\lambda + d) & -c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) \cdot & 0 & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d)^2 & 0 & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d) \\ & & & & & (\lambda + d) & & & & & & & & \\ 0 & 0 & -c_0 - c_{\text{пс}} & c_1^2 + & 0 & 0 & -c_{\text{пс}}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & c_0 + c_{\text{пс}} + c_{\text{п}} & 0 & 0 & 0 \\ & & & + c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & -c_0 - c_{\text{пс}} & -c_2^2 - & 0 & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & c_0 + c_{\text{пс}} + c_{\text{п}} & 0 & 0 \\ & & & - c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_0 - c_{\text{пс}} & c_1^2 + c_{\text{пс}}(l_2 - \lambda - d) & 0 & 0 & -c_{\text{пс}}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & c_0 + c_{\text{пс}} + c_{\text{п}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_0 - c_{\text{пс}} & -c_1^2 - c_{\text{пс}}(l_1 - \lambda - d) & 0 & 0 & 0 & c_{\text{пс}}(\lambda + d) & 0 & 0 & 0 & c_0 + c_{\text{пс}} + c_{\text{п}} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Матричное уравнение (8) представляет собой математическую модель вертикальных колебаний магистрального локомотива 2ЭС6. Уравнение (8) представляет систему дифференциальных уравнений, в которой шесть уравнений определяют колебания подпрыгивания и галопирования кузова и тележек, четыре – галопирование колесно-моторных блоков, четыре – подпрыгивание колесных пар вместе с приведенной массой пути. Полученная математическая модель позволяет определить уровень динамической нагруженности узлов механической части электровоза 2ЭС6 «Синара» путем интегрирования матричного уравнения с помощью прикладного пакета MathCAD.

Список литературы

1. Ахмадеев, С. Б. Анализ повреждений механической части электровозов нового поколения в эксплуатации (на примере 2ЭС6) / С. Б. Ахмадеев, А. М. Корнев. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием : в 3 ч. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – Ч. 1. – С. 203–208.
2. Доклад о предлагаемых мерах по повышению уровня надежности узлов локомотива серии 2ЭС6. – ООО «СТМ-Сервис». – 2016. – 19 с. – Текст : непосредственный.
3. Галиев, И. И. Методы и средства виброзащиты железнодорожных экипажей / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2010. – 340 с. – Текст : непосредственный.
4. Галиев, И. И. Научные направления школы М. П. Пахомова за 50 лет (1961–2011) / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – 175 с. – Текст : непосредственный.
5. Электровоз 2ЭС6 «Синара» / под ред. В. В. Брексона. – Верхняя Пышма : ООО «Уральские локомотивы», 2015. – 328 с. – Текст : непосредственный.
6. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 (Синара) с коллекторными тяговыми электродвигателями : Руководство по эксплуатации : В 9 ч. Часть 6. Механическое оборудование и системы вентиляции. – Верхняя Пышма : ОАО «УЗЖМ», 2008. – 97 с. – Текст : непосредственный.

7. Механическая часть тягового подвижного состава / под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с. – Текст : непосредственный.

8. Основы механики подвижного состава : учебное пособие / И. И. Галиев, В. А. Нехаев [и др]. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – Ч. 1. – 202 с. – Текст : непосредственный.

9. Основы механики подвижного состава : учебное пособие / И. И. Галиев, В. А. Нехаев [и др]. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – Ч. 2. – 165 с. – Текст : непосредственный.

10. Ушкалов, В. Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько. – Киев : Наукова думка, 1982. – 360 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Akhmadeev S. B., Kornev A. M. Analysis of damage to the mechanical part of new generation electric locomotives in operation (using the example of 2ES6) [Analiz povrezhdenii mekhanicheskoi chasti elektrovozov novogo pokoleniia v ekspluatatsii (na primere 2ES6)]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: v 3 chastiakh* (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: in 3 parts). – Omsk, 2015, Part 1, pp. 203 – 208.

2. Report on the proposed measures to improve the reliability of the components of the locomotive series 2ЭС6, STM-Servis LLC [Doklad o predpolagaemich merah po povisheniyu urovnya nadezhnosti uzlov lokomotiva serii 2ES6, ООО «STM-Servis»], 2016, 19 p.

3. Galiev I. I., Nekhaev V. A., Nikolaev V. A. *Metodi i sredstva vibrozachity geleznodorozhnykh ekipazh* (Methods and means of vibration protection of railway crews). Moscow: Educational and Methodological Center for Education in railway transport Publ., 2010, 340 p.

4. Galiev I. I., Nekhaev V. A., Nikolaev V. A. *Nauchnie napravleniya shkoly M. P. Pakhomova za 50 let (1961 – 2011)* [Scientific directions of the school M. P. Pakhomov for 50 years (1961 – 2011)]. Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2012, 175 p.

5. Brexon V. V. ed. *Elektrovoz 2ES6 «Sinara»* (Electric locomotive 2ES6 «Sinara»). Verhnyia Pishma: Ural Locomotives LLC Publ., 2015, 328 p.

6. *Elektrovoz gruzovoy postoyannogo toka 2ES6 (Sinara) s kollektornimi tyagovimi elektrodvigatelyami : Rukovodstvo po ekspluatatsii : V 9 ch. Chast' 6. Mekhanicheskoe oborudovanie i sistemy ventiliatsii* (DC electric freight locomotive 2ES6 (Sinara) with collector traction motors. User Manual: in 9 p. Part 6. Mechanical equipment and ventilation systems). JSC UZZHM Publ., 2008, 97 p.

7. Biryukov I. V. ed. *Mekhanicheskay chast tyagovogo podvizhnogo sostava* (Mechanical part of traction rolling stock). Moscow: Transport Publ., 1992, 440 p.

8. Galiev I. I., Nekhaev V. A. and others. *Osnovi mekhaniki podvignogo sostava: uchebnoe posobie* (Fundamentals of rolling stock mechanics: textbook). Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2013, Part 1, 202 p.

9. Galiev I. I., Nekhaev V. A. and others. *Osnovi mekhaniki podvignogo sostava: uchebnoe posobie* (Fundamentals of rolling stock mechanics: textbook). Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2013, Part 2, 165 p.

10. Ushkalov V. F., Reznikov L. M., Redko S. F. *Statisticheskaya dinamika relsovykh ekipazhei* (Statistical dynamics of rail carriages). Kiev: Naukova dumka Publ., 1982, 360 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галиев Ильхам Исламович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

Минжасаров Марат Хайргельдаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-55.

E-mail: mmx90@yandex.ru

Липунов Дмитрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7-908-319-03-68.

E-mail: dima-lipunov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Галиев, И. И. Формирование математической модели вертикальных колебаний электровозов 2ЭС6 с учетом динамики колесно-моторных блоков / И. И. Галиев, М. Х. Минжасаров, Д. В. Липунов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 96 – 108.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galiev Ilkham Islamovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

Minzhasarov Marat Khajergeldajevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Theoretical and applied mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-55.

E-mail: mmx90@yandex.ru

Lipunov Dmitry Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Theoretical and applied mechanics», OSTU.

Phone: +7-908-319-03-68.

E-mail: dima-lipunov@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Galiev I. I., Minzhasarov M. Kh., Lipunov D. V. Formation of a mathematical model of electric locomotives 2ES6 vertical oscillations taking into account the dynamics wheel-motor units. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 4 (48), pp. 96 – 108 (In Russian).

А. Н. Ларин, И. В. Ларина

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

ЦИФРОВИЗАЦИЯ АВТОТРАНСПОРТНОЙ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛЕЙ КАК КЛЮЧЕВОЙ ЭЛЕМЕНТ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются направления цифровизации транспортной отрасли как в Российской Федерации, так и в зарубежных странах. Представлена характеристика направлений цифровизации транспортной отрасли как элементов технологической революции (индустрия 4.0). Проведен обзор подходов и различных цифровых платформ, применяемых для цифровизации транспортной отрасли для выявления и анализа основных векторов развития в области цифровизации транспортной отрасли.

Приведены сравнительные данные по затратам на цифровую экономику и НИОКР в Европе, США и России. Показано масштабное проникновение цифровых технологий как на управленческом уровне, так и на технологическом уровне, которое в свою очередь позволяет предприятиям принимать своевременные оперативные решения в ходе операционной деятельности с целью увеличения коэффициента использования активов, сокращения текущих затрат, повышения общей эффективности и оптимизации логистической деятельности, а также позволяет осуществить интеграцию всех бизнес-процессов предприятия за счет применения IT-технологий в процессном подходе определения взаимосвязи бизнес-процессов, что в свою очередь позволяет создать безопасную интегрированную систему, включающую в себя как интеллектуальные активы, электронный документооборот, так и аналитику данных. Выделены четыре основных направления процессов цифровизации в транспортной отрасли.

Выделены основные направления процессов цифровизации в транспортной отрасли. Приведены примеры внедрения цифровых технологий на автомобильном и железнодорожном транспорте в России и мире. Рассмотрена работа локальных информационных цифровых платформ в единой цифровой платформе транспортного комплекса. Показаны преимущества использования информационных цифровых платформ. Предложена модель единой транспортной цифровой бизнес-логистической экосистемы.

Ключевые слова: Цифровизация, цифровая экономика, индустрия, транспортная отрасль, блокчейн-технологии, информационные цифровые платформы, железнодорожный транспорт, автомобильный транспорт.

Andrey N. Larin, Irina V. Larina

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

DIGITALIZATION OF THE ROAD TRANSPORT AND RAILWAY INDUSTRIES AS A KEY ELEMENT OF THE DIGITAL ECONOMY

Abstract. This article discusses the directions of digitalization of the transport industry, both in the Russian Federation and in foreign countries. The characteristic of the directions of digitalization of the transport industry as elements of the technological revolution (industry 4.0) is presented. The review of approaches and various digital platforms used for digitalization of the transport industry to identify and analyze the main vectors of development in the field of digitalization of the transport industry.

Comparative data on the costs of the digital economy and R&D in Europe, the USA and Russia are presented. The large-scale penetration of digital technologies is shown, both at the managerial level and at the technological level, which in turn allows enterprises to make timely operational decisions during operational activities in order to increase the asset utilization rate, and also allows for the integration of all business processes of the enterprise through the use of IT technologies in the process approach of determining the relationship of business processes, four main directions of digitalization processes in the transport industry are identified.

The main directions of digitalization processes in the transport industry are highlighted. Examples of the introduction of digital technologies in road and rail transport in Russia and the world are given. The work of local digital information platforms in a single digital platform of the transport complex is reviewed. The advantages of using digital information platforms are shown. A model of a unified digital transport business-logistics ecosystem is proposed.

Keywords: digitalization, digital economy, industry, transport industry, blockchain technologies, digital information platforms, rail transport, automobile transport.

Транспортная отрасль играет важную роль в российской экономике. Ее доля в структуре валовой добавленной стоимости достигает 7 %. На территории Российской Федерации протяженность железнодорожных линий общего пользования составляет 86 тыс. км и занимает третье место в мире; протяженность автомобильных дорог занимает пятое место в мире и составляет 1529 тыс. км; протяженность внутренних водных путей составляет 101 тыс. км и занимает второе место в мире, а г. Новороссийск, являясь крупнейшим портом по объему перевалки (155 млн т в год), занимает третье место в Европе. В условиях глобализации мировой экономики ключевым индикатором ее роста является цифровизация. Глобальное движение в сторону цифровизации трансформирует не только транспортную отрасль, но и цифровизацию и интеграцию процессов в рамках всей страны [1].

Методологической основой для написания настоящей статьи послужили научные представления про цифровизацию как экономическое явление таких исследователей, как Т. В. Авдиенко, А. Н. Дмитриевский, Т. Н. Юдина, J. E. Grunig, A. J. Ritchie. Научно-методические аспекты транспортной отрасли рассмотрены в работах отечественных ученых и специалистов: А. Г. Белоусова, Е. К. Ивакина, М. Е. Залмановой, Д. Т. Новикова, Т. А. Прокофьевой, И. В. Терениной и других авторов. Проблемы управления транспортной отрасли, вопросы применения экономико-математического моделирования в цифровизации и управлении транспортной отрасли исследовали многие ученые, среди них В. В. Гасилова, И. И. Заметалина, А. Б. Мальцева, Р. А. Миянова, О. Г. Солнцева, С. М. Резер и другие авторы. Проблемы и перспективы цифровизации транспортной отрасли в условиях глобализации мировой экономики изучались недостаточно углубленно, что и предопределяет актуальность темы исследования.

Целью работы является выполнение обзора подходов и различных цифровых платформ, применяемых для цифровизации транспортной отрасли, для выявления и анализа основных векторов развития в области цифровизации транспортной отрасли. Задачи исследования:

1. Выявить базовые тренды современной цифровизации транспортной отрасли.
2. Определить основные цели внедрения цифровых технологий в транспортной отрасли.
3. Рассмотреть перспективы охвата всех элементов транспортной отрасли в процессе цифровизации.
4. Выделить ключевые направления процесса цифровизации транспортной отрасли.
5. Рассмотреть результаты использования блокчейн-технологий.
6. Рассмотреть работу локальных информационных цифровых платформ в единой цифровой платформе транспортного комплекса и показать их преимущества.

Результаты исследований. В ходе решения поставленных задач авторами были выявлены пять основных моментов в выбранной предметной области:

- 1) проанализированы технологии искусственного интеллекта (прежде всего Big data, блокчейн, применение технологии «Интернет вещей»);
- 2) рассмотрены перспективы комплексной цифровизации транспортной отрасли;
- 3) выявлены особенности процессного подхода при цифровизации;
- 4) определены ключевые направления и цели цифровизации транспортной отрасли;
- 5) предложена модель цифровой бизнес-логистической экосистемы.

«Цифра» меняет каналы движения товаров, форматы поставки и процессы управления. Компании, вкладывающие денежные средства в цифровые технологии, становятся лидерами отрасли. Однако в целом уровень диджитализации российской транспортной отрасли остается невысоким. Для сравнения средний показатель по другим отраслям – 83 %, как отмечают аналитики PwC в своем исследовании [2].

В настоящее время мировое сообщество является активным участником четвертой промышленной революции, известной также как индустрия 4.0 (впервые термин упоминался Клаусом Швабом в 2011 г. в Германии и обозначал технологии «умных» заводов, а в массовое употребление введен с 2016 г. (<https://trends.rbc.ru/trends/industry>), в которой выделяют следу-

ющие составляющие: полная оцифровка пространства, субъектов и процессов; новые материалы; новое производство; новые системы управления. Одна из производных индустрии 4.0 – цифровая экономика.

В мировой практике в настоящее время не сложилось единообразного определения цифровой экономики. Если резюмировать весь спектр существующих определений, то в международной практике при описании цифровой экономики акцент делается на технологиях и связанных с их использованием изменениях в способах взаимодействия экономических агентов. В Европейской комиссии под цифровой экономикой подразумевается экономика, зависящая от цифровых технологий. В ОЭСР цифровая экономика характеризуется опорой на нематериальные активы, массовое использование данных, повсеместное внедрение многосторонних бизнес-моделей и сложность определения юрисдикции, в которой происходит создание стоимости. Всемирный банк определяет цифровую экономику как экономику, в которой благодаря развитию цифровых технологий наблюдается рост производительности труда, конкурентоспособности компаний, снижение издержек производства, создание новых рабочих мест, снижение бедности и социального неравенства [3]. Достаточно емкое определение цифровой экономики сформулировано коллективом авторов в научной статье [4], под которым понимается объединение взаимосвязанных технологий по сбору, хранению, обработке, передаче данных в информационных системах, а также статистических данных. В ЕАЭС в рамках реализации цифровой повестки понимается круг актуальных для ЕАЭС вопросов по цифровым преобразованиям в рамках развития интеграции, укрепления единого экономического пространства и углубления сотрудничества государств-членов, отраженный в Заявлении о цифровой повестке ЕАЭС (подписано главами государств-членов ЕАЭС 26 декабря 2016 г.). Исходя из широкого многообразия сложившихся терминов и определений для целей исследования можно выделить основную объединяющую суть цифровой экономики, заключающуюся в: технологической трансформации, инициированную массовым внедрением цифровых решений, а также формированием товарных пар в реальном времени – прогноз продаж и покупок, риска и события, что в свою очередь позволяет более информированным хозяйствующим субъектам принимать правильные решения. Одним из основных элементов стратегии развития цифровой экономики является вопрос модернизации транспортной отрасли.

Актуальность данного направления хорошо отражена в таблице роста доли цифровой экономики в валовом внутреннем продукте (ВВП) стран G20 с 2010 по 2021 г. (Eurostat – 30 поубrya 2021 goda).

Таблица 1 – Рост доли цифровой экономики в ВВП стран G20 с 2010 по 2021 г.

Страна	Доля цифровой экономики в ВВП, %		
	2010 г.	2016 г.	2021 г.
Великобритания	8,3	12,4	14,2
Китай	5,5	6,9	10,0
Индия	4,1	5,6	5,6
США	4,7	5,4	10,9
Германия	3,0	4,0	8,2
Италия	2,1	3,5	7,3
Франция	2,9	3,4	7,2
Бразилия	2,2	2,4	6,2
Россия	1,9	2,8	3,9
Австралия	3,4	3,7	5,4

По прогнозам консалтинговой компании Accenture, использование цифровых технологий должно добавить в 2022 г. 1,36 трлн долларов США, или 2,3 % ВВП в общем объеме ВВП десятки ведущих мировых экономик. ВВП развитых стран увеличится за счет цифровой экономики на 1,8 %, а ВВП развивающихся стран – на 3,4 %. Лидирование в цифровой экономике, а также в цифровизации транспортной отрасли напрямую связано с затратами на научные исследования (таблица 2).

Таблица 2 – Затраты на научные исследования ведущих стран мира за 2020 г. [5]

Страна		Ведущие страны мира									
		США	Китай	Япония	Германия	Индия	Южная Корея	Франция	Россия	Великобритания	Бразилия
Затраты, млрд \$	2018 г.	565,76	499,63	189,51	128,55	89,23	89,47	68,33	61,55	52,03	39,38
	2020 г.	657,5	525,7	173,3	147,5	58,7	102,5	72,8	44,5	56,9	36,3

Из приведенных данных видно, что Россия по объему внутренних затрат на исследования и разработки (ИР) в расчете по паритету покупательной способности национальных валют занимает девятое место в мире (\$44,5 млрд). Пятерку лидеров с заметным отрывом от других стран составляют США (\$657,5 млрд), Китай (\$525,7 млрд), Япония (\$173,3 млрд), Германия (\$147,5 млрд) и Республика Корея (\$102,5 млрд).

С точки зрения приоритетности сферы исследований и разработки в структуре экономики, т. е. по удельному весу затрат на науку в ВВП, Россия (1,04 %) занимает лишь 37-е место [6]. Топ-5 по этому показателю занимают: Израиль – 4,9 %, Республика Корея – 4,6, Тайвань – 3,5, Швеция – 3,4, Япония – 3,2 %. США и Китай, лидирующие по затратам на отрасль, располагаются на 9-й и 14-й позициях (3,1 и 2,2 %).

В ближайшие 15 – 25 лет доля цифровой экономики в мировом ВВП составит не менее 50 % – \$100 – 200 трлн (отчет LETA Capital и Devar «State of Phygital» о состоянии рынка phygital в третьем квартале 2021 г.). Phygital в омниканальном маркетинге либо в розничной торговле описывает взаимодействие онлайн и офлайн, а в контексте статьи этот термин рассматривается как обеспечение полной интеграции виртуальной среды в реальную жизнь транспортной отрасли. По версии компаний, основу phygital в транспортной отрасли в 2021 – 2023 гг. составят следующие технологии: дополненная и смешанная реальности; IoT; «умные» сенсоры; маячки (QR-коды, NFC, RFID); 5G; человекомашинные интерфейсы + механика UX; носимые устройства; когнитивные вычисления; кибер-физические системы.

Наиболее существенное увеличение цифровизации с 2022 до 2030 г. эксперты ожидают в таких отраслях, как телекоммуникации в пять раз – с \$2 до \$10 трлн, информационные технологии в четыре раза – с \$5 до \$21 трлн, электронная коммерция в три раза – с \$9 до \$25 трлн.

По оценкам специалистов, стремительно развивающийся сектор экономики, включающий в себя коммуникации на стыке цифрового и физического пространств, к 2030 г. станет одним из самых перспективных. Этому способствует непрерывный рост числа пользователей Интернетом в мире. По состоянию на апрель 2021 г. зафиксировано 4,8 млрд (более 60 % населения). При этом за последние 12 месяцев прирост новых пользователей составил 330 млн – 990 000 новых пользователей каждый день, что в свою очередь для обеспечения конкурентоспособности транспортной отрасли требует ее дальнейшей цифровизации.

Сама суть цифровизации – это комплекс процессов в экономике и обществе, который заключается в массовом распространении технологий, основанных на использовании бинарного кода, который влечет за собой очевидные качественные изменения в организации технологического и общественного уклада.

Касательно транспортной сферы цифровизация – это масштабное проникновение цифровых технологий как на управленческом, так и на технологическом уровне, что в свою очередь позволяет предприятиям своевременно и оперативно принимать решения логистической деятельности предприятия и оперировать операционной деятельностью для повышения не только коэффициента использования активов, но и рационального использования текущих затрат и издержек, снижения количества неэффективных операций и оптимизации всех элементов логистической цепочки. Все перечисленное выше позволяет осуществить интеграцию всех бизнес-процессов предприятия за счет применения IT-технологий в процессном подходе определения взаимосвязи бизнес-процессов, что в свою очередь позволяет сформировать эффективную и гибкую интегрированную цифровую транспортную систему с применением интеллектуальных систем, электронного документооборота, мониторинга и анализа данных, а также

системы безопасности. Переход на цифровые технологии в транспортной системе оказывает непосредственное влияние на всю логистическую цепочку поставок, что приводит к снижению рисков нарушений во время транспортировки грузов и пассажиров, разбивке процессов на подпроцессы и их синхронизации, мониторингу и анализу оперативной обстановки в режиме настоящего времени, что в свою очередь приводит к принятию оперативных решений, соответствующих данной обстановке в конкретном месте и дает преимущество над конкурентами в оперативном управлении всеми транспортно-логистическими процессами (Standart ISO 28002:2011). Совершенствование цифровой инфраструктуры происходит за счет улучшения качества коммуникационных сетей за счет внедрения технологий 4G и 5G и оптоволоконных средств передачи данных, которые позволяют улучшить доступ в Интернет. В совокупности все такие интегрированные системы образуют инфраструктуру транспорта и интегрируют в себе компьютерные аппаратные и программные технологии, логистические системы и совершенные цифровые исполнительные механизмы [6].

Исходя из перечисленного выше можно выделить четыре основных направления процесса цифровизации в транспортной отрасли (рисунок 1).



Рисунок 1 – Направления цифровизации транспортной отрасли

Цифровизация транспортной инфраструктуры – возможность регулирования транспортного потока, отслеживания его составляющих и снижения, связанных с ним издержек и затрат.

Роботизация производственных процессов – использование автономных транспортных средств и оборудования, для работы с которыми не требуется вмешательство человека.

Масштабная автоматизация управленческих процессов – снижение риска допущения ошибок, обусловленных человеческим фактором.

Внедрение систем автопилота. В настоящее время эти системы реализованы на гражданских самолетах и судах, занимающихся морскими грузовыми перевозками, а также в качестве эксперимента – на общественном транспорте как в России, так и за рубежом [7].

Варианты развития цифровизации в мировой транспортной отрасли представлены следующими странами.

США. По экспертным оценкам можно смело утверждать, что цифровизация в мире началась с Запада: в США еще в 1990-х гг. стали появляться первые онлайн-магазины и торговые площадки – курс задал Amazon (1994). Однако еще за 30 лет до этого в Америке была создана система резервирования авиабилетов Sabre, обрабатывающая сегодня более 30 % всех бронирований. Ее используют и российские воздушные перевозчики.

По мнению американских экспертов, внедрение информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в производство и в транспортную отрасль предоставляет огромные возможности, позволяя бизнесу совершенствовать технологические процессы, сокращать сроки выпуска продукции, снижать производственные затраты, улучшать взаимодействие с потребителями. Те, в свою очередь, получают доступ к более широкому спектру коммерческих предложений [8].

Автомобильная отрасль. В США основной программой развития транспортной системы является программа внедрения автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУД), которая включает в себя математическое моделирование движения автомобилей и транспортных потоков (так называемое микро- и макро моделирование); единую систему

информации; электронную систему выбора и указания маршрута; систему оказания помощи водителям (отчет U.S. Department of Transportation. Strategic Plan for FY 2018 – 2022. Draft for Public Comment – октябрь 2018).

Как и во многих других отраслях, американские проекты на рынке автомобильных грузовых перевозок являются первопроходцами относительно остального мира. Перечислим часть таких проектов: первая биржа «DAT.com (DIAL- at –Truck)» – 1978 г.; биржа Freightquote – 1998 г. (куплена C.H. Robinson за \$365 млн в 2015 г.); первый маркетплейс Uship.com – 2006 г.; первый uber-like проект Cargomatic – 2013 г.; Convoy – 2014 г.; TruckerPath – 2016 г., они зашли на рынок через приложение для перевозчиков.

В декабре 2019 г. в США закончился трехлетний период перехода на электронные устройства логирования (ELD) рабочего времени водителей грузовиков и автобусов. В России и Европе этот прибор называется тахографом. Внедрение ELD-устройств привело к нескольким последствиям.

1. Новый сегмент рынка получил широкое распространение благодаря государственным инициативам. Объем рынка ELD-устройств оценивают в \$4 млрд в США, не считая рынка Канады.

2. Появились ELD-операторы: сегодня их около 250 в США, и лицензию может получить любая компания, соответствующая требованиям DOT (Министерство транспорта США).

3. Государство получило возможность следить онлайн за соблюдением правил работы водителя, что существенно снижает возможности злоупотребления со стороны игроков рынка и ставит всех в одинаковые условия.

4. Повысилась безопасность дорожного движения.

5. Улучшились фискальные функции государства, теперь все рабочие часы водителя учтены, как и подоходный налог с них.

6. Появилась повсеместная возможность оцифровки данных о передвижениях транспортного средства и его состоянии.

Сравнительно простой способ получения лицензии оператора привел к высокой конкуренции на рынке ELD-устройств, среди участников – гиганты от AOL до многочисленных стартапов.

США активно инвестируют в технологию «Интернет вещей» (Industrial Internet of things, IIoT), обеспечивающую сбор, обработку и анализ данных с мониторингом производства и потребления товаров и услуг, промышленность США ожидает увеличение выручки на 493 млрд долл. и сокращение расходов на 421 млрд долл. в течение ближайших пяти лет за счет упрощения взаимодействия между производителем – транспортной отраслью – покупателем. (<https://www.pwc.com/industry-4.0>).

Железнодорожная отрасль. В 2008 г. правительство США ввело законодательство, которое требует внедрения усовершенствованных мер безопасности в железнодорожном секторе. Это известно как Закон по улучшению безопасности на железнодорожном транспорте (RSIA). Благодаря данному закону все железные дороги класса I и пассажирские железнодорожные операторы внедрили систему Положительного контроля поездов (PTC) в части предупреждения столкновений.

PTC предназначен для предотвращения столкновений поезда с поездом, крушений, вызванных превышением скорости, несанкционированных вторжений поездов на участки, где работают дорожники по техническому обслуживанию и блокировке движения поезда через стрелку влево в неправильное положение.

Существуют четыре основных элемента в системе PTC, которые интегрированы с помощью беспроводной системы связи: бортовая система, придорожные системы, серверы бэк-офиса, содержание путей.

PTC позволил увеличить пропускную способность дорог на 40 % за сравнительно малые инвестиции и небольшое время. Также отмечено снижение потерь на перевозках за счет

уменьшения аварий (когда железная дорога стоит, она теряет деньги, а когда работает – приносит деньги). РТС внедрен и уже представляет собой сложную прогностическую систему, которая работает на предотвращение несчастных случаев.

Система Railinc – инновационная компьютеризированная система инвентаризации, которая регистрирует размеры, габариты и грузоподъемность подвижного состава в отрасли железнодорожных вагонов. Примерно 570 сетей железных дорог проходят через интеллектуальные датчики и системы с использованием IoT, которые отслеживают движение и состояние железнодорожных вагонов по пути. Railinc анализирует эту информацию, чтобы предоставлять железным дорогам и их клиентам существенные результаты анализа с целью повышения их безопасности и эффективности.

Применение пневматических тормозов с электронным управлением (ЕСР). ЕСР-тормоза обеспечивают распространение электронного тормозного сигнала мгновенно по всему поезду, позволяя вагонам тормозить быстрее, чем с обычными пневматическими тормозами (www.gao.gov).

Система «Colas Rail – экспресс-доставки» – высокоскоростные железнодорожные грузовые решения с помощью клиентов. Данная система «экспресс-сервиса» предназначена для обеспечения большего охвата доставки в тот же день от центральных складов и более быстрого времени транзита по сравнению с автодорогой и «классическими» железнодорожными грузовыми перевозками и прямого доступа для железнодорожных грузов в городских центрах.

США можно охарактеризовать как страну, у которой образование и научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) являются основной движущей силой цифрового роста [5]. Они продолжают опираться на использование талантов всего мира, умение быстро разрабатывать и внедрять новые технологии, сохраняя за собой лидирующую позицию. Одной из ключевых идей стратегической инициативы является создание в стране цифрового хаба (Digital Hub), который представляется как концентрированное сотрудничество стартапов на небольшом пространстве. В качестве примера такого цифрового концентратора в США используется «Силиконовая долина».

ЕВРОПА. Европейская комиссия определяет цифровую трансформацию как «объединение передовых технологий и интеграцию физических и цифровых систем, преобладание инновационных бизнес-моделей и новых процессов, а также создание интеллектуальных продуктов и услуг» (www.golandberger.com). Сложность продвижения цифровизации европейских стран обусловлена не только наличием разветвленной транспортной инфраструктуры и транспортных систем, но и особенностями их функционирования и разной степенью гибкости таких систем при внедрении единых требований при цифровизации транспортной отрасли.

Автотранспортная отрасль. Во Франции в рамках экологических и цифровых проектов разрабатывают следующие программы: программа инвестиций в будущее (IAP) – планы по развитию транспортной инфраструктуры; программа «Транспортное средство будущего» – технологическое структурирование автомобильных, морских и железнодорожных перевозок, связанное с производством пусковых механизмов (тепловых, гибридных или электрических), а также с уменьшением веса и разработкой автономных транспортных средств; программа «Новая промышленная Франция» – «Экологическая мобильность» и «Транспорт завтрашнего дня», которые предусматривают создание технологических дорожных карт (www.gouvernement.fr).

В Великобритании главная задача цифровизации транспортной отрасли – повышение уровня покрытия сетями WI-FI пассажирского и грузового транспорта, что в свою очередь позволит повысить качество и надежность соединения, а это даст возможность диспетчерам и клиентам своевременно получать не только сообщения о проблемах на дороге, но и локализовать места данных проблем, что позволит оперативно изменять транспортные маршруты и

приведет к гибкости в логистических процессах на транспорте. Все, перечисленное выше, позволит функционировать технологии «подключенные и автономные транспортные средства» и «интеллектуальные автомагистрали» в режиме онлайн (www.semanticscholar.org).

Железнодорожная отрасль. На основе исследований, проведенных в ключевых секторах экономики Германии и Европы, консультант по стратегии компания Роланд Бергер (www.rolandberger.com) определил четыре рычага цифрового преобразования для железнодорожной отрасли: цифровые данные, которые после сбора и анализа обеспечивают лучшие прогнозы и решения; системы автоматизации, которые увеличивают скорость, снижают частоту появления ошибок и эксплуатационные расходы; связность, которая синхронизирует цепочки поставок и сокращает инновационные циклы; цифровой доступ клиентов, который позволяет компаниям предлагать клиентам прозрачность и новые услуги.

В ЕС насчитывается около 30 национальных систем железнодорожной сигнализации, что может вызвать технические или эксплуатационные проблемы на границах.

Европейский союз (ЕС), следуя принятым решениям, требует перехода железнодорожной отрасли к единой системе через требование совместимости, реализуемое через ERTMS. С внедрением ERTMS увеличиваются скорость поездов и их плотность на железнодорожной сети. Установленный как на путевой системе, так и на борту, он состоит из европейской системы управления поездом (ETCS), обеспечивающей, чтобы поезд не превышал безопасную скорость и расстояние от других поездов; глобальной системы мобильной связи на железных дорогах (GSM-R), представляющей стандарт радиосвязи для железнодорожных перевозок; системы управления дорожным движением с целью оптимизации движения поездов за счет «умной» интерпретации графиков и данных поездов, известной как Управление уровнями европейского трафика L (сейчас на стадии разработки); набора правил эксплуатации (европейских рабочих правил).

К 2023 г. ERTMS должна оборудовать 50 % из девяти основных грузовых коридоров, а остальные – к 2030 г. Агентство железных дорог Европейского союза определено как орган по внедрению и стандартам [9].

Развиваются цифровые транспортные коридоры TEN-T, которые формируют свои требования к инфраструктуре и подвижному составу.

Одним из наиболее ярких примеров использования искусственного интеллекта (ИИ) в железнодорожных технологиях является его вклад в автоматизацию работы поездов (АТО). АТО передает [9] ответственность за управление операциями от машиниста к системе управления поездом с различной степенью автономии. Международная электротехническая комиссия установила четыре стандартных класса автоматизации поездов: третий класс соответствует операциям без водителя (с членами экипажа на борту), а четвертый – автономным и необслуживаемым поездам. В 2019 г. около 1200 км действующих автоматизированных линий метро обслуживали с помощью АТО (41 город в 19 странах мира), а согласно прогнозам к 2025 г. будет насчитываться более 2300 км автоматизированных линий [9].

Deutsche Bahn – одна из самых передовых железнодорожных сетей в мире – использует технологию интеллектуальных датчиков KONUX, чтобы помочь им сократить расходы на техническое обслуживание и сбои, вызывающие задержки (<https://www.konux.com/>). В настоящее время KONUX оцифровывает высокоскоростную железнодорожную сеть Deutsche Bahn посредством мониторинга состояния коммутаторов и переездов, которые являются важной частью железнодорожной инфраструктуры.

В Европе успешно используется модель контроля движения поездов (RBC). В этом помогают датчики и электронные маяки, которые закрепляются на трассе железнодорожного пути. Они сообщают о своем местоположении и скорости в центр (RBC) с помощью радиосигналов. RBC получает такие данные от всех поездов в одной из рабочих зон, а затем отображает реальный цифровой трафик в сети.

ДРУГИЕ СТРАНЫ. Рассматривая другие страны мира, можно выделить ряд следующих технологий применяемых для цифровизации транспортной отрасли:

в Сингапуре в соответствии с общепринятым направлением развития мировой транспортной отрасли переход на цифровизацию транспортной системы будет сопровождаться внедрением таких систем, как беспилотные поезда, роботизированные погрузчики, автономные колонны грузовиков, автономные такси, краткосрочная аренда автомобилей и велосипедов, устройства для персональной мобильности, автономные автобусы [10];

в Австралии реализация цифровой транспортной системы предполагает внедрение следующих элементов – беспилотные грузовики Rio Tinto, возможность доступа и обработки больших массивов данных (Big data) (внедрение дорожных камер и датчиков) (www.australia.gov.au);

в Китае, Японии и Корее применяют единую цифровую транспортно-логистическую платформу Logink, позволяющую максимально объединить все функции межорганизационного взаимодействия для одновременного оперативного решения всех поставленных задач – улучшения сервиса и уменьшения транзакционных издержек [11].

РОССИЯ. В Российской Федерации основным документом развития транспортной отрасли является Транспортная стратегия Российской Федерации. Первоначально Транспортная стратегия утверждена была в 2008 г. и рассчитана на период до 2030 г. (Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р). Правительство РФ 26 марта 2020 г. одобрило проект Транспортной стратегии РФ на период до 2035 г. В соответствии с данным проектом стратегия устанавливает пять приоритетных целей: обеспечение транспортной связанности территории страны; организация эффективной перевозки грузов; организация доступных и качественных перевозок пассажиров; встраивание транспортной системы в мировую транспортную сеть; обеспечение безопасности транспортного комплекса. Для достижения каждой из целей определены конкретные задачи с показателями, которые установлены для горизонта 2024, 2030 и 2035 гг. [12].

Транспортная стратегия – это важнейший документ, который подразумевает полнейшую интеграцию представления о пространственном развитии, экономической активности, перспективных транзитных потоках с планами развития опорных транспортных сетей. Транспортная стратегия определяет принципы, правила работы транспортной системы, в том числе подходы к формированию тарифов, а также предусматривает развитие обеспечивающих систем, в том числе с использованием цифровизации.

В соответствии с Транспортной стратегией применение цифровых решений на транспорте в настоящее время реализовано следующими цифровыми технологиями:

цифровая платформа, реализующая приобретение билетов в электронном виде при пассажирских перевозках на воздушном, автомобильном и железнодорожном транспорте, а также приобретение единого электронного билета на все виды транспорта;

оформление в цифровой среде перевозок грузов в морских портах и железнодорожным транспортом с использованием цифровых систем Этран и Интертран;

применение единой цифровой платформы «Единой государственной информационной системы обеспечения транспортной безопасности» (ЕГИС ОТБ), которая гарантирует единое информационное обеспечение транспортной безопасности.

Цифровизация транспортной отрасли подразумевает под собой реализацию различных проектов, которые имеют свою актуальность и предназначение. Одним из приоритетов развития транспортной отрасли в соответствии с Транспортной стратегией является обеспечение функционирования опорной сети транспортно-логистических центров. Данная задача рассматривается в рамках реализации первоочередных национальных и стратегических задач в области цифровизации транспортных систем и цифровой логистики, сформулированных в майском Указе Президента России «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».

Реализация данного указа неотъемлемо связана с созданием единой цифровой государственной платформы в области единого транспортного комплекса Российской Федерации,

цифровой информационно-аналитической системы сети цифровых транспортно-логистических узлов и цифровой системы координации транспортных потоков в цифровой логистике.

Данная цифровая платформа транспортного комплекса предназначена для объединения всех элементов цифрового транспорта и цифровой логистики и играет системообразующую роль в формировании Единой цифровой транспортно-логистической среды (ЕЦТЛС). Данная среда предназначена для обеспечения интеграции всех цифровых систем, обеспечивая безопасный режим сбора, агрегации и обмена транспортно-логистическими данными между коммерческими пользователями и органами государственной власти, решая задачи прослеживаемости всей цепи перевозки. ЕЦТЛС – это множество разнообразных цифровых технологий и платформ, предназначенных для оперативного и безопасного обмена актуальными, унифицированными и достоверными данными обо всех этапах перевозочного процесса в реальном режиме времени. На базе данной платформы создаются новые цифровые транспортные стандарты, интегрируются многочисленные информационные ресурсы для населения, бизнеса и государства. Сервисы цифровой платформы позволяют реализовать взаимодействие с партнерами – странами ЕАЭС, со всей мировой транспортной системой в режиме «единого окна». Основными задачами данного проекта являются повышение эффективности взаимодействия всех процессов в транспортном комплексе; полная интеграция цифрового транспортного комплекса Российской Федерации в мировую цифровую транспортную систему; переход на электронный документооборот с использованием лучших международных и отечественных стандартов и практик при внедрении цифровых технологий в транспортной отрасли; обеспечение максимальной загрузки и конкурентоспособности отечественной транспортной отрасли и инфраструктуры в новых условиях глобального мирового транспортного рынка.

Для большинства современных транспортных компаний переход на цифровые технологии – это одно из важнейших условий выживания в глобальной конкурентной борьбе. Современные транспортные компании должны применять новые цифровые решения в организации перевозок, их оформления, контроля и мониторинга.

Рассматривая стратегии цифровой трансформации для автомобильной и железнодорожной транспортных отраслей, можно выделить следующее.

Автомобильный транспорт. Автомобильная транспортная отрасль в Российской Федерации – это около 60 млн транспортных средств. В настоящее время очень актуален вопрос о конкурентоспособности автотранспортной отрасли, о ее интеграции в другие транспортные отрасли, решить который и призвана цифровизация транспортной отрасли. Цифровизация работы автотранспортной отрасли и транспортно-логистических услуг предполагает реализацию следующих условий: наличие телематических сервисов, передающих данные о передвижении и режиме работы транспорта; большие объемы данных (Big Data); технология «одно окно» – получение полного набора услуг клиентом в одном месте; наличие единого цифрового логистического пространства, которое облегчит процессы доставки товаров транспортом в любую точку страны.

В рамках цифровизации автотранспортной отрасли в соответствии с основными задачами евразийского экономического союза (ЕАЭС) формируется экосистема цифровых транспортных коридоров (ЦТК), и Минтранс в 2020 г. начал проводить апробацию проекта для тестирования основных формирующих ее сервисов.

По экспертным оценкам внедрение системы ЦТК в автотранспортной системе позволит сократить расходы на транспортную составляющую в конечной стоимости продукции примерно на 20 %, повысит качество, надежность и безопасность перевозок в автотранспортной отрасли, пропускную способность международного транспортного коридора ЕАЭС, его конкурентоспособность и коммерческую привлекательность за счет внедрения единого электронного документа (билета), эффективное планирование и управление перевозочным процессом, отслеживание грузов и трансграничный обмен данными.

Создание экосистемы ЦТК позволит достичь синергетического эффекта при цифровизации транспортно-логистической отрасли на территориях государств – членов ЕАЭС, а также

позволит расширить цифровую повестку бизнеса и обеспечить развитие благоприятной деловой среды.

Другим элементом цифровизации автотранспортной отрасли является внедрение электронной транспортной накладной и электронного путевого листа при автотранспортных перевозках. Массовый переход на электронный документооборот в настоящее время затруднен из-за необходимости предоставления бумажных версий документов органам государственной власти. Ежегодные затраты автомобильных грузоперевозчиков составляют более 2 % в год от общих расходов на логистику при оформлении порядка 3 млрд перевозочных документов. Платформа цифрового информационного взаимодействия бизнеса и государства представлена прототипом государственной системы в режиме «единого окна». Данная цифровая платформа обеспечивает верификацию данных и присвоение уникального идентификатора, формирование юридически значимых реестров, доступность информации в режиме реального времени, прослеживаемость перевозки.

Одним из элементов цифровизации автотранспортной отрасли является повсеместное использование онлайн-тахографов. Все это будет реализовано в автоматизированной информационной системе (АИС) «Тахографический контроль».

К основным элементам «Информатизированные транспортные системы» (ИТС), устанавливаемым в рамках реализации национального проекта «Безопасные качественные дороги» (БКАД) относятся табло и знаки переменной информации, видеокамеры, детекторы транспорта, метеостанции. В дальнейшем в соответствии со стратегией развития транспортной отрасли планируется увеличить количество участков автомобильных дорог, оснащенных элементами ИТС, ориентированными на применение энергосберегающих технологий освещения автомобильных дорог, до 40 единиц, 16 из которых планируются на дорогах федерального значения; уже выполнено оснащение 10 участков автомобильных дорог федерального значения элементами ИТС, ориентированными на автоматизацию процессов управления дорожным движением, а также на 11 участках автомобильных дорог и искусственных сооружений регионального значения были размещены элементы ИТС, ориентированные на автоматизацию процессов управления дорожным движением.

Все это направлено на повышение конкурентоспособности автотранспортной отрасли, увеличение объема экспорта транспортных услуг, совершенствование пространственной организации транспортной сети на основе цифровых данных и на другие важные задачи отрасли.

Рассматривая внедрение цифровых площадок в автотранспортной отрасли, необходимо упомянуть платформу TRAFFIC, разработанную компанией BIA-Technologies. Данная цифровая площадка позволяет организовать взаимодействие не только между продавцами и транспортным предприятием, но и между покупателями транспортных услуг.

На данной цифровой площадке предусмотрены следующие услуги:

- а) мониторинг в реальном времени актуальных рыночных цен на грузоперевозки на всех видах транспорта;
- б) страхование груза в режиме онлайн по системе smart-контрактов;
- в) отслеживание в реальном времени не только статуса заказа, но и его целостности;
- г) возможность факторинга.

Данная цифровая площадка позволяет сократить время нахождения транспортных средств во время погрузочно-разгрузочными операций. По экспертным оценкам время нахождения под погрузочно-разгрузочными операциями сократится в два раза и на треть произойдет высвобождение персонала. Основным пользователем данной цифровой платформы является логистическая компания «Деловые линии» [13].

Железнодорожная транспортная отрасль. Распоряжением Правительства РФ от 19 марта 2019 г. №466-р утверждена долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 г. Данной программой, в частности, предусматривается переход на «циф-

ровую железную дорогу». Программа разработана с учетом послания Президента России Федеральному собранию и Указа Президента от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».

Рассматривая принципы реализации транспортной стратегии на железнодорожном транспорте, можно выделить основной принцип внедрения данной стратегии – формирование восьми цифровых платформ – комплексов взаимосвязанных технологических решений для взаимодействия участников транспортного рынка. Это следующие платформы: мультимодальных пассажирских перевозок; мультимодальных грузовых перевозок; транспортно-логистических узлов; оператора линейной инфраструктуры; логистического оператора электронной коммерции; управления перевозочным процессом; тягового подвижного состава; непроизводственных процессов.

Стратегией развития транспортного комплекса запланирована реализация более 50 цифровых проектов в этих сферах, а также внедрение и использование передовых отечественных и зарубежных инновационных разработок на базе таких цифровых технологий, как хранение и управление «большими массивами» данных, распределенные реестры, промышленный «Интернет вещей», квантовые вычисления и др. [12].

К настоящему времени в рамках цифровизации железнодорожного транспорта получены следующие промежуточные показатели целевого состояния информационных технологий ОАО «РЖД»:

внедрены платформенные решения, интегрированные с производственными системами ОАО «РЖД», обеспечены в рамках ведомственного проекта Минтранса «Цифровой транспорт и логистика» их координация и взаимодействие с цифровыми решениями транспортного комплекса и возможность строить на этой базе цифровые сервисы, созданы электронные каналы взаимодействия с рынком (пассажиры, грузоотправители, сервисные компании), федеральными органами исполнительной власти и в рамках трансграничного взаимодействия (транспортных коридоров);

в технологические процессы ОАО «РЖД» встроены системы Интернета вещей, обработки больших данных, распределенного реестра, цифрового моделирования и искусственного интеллекта;

созданы новое поколение мобильных рабочих мест и электронный документооборот в производственных и управленческих процессах;

модернизирована вычислительная и телекоммуникационная инфраструктура, обеспечивающая гарантированный уровень доступности информационных сервисов;

внедрены централизованные средства обеспечения информационной безопасности на базе импортонезависимых решений;

выстроена системная работа с новыми технологиями (поиск, апробация, прототипирование, внедрение).

На базе перечисленных выше платформ в ОАО «РЖД» начал набирать обороты проект «Цифровая железная дорога», который интегрирует в себе комплекс различных цифровых технологий, направленных не только на повышение качества услуг в области пассажирских и грузовых перевозок, но и в целом всех логистических процессов на транспорте. Современные внедряемые цифровые платформы базируются на сквозном контроле бизнес-процессов, «Интернете вещей» (IoT), аналитике больших данных «Big Data», облачных вычислениях, а также на мобильных технологиях и социальных медиа. Современные требования развития цифровых платформ требуют акцентироваться на их полной интеграции в едином цифровом информационном транспортном пространстве (сети), что позволяет не только участникам деятельности координироваться друг с другом, но и руководству принимать эффективные решения, основанные на оперативных данных.

Для современного эффективного развития цифровых технологий на транспорте, и в частности, цифровой железной дороги, необходим переход на сетевое управление всей транспортной цепью. Требования современной действительности ставят перед ОАО «РЖД»

разработку важных направлений по созданию «умной» железной дороги, что приведет к внедрению интеллектуальных систем управления не только в части управления железнодорожными перевозками и инфраструктурой, но в части взаимодействия с различными видами транспорта и их инфраструктурой. В свою очередь это приведет к реализации основных аспектов цифровой модели бизнеса – бизнес в режиме онлайн, обеспечение своевременной оперативной и актуальной информации для быстрого и оперативного принятия своевременных решений, отвечающих на оперативное изменение обстановки, в области управления движением и инфраструктурой всей транспортной сети [14].

В настоящее время на железнодорожном транспорте применяются автоматизированные автономные системы для контроля за состоянием оборудования и инфраструктуры. Это позволяет снизить риски аварий, минимизировать дополнительные трудозатраты, проводить эффективный контроль за работой оборудования и инфраструктуры в целом вне зависимости от времени суток. На автоматизированных железнодорожных станциях также есть возможность применять оборудование для тестирования полотна и путевой инфраструктуры [7].

В соответствии со своевременными реалиями в ОАО «РЖД» развивают мобильные сервисы для пассажиров, оснащают подвижные составы оборудованием. Одним из таких специализированных сервисов являются специальные проездные порталы, которые предоставляют доступ к информационной среде транспортной сети, что дает возможность осуществить заказ различных транспортных услуг в пути следования или по прибытии в пункт назначения. Для поддержания в работоспособном состоянии транспортной инфраструктуры внедряются и применяются бортовые диагностические комплексы, которые дают возможность вести диагностику верхнего строения пути и контактной сети в режиме реального времени прямо с электропоезда, а полученные результаты оперативно анализируются и дается заключение с необходимыми рекомендациями. Полученные данные передаются в аналитические центры дорог и позволяют оперативно принимать решения о проведении ремонта и обслуживания железнодорожной инфраструктуры по ее реальному состоянию, что приводит к снижению затрат не только на содержание, но и на ремонт. При этом сохраняются качество и надежность инфраструктуры.

Для создания «умной» железной дороги необходимо внедрять цифровые интеллектуальные системы управления железнодорожным транспортом и обеспечить соответствующей инфраструктурой с возможностью интеграции в единую цифровую среду, что позволит собирать и анализировать информацию о текущем состоянии и местоположении подвижного состава [14].

В ОАО «РЖД» осуществляется внедрение самой крупной корпоративной информационной системы (ERP) в России и Европе на базе SAP R/3. ERP (Enterprise Resource Planning) – это система планирования ресурсов, которая относится к классу автоматизированных систем управления предприятиями, позволяющая интегрировать функции управления финансовой и хозяйственной деятельностью всех подразделений компании. Система SAP R/3 реализована в трехуровневой архитектуре «клиент – сервер», т. е. клиент решает прикладные задачи, а сервер приложений реализует бизнес-логику, сервер баз данных обрабатывает запросы и данные. Основное преимущество данной системы – возможность постепенного наращивания вычислительной мощности по мере увеличения числа пользователей системы и объема обрабатываемой информации. Система гарантирует эффективное использование вложенных в разработку финансовых средств и высокий уровень защищенности, обеспечение целостности данных и защиту от несанкционированного доступа [14].

Исходя из перечисленного выше можно выделить четыре основных направления в развитии цифровых технологий в транспортной отрасли: цифровизация мультимодальных транспортных перевозок – в данном контексте ОАО «РЖД» выполняет функции оператора, который отвечает не только за взаимодействие различных видов транспорта, но объединяет различные услуги и сервисы, связанные с мультимодальными транспортными перевозками; кли-

ентоориентированность – внедрение цифровых сервисов для работы с пассажирами и клиентами, внедрение технологий «от двери до двери» и «точно в срок» с возможностью мониторинга движения груза по всей транспортной сети; появление новых бизнес-моделей и участие в бизнес-сетях; работа с большими данными – проекты, завязанные на сборе, обработке, анализе данных и принятии на их основе оперативных решений. Все перечисленное позволяет оптимизировать не только пассажиропоток, но и грузопоток, внедрять на сети дорог беспилотные «умные» локомотивы, снижать временные затраты и оптимизировать финансовые потоки.

Стоит отметить, что частью реализации цифровизации транспортной отрасли является внедрение блокчейн-технологии, так как она не только обеспечивает качественную перевозку грузов и пассажиров, но и повышает эффективность и стабильность функционирования высокоскоростных магистралей [15, 16].

Блокчейн-технология – это технология централизованного хранения данных [17], позволяющая обмениваться информацией между субъектами логистической и транспортной деятельности без привлечения посредников [15, 16].

Блокчейн-технология дает доступ к информации о пассажирах и грузах, об их состоянии, способе и маршруте их транспортировки, о происхождении и свойствах грузов. Данная технология позволяет отслеживать транзакции, документацию и информацию, которая является проверенной и не будет изменена без согласия всех участников, имеющих к ней одинаковый доступ.

Внедрение блокчейн-технологии приводит к снижению затрат (и транзакций), увеличению надежности и ликвидации ошибок в процессах, возникающих в транспортной цепи поставок [18]. Применение блокчейн-технологии находит отражение на железнодорожном транспорте (рисунок 2) в форме «умных билетов», предполагающих дифференцированную плату за проезд.



Рисунок 2 – Применение блокчейн-технологии на железнодорожном транспорте

При помощи блокчейн-технологии происходит формирование графика движения поездов на основе информации о месторасположении подвижного состава и о его состоянии. При налаживании организации движения грузопассажирских высокоскоростных поездов эффективным является использование блокчейн-технологии за счет обеспечения высокого уровня безопасности хранения данных, ясности и понятности их обмена, а также их быстрого поиска [16].

Несмотря на активную цифровизацию транспортной отрасли, на экономическом пространстве России существуют проблемы внедрения цифровизации. Данные проблемы обусловлены нечеткой проработкой целей комплексного внедрения цифровизации транспортной отрасли в целом, включая транспортную инфраструктуру и сами процессы на предприятиях, взаимодействующих с транспортной отраслью. В частности, эти проблемы приводят к низкой конкурентоспособности бизнеса, порождающей ограничение свободного частного инвестирования, в том числе в направлении цифровых технологий. Все это приводит к недостаточной

доступности цифровых услуг как внутри транспортной отрасли, так и у населения [5, 18, 19].

Поэтому необходимо выделить цели внедрения цифровых технологий:

- а) создание цельной программы развития транспорта, состоящей из набора структурных вариантов ее развития посредством использования цифровых технологий и выбора одного из них;
- б) ориентация решений правительства не только на транспортных монополистов, но и на транспортные предприятия средних и малых форм бизнеса;
- в) предоставление возможности реализации исследовательской деятельности и разработок, основанных на зарубежном опыте [5, 19].

Реализация данных целей может быть достигнута с помощью единой цифровой платформы транспортного комплекса (ЦПТК), которая будет создана путем объединения множества локальных информационных цифровых платформ (ИЦП).

ЦПТК должна стать доверительной средой, объединяющей данные с локальных ИЦП, она должна взаимодействовать с государственными информационными системами. Данные платформы должны объединять все элементы цепи создания стоимости товаров, каналы дистрибуции и потребителей и даже отдельные отрасли экономики. ИЦП должны сдерживать доступ «нежелательных» субъектов на рынок [19].

В настоящее время в транспортной отрасли и в области логистики применяются локальные ИЦП, которые используются для планирования перевозочного процесса, интеграции различных видов транспорта при перевозке грузов и переработке их на складах. Это позволяет уменьшить время обработки и доставки грузов, снизить финансовые издержки транспортных компаний и их клиентов.

Создание комплексных информационных цифровых платформ позволит осуществить следующее:

- а) повысить качество, безопасность перевозок;
- б) расширить число клиентов, так как перевозки станут более комфортными и доступными;
- в) оптимизировать временные и финансовые затраты;
- г) максимально использовать инфраструктуру транспортной отрасли;
- д) максимально эффективно использовать географическое положение;
- е) создавать перспективные направления и технологии для развития транспортной отрасли [20].

В настоящее время начата реализация цифровых технологий, предназначенных эффективно взаимодействовать на транспорте с различными клиентами. В ОАО «РЖД» для нужд железнодорожного транспорта была разработана и внедрена цифровая электронная торговая площадка «Грузовые перевозки» (ЭТП ГП). Владелец и оператор площадки является ООО «Цифровая логистика», дочернее предприятие – ОАО «РЖД».

ЭТП ГП заявлена как самостоятельный цифровой сервис, пользователями которого являются грузоотправители и предприятия, обеспечивающие перевозочный процесс и сопутствующие услуги. Взаимодействие между пользователями сети осуществляется с использованием только цифровых технологий (т. е. в цифровом формате), что в свою очередь приводит к сокращению временных затрат, максимальной прозрачности, скорости реагирования на любые дополнительные запросы и к оперативности работы по обработке всей информации. В соответствии с применяемыми цифровыми технологиями грузоотправитель и грузополучатель может отслеживать статус перевозки в режиме онлайн. Дальнейшее развитие цифрового сервиса предусматривает не только увеличение ассортимента оказываемых услуг, но и распространение этой площадки и на другие виды транспорта. В качестве элемента клиентоориентированного подхода на данной цифровой площадке предусматривается введение таких услуг, как погрузочно-разгрузочные работы, терминальные работы, услуги охраны.

Представленные в статье зарубежные страны при цифровизации транспортной отрасли имели ряд преимуществ: развитая инфраструктура; относительная безопасность; ранняя инновационная политика, что позволило получить ранние результаты, а, как следствие, по данным

рейтинга Huawei's Global Connectivity Index (GCI), измеряющего прогресс 50 крупных государств на пути цифровой трансформации благодаря информационно-коммуникационным технологиям (ИКТ), Россия находится на 43-м месте из 50 [1]. В то же время в рейтинге Всемирного экономического форума Россия занимает 38-е место в мире по развитости цифровой экономики.

Рассматривая в сравнении развитие цифровой экономики в Европе, США и в России (см. таблицу 1), можно сделать следующие выводы: в среднем по Европе доля цифровой экономики превышает 7 % ВВП, в США – 10,9 % и ежегодно эти показатели растут. В России же вклад цифровой экономики в экономику оценивается в 3,9 % ВВП – рост составил 11 % по сравнению с показателями прошлого года, говорится в ежегодном исследовании Российской ассоциации электронных коммуникаций (РАЭК) «Экономика Рунета». Связанные с цифровой экономикой рынки увеличились с 2010 г. в 5,5 раза с 5 до 27,7 трлн руб. К 2025 г. прогнозный объем цифровой экономики России утроится по отношению к 2015 г. и достигнет 9,6 трлн руб. (или 8 – 10 %), это становится возможным за счет внедрения цифровых технологий не только традиционных отраслей и развития самостоятельной высокотехнологичной индустрии, но и за счет цифровизации транспортной отрасли [12].

Как показывает мировой опыт, на автомобильном транспорте происходит внедрение интеллектуальной транспортной системы (ИТС), созданной для управления дорожным движением. ИТС своевременно предоставляет информацию участникам движения о перемещении транспорта на улично-дорожной сети города, благодаря чему увеличиваются средние скорости движения; позволяет повысить пропускную способность транспортной системы и перераспределить транспортные потоки с магистралей с более высокой интенсивностью движения на магистрали с более низкой; снижает загрязнение окружающей среды, вызванное автомобильным транспортом [21]. Если рассматривать Россию, то наглядный пример внедрения ИТС можно наблюдать в Москве, которое происходит с 2013 г. Внедряется также беспилотное такси в Москве, в Иннополисе, в Татарстане и на территории образовательного центра «Сириус» в Сочи. Полностью автономные беспилотники будут работать на территории Иннополиса и центра «Сколково» в Москве, а также на Московской железной дороге (https://www.rbc.ru/technology_and_media).

Итак, можно с полной уверенностью говорить о том, что внедрение цифровых технологий и цифровых площадок в транспортной отрасли является неотъемлемой частью развития цифрового общества и в дальнейшем цифровизация охватит все элементы и процессы в транспортной отрасли.

В то же время на железнодорожном транспорте процесс внедрения цифровых технологий и внедрение digital-форматов в управленческую и производственную деятельность компании является приоритетным элементом программы инновационного цифрового развития транспортной отрасли для перевозчика на пути к созданию «умной цифровой» железной дороги. Современные цифровые системы формируются на принципах взаимодействия больших массивов информации и киберфизических систем, что позволит не только снизить эксплуатационные и производственные расходы, но и повысит эффективность и безопасность всей производственной и логистической цепи при транспортировке.

Современный глобальный рынок транспортировки грузов в цепи поставок подразумевает эффективность и устойчивость транспортно-технологических процессов и систем ИТ-сервиса. Для этого внедряются цифровые платформы, функционирующие в цепях поставок на принципах саморегулирования транспортно-логистических звеньев (элементов) с едиными ресурсами, обеспечивающими высокорезультативное взаимодействие на базе ИТ-технологий и единых стандартов управления процессами, охватывающие все транспортные отрасли и их инфраструктуру.

Сейчас можно выделить пять ключевых направлений процесса цифровизации транспортной сферы:

а) цифровизация транспортной отрасли и инфраструктуры;

- б) цифровизация логистических цепочек на транспорте;
- в) автоматизация и роботизация производственных процессов;
- г) автоматизация управленческих процессов;
- д) внедрение систем беспилотного транспорта.

Основные цели внедрения цифровых технологий:

а) создание цельной программы развития транспорта;

б) ориентация решений правительства на транспортные предприятия средних и малых форм бизнеса;

в) предоставление возможности реализации исследовательской деятельности и разработок, основанных на зарубежном опыте.

В реализации этих целей должна помочь единая цифровая платформа транспортного комплекса.

Согласно данным исследованиям видно, что в условиях формирования цифровой экономики и цифровизации транспортной отрасли необходимо создание комплексной транспортной цифровой бизнес-логистической экосистемы, представляющей собой единое цифровое пространство, объединенное общим процессом создания виртуализации процессов в транспортной отрасли (с учетом взаимодействия различных видов транспорта), функционирующей на основе единых стандартов управления на транспорте и на предприятиях и охватывающей множество участников транспортной деятельности в глобальном экономическом пространстве (рисунок 3).

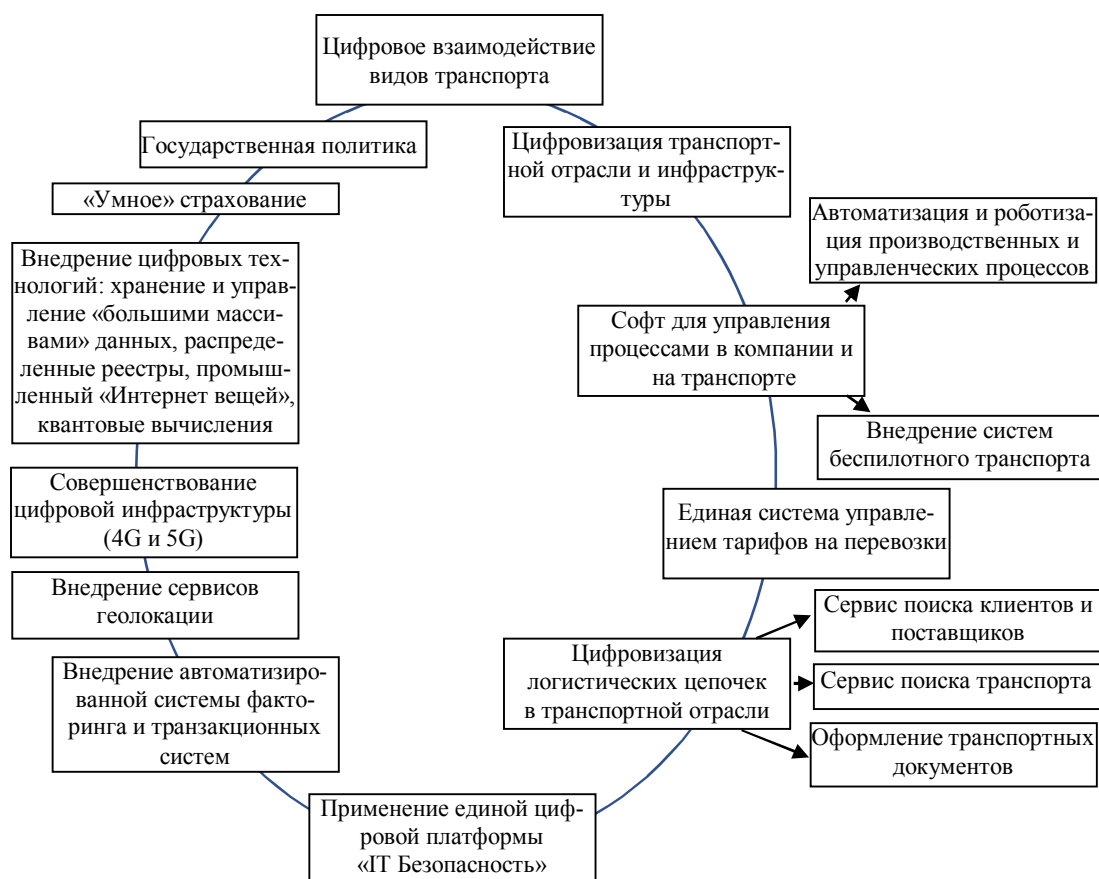


Рисунок 3 – Единая транспортная цифровая бизнес-логистическая экосистема

Предложенная транспортная бизнес-логистическая экосистема рассматривается как совокупность материальных и нематериальных активов транспортно-логистической отрасли во взаимодействии различных видов транспорта, с множеством поставщиков ресурсов и потребителей услуг, а также процессов на самом предприятии посредством открытых информаци-

онных интерфейсов, технологических систем, политики государства и финансовых инструментов в ответ на развитие цифровой экономики в условиях глобализации. Применение данной транспортной цифровой бизнес-логистической экосистемы приведет к оптимизации бизнес-процессов и логистических процессов компаний, а именно: к сокращению временных затрат на рутинные операции, росту скорости принятия решений, уменьшению потребности в ручном труде и другим положительным результатам внедрения. Однако, делая выводы, нельзя не отметить, что в связи с ростом интенсивности мировой глобализации транспортной отрасли цифровизация происходит при активном развитии и использовании таких технологий и интернет-платформ, как технологии искусственного интеллекта; «физический интернет» – на основе технологии «Интернета вещей»; IT-стандарты, анализ данных, облачные технологии, блокчейн, роботизация и автоматизация, автономные транспортные средства; повышение эффективности логистического обслуживания за счет применения технологии упреждающего управления, непосредственно связанного с разработкой и внедрением трансформационных бизнес-моделей, ориентированных на методы инжиниринга и проактивного управления; широкое комплексное внедрение процессного подхода в компаниях и на транспорте, позволяющего существенно повысить качество и скорость разработки транспортных решений и т. д. Перечисленные тренды определяют сегодня основные направления научных исследований и практических разработок в области цифровизации транспорта, поэтому особенно актуальными остаются вопросы оперативного изменения транспортной цифровой бизнес-логистической экосистемы под текущие тренды в транспортной отрасли.

Список литературы

1. Место России в глобальной цифровой трансформации. – Текст : электронный. – URL: <https://habrahabr.ru/company/huawei/blog/303358> (дата обращения: 10.12.2021).
2. Смена парадигмы: будущее транспортно-логистического сектора // Серия публикаций PwC о перспективах развития отраслей в 2020 году. – Текст : электронный. – URL: <https://www.pwc.ru/pwc-logistics-transformation-rus.pdf> (дата обращения: 10.12.2021).
3. Доклад НИУ ВШЭ при участии Всемирного банка : материалы XXI апрельской международной конференции по проблемам развития экономики и общества. – Москва : НИУ ВШЭ, 2020. – С. 149. – Текст : непосредственный.
4. Василенок, В. Л. Основные тренды цифровой логистики / В. Л. Василенок, А. И. Круглова [и др.]. – Текст : непосредственный // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Экономика и экологический менеджмент. – 2020. – № 1. – С. 69–78.
5. Россия и страны мира : стат. сб. – Москва : Росстат, 2020. – 385 с. – Текст : непосредственный.
6. Карташев, А. В. Управление жизненным циклом сложной наукоемкой продукции в интегрированных сетях поставок : монография / А. В. Карташев, А. Г. Некрасов, К. И. Атаев. – Москва : PrintUp, 2016. – 324 с. – Текст : непосредственный.
7. Машкина, Н. А. Влияние цифровой экономики на развитие транспортной отрасли в мире / Н. А. Машкина, А. Е. Велиев. – Текст : непосредственный // ЦИТИСЭ. – 2020. – № 1. – С. 290–299.
8. First Report of the Digital Economy Board of Advisors. (2020). *Washington DC, Department of Commerce*, December 2020, p. 1.
9. Pokusaev O., Klimov A., Kupriyanovsky V., Morhat P., Namiot D. International Europe's digital railway – from ERTMS to artificial intelligence, *Journal of Open Information Technologies*, 2019, vol. 7, no.7, pp. 90 – 119.
10. Howe-Teo R. Singapore's Smart Mobility 2030: Big Data and Car-Lite Society. Available at: https://www.esci-ksp.org/wp/wp-content/uploads/2012/06/J15Nov_p04Chin_Smart-Mobility2030.pdf (accessed 10 December 2021).
11. Titova E. V., Subkhonberdiev A. Sh., Malitskaya V. B., Safonova N. M. Strategy for the sustainable development of the timber industry as subsystems of the regional economy. *Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020*, Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference (IBIMA), 2019, pp. 9119 – 9125.

12. Цифровая экономика даст России шанс на рывок в будущее. – Текст : электронный. – URL: <http://tass.ru/ekonomika/4390974> (дата обращения: 10.12.2021).
13. Ларин, О. Н. Вопросы трансформации рынка транспортно-логистических услуг в условиях цифровизации экономики / О. Н. Ларин, В. П. Куприяновский. – Текст : непосредственный // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2018. – № 5. – С. 31–35.
14. Гутковская, А. И. Развитие цифровой экономики на железнодорожном транспорте / А. И. Гутковская, Е. А. Гутковская. – Текст : электронный. – URL: <http://journal.mrsu.ru/economics> (дата обращения: 10.12.2021).
15. Неманова, Н. А. Комплексный подход к цифровой трансформации интермодальных контейнерных перевозок / Н. А. Неманова. – Текст : непосредственный // *Бюллетень результатов научных исследований*. – 2019. – № 2. – С. 109–115.
16. Алексеев, С. А. Перспективы внедрения и использования инновационных и интеллектуальных технологий в современных транспортных системах / С. А. Алексеев. – Текст : непосредственный // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2018. – № 6. – С. 38–43.
17. Талапина, Э. В. Применение блокчейна в государственном управлении: перспективы правового регулирования / Э. В. Талапина. – Текст : непосредственный // *Вопросы государственного и муниципального управления*. – 2020. – № 3. – С. 93–111.
18. Аналитический доклад «О принципах и подходах цифровой логистики в сфере транспортных услуг государств – членов Евразийского экономического союза» // eurasiancommission.org : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/energetikaiinf/transport/SiteAssets/ДТИ%20главная/АД%20О%20принципах%20и%20подходах%20цифровой%20логистики%20в%20сфере%20транспортных%20услуг%20государств%20членов%20ЕАЭС.pdf> (дата обращения: 10.12.2021).
19. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты / Г. И. Абдрахманова, К. Б. Быховский, Н. Н. Веселитская [и др.]. – Текст : непосредственный // *Материалы междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества*. – Москва : НИУ ВШЭ, 2021. – С. 239.
20. Цифровизацию транспорта тормозит отсутствие стандартов и экономической целесообразности. – Текст : электронный. – URL: https://www.cnews.ru/reviews/it_v_transportnoj_otrasli_2019/articles/tsifrovizatsiyu_transporta_tormozit_otsutstvie_standartov_i_ekonomicheskoy (дата обращения: 10.12.2021).
21. Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : сборник материалов междунар. науч.-практ. конф. – Омск : Сибирский гос. автомобильно-дорожный ун-т, 2019. – 690 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Mesto Rossii v global'noi tsifrovoi transformatsii* (Russia's Place in the global Digital Transformation), Available at: <https://habrahabr.ru/company/huawei/blog/303358> (accessed 10 December 2021).
2. *Smena paradigmy: budushchee transportno-logisticheskogo sektora* (Paradigm shift: the future of the transport and logistics sector), Available at: <https://www.pwc.ru/pwc-logistics-transformation-rus.pdf> (accessed 10 December 2021).
3. *Doklad NIU VShE pri uchastii Vsemirnogo banka* (HSE report with the participation of the World Bank). – Moscow, 2020, p. 149.
4. Vasilenok V. L., Kruglova A. I., Aleksashkina E. I., Negreeva V. V., Plastunova S. A. The main trends of digital logistics [Osnovnye trendy tsifrovoi logistiki]. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya Ekonomika i ekologicheskii menedzhment – Scientific journal of NIU ITMO. Economics and Environmental Management Series*, 2020, no. 1, pp. 69 – 78.
5. *Rossii i strany mira: statisticheskii sbornik* (Russia and the countries of the world: a statistical collection). Moscow: Rosstat Publ., 2020, 385 p.
6. Kartashev A. V., Nekrasov A. G., Ataev K. I. *Upravlenie zhiznennym tsiklom slozhnoi naukoemkoi produktsii v integrirovannykh setiakh postavok: monografiia* (Life cycle management of complex high-tech products in integrated supply chains: monograph). Moscow: PrintUp Publ., 2016, 324 p.

7. Mashkina N. A., Veliev A. E. The impact of the digital economy on the development of the transport industry in the world [Vliianie tsifrovoy ekonomiki na razvitie transportnoi otrasli v mire]. *TsITISE – CITASE*, 2020, no. 1, pp. 290 – 299.
8. First Report of the Digital Economy Board of Advisors. (2020). *Washington DC, Department of Commerce*, December 2020, p. 1.
9. Pokusaev O., Klimov A., Kupriyanovsky V., Morhat P., Namiot D. International Europe's digital railway – from ERTMS to artificial intelligence, *Journal of Open Information Technologies*, 2019, vol. 7, no.7, pp. 90 – 119.
10. Howe-Teo R. Singapore's Smart Mobility 2030: Big Data and Car-Lite Society. Available at: https://www.esi-ksp.org/wp/wp-content/uploads/2012/06/J15Nov_p04Chin_Smart-Mobility2030.pdf (accessed 10 December 2021).
11. Titova E. V., Subkhonberdiev A. Sh., Malitskaya V. B., Safonova N. M. Strategy for the sustainable development of the timber industry as subsystems of the regional economy. *Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020*, Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference (IBIMA), 2019, pp. 9119 – 9125.
12. *Tsifrovaia ekonomika dast Rossii shans na ryvok v budushchee* (The digital economy will give Russia a chance to leap into the future), Available at: <http://tass.ru/ekonomika/4390974> (accessed 10 December 2021).
13. Larin O. N., Kupriyanovskii V. P. Issues of transformation of the transport and logistics services market in the context of digitalization of the economy [Voprosy transformatsii rynka transportno-logisticheskikh uslug v usloviakh tsifrovizatsii ekonomiki]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2018, no. 5, pp. 31 – 35.
14. Gutkovskaya A. I., Gutkovskaya E. A. *Razvitie tsifrovoy ekonomiki na zheleznodorozhnom transporte* (Development of the digital economy in railway transport), Available at: <http://journal.mrsu.ru/economics> (accessed 10 December 2021).
15. Nemanova N. A. An integrated approach to the digital transformation of intermodal container transportation [Kompleksnyi podkhod k tsifrovoy transformatsii intermodal'nykh konteynernykh perevozok]. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research result*, 2019, no. 2, pp. 109 – 115.
16. Alekseev S. A. Prospects for the introduction and use of innovative and intelligent technologies in modern transport systems [Perspektivy vnedreniya i ispol'zovaniya innovatsionnykh i intellektual'nykh tekhnologii v sovremennykh transportnykh sistemakh]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2018, no. 6, pp. 38 – 43.
17. Talapina E. V. The use of blockchain in public administration: prospects for legal regulation [Primenenie blokcheina v gosudarstvennom upravlenii: perspektivy pravovogo regulirovaniya]. *Voprosy gosudarstvennogo i munitsipal'nogo upravleniya – Public administration issues*, 2020, no. 3, pp. 93 – 111.
18. *Analitycheskii doklad «O printsipakh i podkhodakh tsifrovoy logistiki v sfere transportnykh uslug gosudarstv – chlenov Evraziyskogo ekonomicheskogo soiuza»* (Analytical report «On the principles and approaches of digital logistics in the field of transport services of the member States of the Eurasian Economic Union»), Available at: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/energetikai-infr/transport/SiteAssets/ДТИ%20главная/АД%20О%20принципах%20и%20подходах%20цифровой%20логистики%20в%20сфере%20транспортных%20услуг%20государств%20–%20членов%20ЕАЭС.pdf> (accessed 10 December 2021).
19. Abdrakhmanova G. I., Bykhovskii K. B., Veselitskaya N. N. and others. Digital transformation of industries: starting conditions and priorities [Tsifrovaia transformatsiya otraslei: startovye usloviya i priority]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii po problemam razvitiia ekonomiki i obshchestva* (Materials of the International scientific conference on the problems of economic and social development). – Moscow, 2021, p. 239.
20. *Tsifrovizatsiia transporta tormozit otsutstvie standartov i ekonomicheskoi tselesoobraznosti* (Digitalization of transport is hindered by the lack of standards and economic feasibility), Available at: https://www.cnews.ru/reviews/it_v_transportnoj_otrasli_2019/articles/tsifrovizatsiyu_transporta_tormozit_otсутstvie_standartov_i_ekonomicheskoy (accessed 10 December 2021).
21. *Arkhitekturno-stroitel'nyi i dorozhno-transportnyi kompleksy: problemy, perspektivy, innovatsii: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Architectural, construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations: collection of materials of the international scientific and practical conference). – Omsk, 2019, 690 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ларин Андрей Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: larinan75@mail.ru

Ларина Ирина Вячеславовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: larinan75@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ларин, А. Н. Цифровизация автотранспортной и железнодорожной отраслей как ключевой элемент цифровой экономики / А. Н. Ларин, И. В. Ларина. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 109 – 129.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Larin Andrey Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport economics, logistics and quality management», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: larinan75@mail.ru

Larina Irina Vyacheslavovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Economics, associate professor of the department «Transport economics, logistics and quality management», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: larinan75@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Larin A. N., Larina I. V. Digitalization of the road transport and railway industries as a key element of the digital economy. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 4 (48), pp. 109 – 129 (In Russian).

УДК 656.225.04

Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СРОКА ДОСТАВКИ ГРУЗА ПОВАГОННОЙ ОТПРАВКИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Аннотация. Усовершенствован метод определения затрат технологического времени переработки поездов в пути следования с учетом продолжительности всех операций, выполняемых вагонами на станциях для эффективной организации технологии грузовых перевозок на железнодорожном транспорте. Разработана модель расчета сроков доставки грузов для правильного определения затрат времени груженых вагонов в пути следования. Разработан метод определения времени, затрачиваемого на технологические операции на станциях, и сроков доставки грузов. Разработанный метод позволяет определять и заблаговременно планировать объем работ, которые будут выполняться на станциях. Приведены показатели, влияющие на продолжительность времени срока доставки груза. Рекомендована усовершенствованная формула определения сроков доставки грузов на железнодорожном транспорте. В статье предложена технология расчета нормы суточного пробега повагонных отправок в зависимости от выполняемых технологических операций с вагонами на станциях и расстояния перевозки. Достоверность результатов исследования подтверждается использованием современных методов расчета. Теоретические исследования проведены на основе законов математической статистики. Научная значимость полученных результатов характеризуется усовершенствованием методов определения затрат технологического времени переработки поездов и сроков доставки грузов на основе систематизации условно-постоянных и случайных факторов, оказывающих влияние на перевозочный процесс на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: доставка грузов, груз, местный вагон, техническая станция, подвижной состав, расформирование и формирование поездов.

Jamshid R. Kobulov, Jamshid S. Barotov

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

IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE DELIVERY TIME OF WAGONLOAD CARGO BY RAIL

Abstract. The method of determining the costs of technological time of processing trains en route has been improved, taking into account the duration of all operations performed by wagons at stations for the effective organization of freight transportation technology on railway transport. A model for calculating the delivery time of goods has been developed to correctly determine the time spent by loaded wagons en route. A method has been developed for determining the time spent on technological operations at stations and the delivery time of goods. The developed method allows you to determine and plan in advance the amount of work that will be performed at the stations. The indicators affecting the duration of the time of delivery of the cargo are given. An improved formula for determining the delivery time of goods by rail is recommended. The article proposes a technology for calculating the daily mileage rate of wagon shipments, depending on the technological operations performed with wagons at stations and the distance of transportation. The reliability of the research results is confirmed by the use of modern calculation methods. Theoretical studies were conducted on the basis of the laws of mathematical statistics. The scientific significance of the results obtained is characterized by the improvement of methods for determining the costs of the technological time of processing trains and the timing of cargo delivery based on the systematization of conditionally constant and random factors affecting the transportation process on railway transport.

Keywords: delivery of goods, cargo, local wagon, technical station, rolling stock, disbandment and formation of trains.

В настоящее время норма скорости доставки грузов на будущий период определяется в коллективном согласовании и составляет 330 км/сут. Однако по итогам 2020 г. в акционерном обществе «Узбекистон темир йуллари» скорость доставки грузов составила 175 км/сут.

Например, в 2020 г. общая сумма претензий, поступивших за несвоевременную доставку груза, составила 11,375 млн руб. Из этого сумма, взысканная в пользу владельца груза через суд, составляет 4 млн руб. Доставка грузов до места назначения в указанный срок является одной из основных задач по выполнению договора перевозки железнодорожным транспортом, невыполнение которой окажет серьезное влияние на качество транспортных услуг. Проведенные исследования показали необходимость совершенствования технологии организации грузоперевозок с учетом сроков доставки грузов.

Анализ технологического процесса доставки грузов позволил выявить следующие причины невыполнения сроков доставки грузов:

- простой вагонов до начала их переработки;
- ожидание накопления состава;
- ожидание отправления готовых поездов со станции;
- нехватка маневровых локомотивов для подачи вагонов на грузовой двор и подъездные пути для выгрузки грузовых вагонов;
- нехватка локомотивов, необходимых на станции при движении поездов.

Исходя из этих причин необходимо изучить факторы, влияющие на технологический процесс, и устранить нахождение вагона на станции сверх установленной нормы.

Математическое описание решения задачи. Отдельно приведем затрачиваемое время нахождения местных вагонов, транзитных без переработки и с переработкой для технических процессов на технических станциях [1, 3, 4].

Время, затрачиваемое на вагоны с переработкой. Общее время, затрачиваемое на переработку вагонов ($t_{\text{с/пер}}$), и время бесполезного ожидания ($t_{\text{с/пер}}^{\text{ож}}$) можно определить по выражению:

$$t_{\text{с/пер}} = (t_{\text{под. мар}} + t_{\text{п.п}} + t_{\text{зак/ог}}^{\text{п.п}} + t_{\text{отп/приц}} + t_{\text{об}}^{\text{п.п}} + t_{\text{н. в}} + t_{\text{сор}} + t_{\text{осаж}} + t_{\text{нак}} + t_{\text{оф. пер}} + t_{\text{об}}^{\text{оп}} + t_{\text{приц}} + t_{\text{пр. тор}} + t_{\text{отп}}) / 60, \quad (1)$$

где $t_{\text{под.мар}}$ – подготовка маршрута, мин; $t_{\text{пп}}$ – прием поезда, мин; $t_{\text{зак/ог}}^{\text{пп}}$ – закрепление и ограждение состава в парке приема, мин; $t_{\text{отц/приц}}$ – отцепка и прицепка локомотива от состава, мин; $t_{\text{об}}^{\text{пп}}$, $t_{\text{об}}^{\text{оп}}$ – технический и коммерческий осмотр вагонов в приемоотправочном парке, мин; $t_{\text{н.в}}$ – время на отцеп нерабочих вагонов из состава, мин; $t_{\text{сор}}$ – сортировка принятого состава, мин; $t_{\text{осаж}}$ – осаживание вагонов, мин; $t_{\text{нак}}$ – накопление вагонов, мин; $t_{\text{оф.пер}}$ – перестановка состава в парк отправления после окончания формирования, мин; $t_{\text{пр.тор}}$ – проверка тормозных устройств, мин; $t_{\text{отп}}$ – отправление поезда, мин.;

$$t_{\text{с/пер}}^{\text{ож}} = (t_{\text{под.мар}}^{\text{п.п.ож}} + t_{\text{пп}}^{\text{ож}} + t_{\text{об}}^{\text{п.п.ож}} + t_{\text{н.в}}^{\text{ож}} + t_{\text{сор}}^{\text{ож}} + t_{\text{нак}}^{\text{ож}} + t_{\text{оф.пер}}^{\text{ож}} + t_{\text{об}}^{\text{оп.ож}} + t_{\text{лок}}^{\text{ож}} + t_{\text{отп}}^{\text{ож}}) / 60, \quad (2)$$

где $t_{\text{под.мар}}^{\text{п.п.ож}}$ – ожидание подготовки маршрута, мин; $t_{\text{пп}}^{\text{ож}}$ – ожидание прибытия поезда, мин; $t_{\text{об}}^{\text{п.п.ож}}$, $t_{\text{об}}^{\text{оп.ож}}$ – ожидание технического и коммерческого осмотра в приемоотправочном парке, мин; $t_{\text{н.в}}^{\text{ож}}$ – ожидание на отцеп нерабочих вагонов, мин; $t_{\text{сор}}^{\text{ож}}$ – ожидание сортировки вагонов прибывшего состава в сортировочном парке, мин; $t_{\text{нак}}^{\text{ож}}$ – ожидание накопления состава в парке сортировки, мин; $t_{\text{оф.пер}}^{\text{ож}}$ – ожидание перестановки состава в парк отправления, мин; $t_{\text{лок}}^{\text{ож}}$ – ожидание локомотива для прицепа к составу, мин; $t_{\text{отп}}^{\text{ож}}$ – ожидание отправления поезда, мин.

Приведем общее время, затрачиваемое для переработки вагонов на технических станциях [8 – 10]:

$$\sum t_{\text{с/пер}} = t_{\text{с/пер}} + t_{\text{с/пер}}^{\text{ож}}. \quad (3)$$

Общее время, затрачиваемое для переработки вагонов на технических станциях, определяется по формуле (3). Если вагон перерабатывается на нескольких технических станциях, общее суммарное время будет таким: $\sum_{i=1}^n (\sum t_{\text{с/пер}})_i$.

Время, затрачиваемое на вагоны без переработки. Время, затрачиваемое на технические процессы для вагонов без переработки,

$$\sum t_{\text{без/пер}} = (t_{\text{под.мар}} + t_{\text{пп}} + t_{\text{зак/огр}} + t_{\text{отц}} + t_{\text{об}} + t_{\text{н.в}} + t_{\text{лок}}^{\text{ож}} + t_{\text{приц}} + t_{\text{пр.тор}} + t_{\text{под.мар}}^{\text{тр}} + t_{\text{отп}}^{\text{ож}} + t_{\text{отп}}) / 60, \quad (4)$$

где $t_{\text{под.мар}}$ – подготовка маршрута в транзитный парк, мин; $t_{\text{пп}}$ – прием поезда, мин; $t_{\text{зак/огр}}$ – закрепление и ограждение состава в транзитном парке, мин; $t_{\text{отц}}$ – отцепка вагонов от локомотива, мин; $t_{\text{об}}^{\text{тр}}$ – технический и коммерческий осмотр вагонов в транзитном парке, мин; $t_{\text{н.в}}^{\text{к}}$ – время на отцеп нерабочих вагонов из состава, мин; $t_{\text{лок}}^{\text{ож}}$ – ожидание локомотива, мин; $t_{\text{приц}}$ – прицепка состава к локомотиву, мин; $t_{\text{пр.тор}}$ – проверка тормозных устройств состава, мин; $t_{\text{отп}}^{\text{ож}}$ – ожидание отправления поезда из транзитного парка, мин [7].

Общее время, затрачиваемое на технологические операции для вагонов без переработки на каждой технологической станции, выражается как $\sum_{i=1}^m (\sum_i t_{\text{без/пер}})$.

Ожидание и время, затрачиваемое на выполненные операций с местными вагонами. Общее время, затрачиваемое на технические операции с местными вагонами, можно выразить так:

$$t_{\text{мес}} = (t_{\text{пог/выг}}^{\text{ож}} + t_{\text{пог/выг}} + t_{\text{сор. фр}}^{\text{ож}} + t_{\text{сор. фр}} + t_{\text{под/уб}}^{\text{ож}} + t_{\text{под/уб}} + t_{\text{зак/огр}} + t_{\text{отп/приц}} + t_{\text{тех/ком}}^{\text{ож}} + t_{\text{тех/ком}} + t_{\text{сор}} + t_{\text{осаж}} + t_{\text{нак}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{лок}}^{\text{ож}} + t_{\text{пр. тор}} + t_{\text{отп/пр}}) / 60, \quad (5)$$

где $t_{\text{пог/выг}}^{\text{ож}}$ – ожидание погрузки в вагон и выгрузки грузов, мин; $t_{\text{пог/выг}}$ – погрузка в вагон и выгрузка грузов, мин; $t_{\text{сор. фр}}^{\text{ож}}$ – ожидание сортировки вагонов на грузовом фронте, мин; $t_{\text{сор. фр}}$ – сортировки вагонов на грузовом фронте, мин; $t_{\text{под/уб}}^{\text{ож}}$ – ожидание подачи и уборки вагонов из грузового фронта, мин; $t_{\text{под/уб}}$ – подача и уборка вагонов из грузового фронта, мин; $t_{\text{зак/огр}}$ – закрепление и ограждение вагонов, мин; $t_{\text{отп/приц}}$ – отцепка и прицепка вагонов, мин; $t_{\text{тех/ком}}^{\text{ож}}$ – ожидание технического и коммерческого осмотра вагонов, мин; $t_{\text{тех/ком}}$ – технический и коммерческий осмотр вагонов, мин; $t_{\text{сор}}$ – сортировка вагонов по направлению, мин; $t_{\text{осаж}}$ – осаживание вагонов, мин; $t_{\text{нак}}$ – накопление вагонов до наполнения состава, мин; $t_{\text{пер}}$ – перестановка вагонов в станционный путь, мин; $t_{\text{лок}}^{\text{ож}}$ – ожидание локомотива, мин; $t_{\text{пр. тор}}$ – проверка тормозных устройств состава, мин; $t_{\text{под. мар}}$ – подготовка маршрута для технических операций на станции, мин; $t_{\text{отп/пр}}$ – отправление и прибытие сборного поезда, мин.

Приведем показатели, влияющие на продолжительность времени срока доставки груза, и многофакторную схему показателей выполнения технических норм (рисунок 1) [4 – 8].



Рисунок 1 – Фрагмент, отражающий факторы, оказывающие влияние на доставку грузовых вагонов «точно в срок»

В общем виде показатель времени на операции на технических станциях может быть представлен выражением:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, z), \quad (6)$$

где y – условно результативные показатели;

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, z$ – выполняемые условные показатели.

В качестве элементов определения срока доставки грузов с использованием матрицы принята сумма значений технологических операций, выполняемых с вагонами в пути следования. При этом данная сумма может принимать только соответствующие значения из одной группы. Значение элементов данной группы взаимосвязано с продолжительностью времени технологических операций можно выразить так:

$$A_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $A_{n \times n}$ – граница матрицы (она представлена в виде квадратной диагональной матрицы для того чтобы не принимала значений технологических операций чужого направления); a_{ij} – значение времени, затрачиваемого на выполнение технологических операций на станции.

Если при доставке груза значение суммы до $A_{n \times n}$ выполняет сроки доставки, что может достигать a_{nn} , элементы времени, затраченного на доставку груза, называются суммой, которая удовлетворяет потребности. Для получения суммы срока поставки, удовлетворяющего потребности, необходимо выполнение следующего условия:

$$\text{если } a_{11} = y_1, \text{ то, } y_2 = y_3 = y_4 = y_5 = y_6 = 1. \quad (8)$$

Согласно правилу матрицы при выполнении условия (8)

$$\begin{aligned} & a_{22} = y_7; \\ & a_{33} = \begin{cases} y_2, \text{ то, } y_3 = y_4 = y_5 = y_6 = 1; \\ y_3, \text{ то, } y_2 = y_4 = y_5 = y_6 = 1; \\ y_4, \text{ то, } y_2 = y_3 = y_5 = y_6 = 1; \\ y_5, \text{ то, } y_2 = y_3 = y_4 = y_6 = 1; \\ y_6, \text{ то, } y_2 = y_3 = y_4 = y_5 = 1; \end{cases} \\ & a_{44} = y_7 \end{aligned} \quad (9)$$

и т. д., и в общем виде:

$$a_{nn} = \begin{cases} y_2, \text{ то, } y_3 = y_4 = y_5 = y_6 = 1; \\ y_3, \text{ то, } y_2 = y_4 = y_5 = y_6 = 1; \\ y_4, \text{ то, } y_2 = y_3 = y_5 = y_6 = 1; \\ y_5, \text{ то, } y_2 = y_3 = y_4 = y_6 = 1; \\ y_6, \text{ то, } y_2 = y_3 = y_4 = y_5 = 1. \end{cases} \quad (10)$$

Данное условие удовлетворяет требованию о сроках доставки перевозимого груза, т. е. дает сумму технологических операций, выполняемых вагонами в пути следования. Пересечение нечетных столбцов и строк в матрице принимают значения времени, затрачиваемого на технологические операции на станции. Пересечения четных столбцов и строк в матрице принимают значения времени, затраченного на движение поездов по пути следования. Таким образом, значения технологических операций, выполняемых по пути следования с вагонами, последовательно связываются с элементами матрицы.

Согласно действующим «Правилам перевозок грузов» срок доставки груза определяется по формуле:

$$T_{с.д} = t_{от.пр} + \frac{L_{гр}}{S_{сут}} + \sum t_{доп}, \text{ сут}, \quad (11)$$

где $t_{от.пр}$ – время, затрачиваемое на операции, связанные с отправлением и приемом грузов, сут; $L_{гр}$ – расстояние между станциями, отправляющей и принимающей груз, км; $S_{сут}$ – нормы скорости суточного передвижения груза согласно «Правилам перевозок грузов», км/сут; $t_{доп}$ – время, затрачиваемое на дополнительные операции, сут [1, 9 – 12].

Усовершенствован метод определения сроков доставки грузов на железнодорожном транспорте согласно модели расчета сроков доставки грузов:

$$T'_{с.д} = \left\{ \frac{\sum t_{от} + \sum_{k=1}^K (\sum t_{пер}^{гор})_i + \sum_{m=1}^M (\sum t_{пер}^{вып})_i + \sum_{s=1}^S (\sum t_{б.пер}^{см.лок})_i + \sum_{z=1}^Z (\sum t_{б.пер}^{б.см.лок})_i + \sum t_{пр} + \sum_{l=1}^L (\sum t_{уч})_i}{24} \right\} + \sum t_{доп}. \quad (12)$$

В соответствии с выражением (5) разработаны алгоритм расчета времени доставки груза с учетом отдельных технологий процесса перевозки и программа расчета времени доставки повагонных отправок железнодорожным транспортом. Разработанный программный комплекс служит предотвращению получения ошибочных решений при нормировании сроков доставки и автоматизации процессов определения времени, затраченного на операции, выполняемые с вагонами в пути следования [1, 13, 14].

Для обоснования суточного пробега повагонных отправок в системе грузоперевозок разработана технология нормирования сроков доставки грузов (рисунок 2).

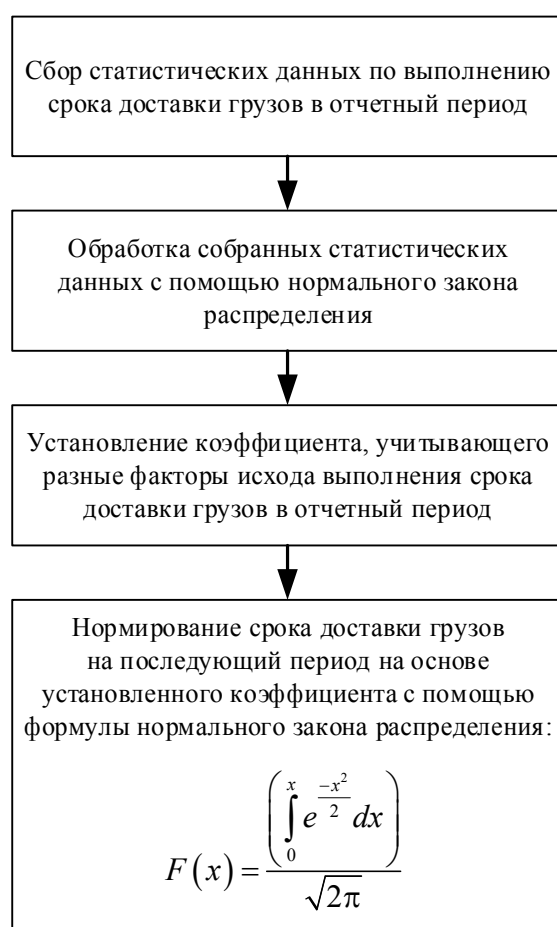


Рисунок 2 – Предлагаемая технология нормирования сроков доставки

В предлагаемой технологии нормы суточного пробега повагонных отправок предложены в зависимости от выполняемых технологических операций с вагонами на станциях и расстояния перевозки (таблица).

Рекомендуемые значения нормы суточного пробега повагонных отправок

Расстояние перевозки, км	Нормы суточного пробега, км/сут
До 200	150
От 201 до 600	200
От 601 до 1200	250
Более 1201	300

Действующие и рекомендуемые значения нормы срока доставки повагонных отправок указаны на рисунке 3.

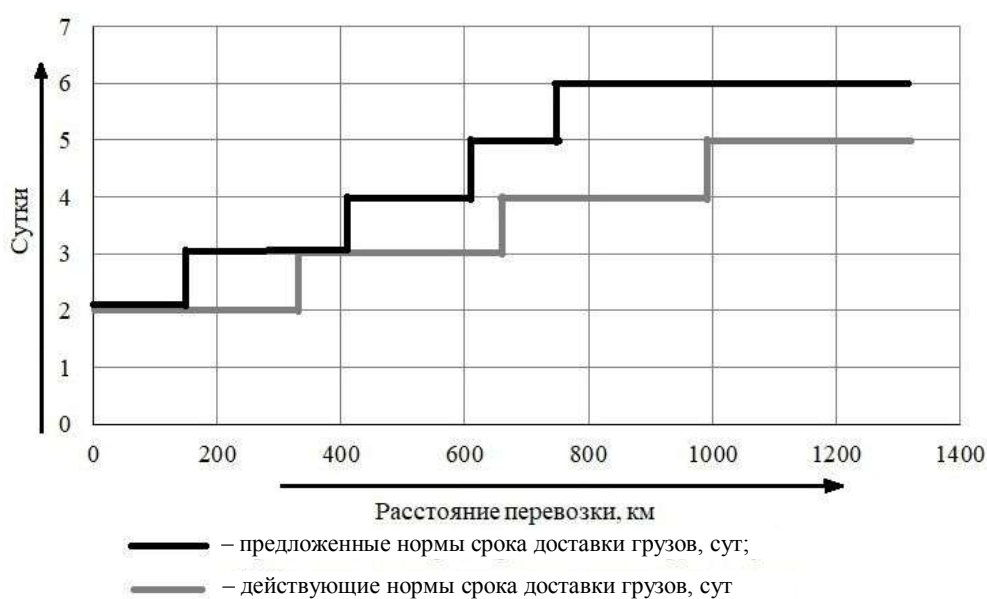


Рисунок 4 – Действующие и рекомендуемые значения нормы срока доставки повагонных отправок

Эффективность использования разработанного метода определения времени, затрачиваемого на технологические операции на станциях, и сроков доставки грузов заключается в следующем:

достаточно точное прогнозирование времени доставки в акционерное общество «Узбекистон темир йуллари» и, как следствие, снижение затрат, связанных с уплатой штрафа клиентам за просрочку грузов;

обеспечивает достаточную точность расчетов сроков доставки грузов с учетом особенностей технологических процессов, выполняемых на станциях, находящихся в ведении железнодорожного транспорта, и учета технологических возможностей процесса транспортировки железнодорожной инфраструктуры. Позволяет определять и заблаговременно планировать объем работ, которые будут выполняться на каждой станции; правильное прогнозирование сроков доставки грузов позволит сократить непроизводительные потери времени в процессе работы на станции и разработать рациональные планы действий. Это, в свою очередь, улучшит условия труда обслуживающего персонала и обеспечит их безопасность.

В результате применения рекомендаций, направленных на совершенствование технологии организации грузовых перевозок, с учетом сроков доставки на железнодорожном

транспорте была оценена экономическая эффективность в размере 2,681 млн руб. за счет сокращения штрафов, связанных с задержкой доставки грузов клиентам.

Внедрение результатов исследований в практику приведет к дальнейшему улучшению качества транспортных услуг, предоставляемых грузоотправителям, повышению привлекательности железнодорожного транспорта, эффективному использованию вагонов и повышению конкурентоспособности железнодорожного транспорта.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Разработана модель расчета сроков доставки грузов для правильного определения времени, затрачиваемого в пути следования груженым вагоном. Это позволило на этапе планирования перевозок с достаточной точностью прогнозировать время прибытия груженого вагона на станцию выгрузки грузов.

2. Разработана математическая модель взаимосвязи суточного пробега вагонных отправок с расстоянием перевозок на основе составления технологической схемы, учитывающей всю последовательность операций, выполняемых с вагонами в пути следования. Это позволило определить влияние доставки грузов «точно в срок» на эксплуатационные показатели с учетом особенностей технологических процессов работы железнодорожного транспорта.

3. Разработана технология нормирования сроков доставки грузов для обоснования суточного пробега вагонных отправок в системе грузоперевозок. В результате предложено нормировать суточный пробег в зависимости от расстояния перевозки для вагонных отправок: на расстояния до 200 км – 150 км/сут, от 201 до 600 км – 200, от 601 км до 1200 км – 250, на расстояние более 1201 км – 300 км/сут.

4. В результате применения рекомендаций по совершенствованию технологии организации грузовых перевозок с учетом сроков доставки на железнодорожном транспорте оценена экономическая эффективность в размере 2,681 млн руб. за счет уменьшения размера штрафа, связанного с просрочкой доставки грузов клиентам. Внедрение предлагаемых рекомендаций позволило получить эффективные решения по переработке поездов в процессе перевозок грузов с учетом технического оснащения железнодорожных участков.

Список литературы

1. Кобулов, Ж. Р. Организация движения сборных поездов между техническими станциями при доставке грузов / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 104–111.

2. Кобулов, Ж. Р. К вопросу о комплексном решении задачи совершенствования срока доставки грузов на железнодорожном транспорте / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов, М. С. Ташматова. – Текст : непосредственный // Universum: Технические науки. – 2021. – № 5 (86). – С. 13–20.

3. Kobulov J., Barotov J. Method of Improvement of Efficiency Transportation Technology. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Volume-8, Issue-4, November 2019, pp. 7720 – 7726.

4. Кобулов, Ж. Р. Эффективные способы эксплуатации вагонов на железнодорожном транспорте / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Вестник ТАДИ. – 2019. – № 1. – С. 92–97.

5. Kobulov J. R., Barotov J. S. Rationing the time of departure of freight cars from stations and optimizing delivery times, *Bulletin of Tashkent Institute of railway engineers*, 2019, no. 2, pp. 92 – 97.

6. Kobulov J. R., Barotov J. S. The Development Model of Dispatching Wagons from Stations, *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 6, Issue 5, May 2019, pp. 9460 – 9466.

7. Kobulov J. R., Mukhamedova Z. G., Barotov J. S. Regulation of departure time of freight wagons from stations and optimization of delivery time of freight wagons from stations, *Monografia pokonferencyjna: Science, research, development*, Barcelona, 2019, pp. 303 – 307.

8. Сметанин, А. И. Техническое нормирование эксплуатационной работы железных дорог / А. И. Сметанин. – Москва : Транспорт, 1984. – 295 с. – Текст : непосредственный.
9. Определение причины потерь, влияющих на величину времени нахождения вагонов на станции / Д. Б. Бугунов, Ж. С. Баротов, Ж. Р. Кобулов, К. А. Журабоев. – Текст : непосредственный // ТАЙИ ахборотномаси. – 2019. – № 2. – С. 89–97.
10. Kobulov J. R., Barotov J. S. The Method To Measure Time Spent On Wagons' Technological Operations at Stations, *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2019, vol. 6, Issue 11, pp. 11587 – 11594.
11. Kobulov J., Barotov J. Improvement of customer service technology in railway transport, *Railway transport: topical issues and innovations*, 2019, no. 1, pp. 41 – 46.
12. Кобулов, Ж. Р. Организация движения сборных поездов для ускорения доставки грузов / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Дистанционные возможности и достижения науки : сборник материалов международной научно-практической конференции. – Киев, 2020. – Ч. 2. – С. 96–100.
13. Kobulov J., Barotov J. Improving the delivery of wagon shipments by mathematical-statistical methods, *E3S Web of Conferences CONMECHYDRO*, Part 1, 2021.
14. Кобулов, Ж. Р. Совершенствование системы грузоперевозок на железнодорожном транспорте при вагонных отправлениях / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов, Д. Ш. Бобоев. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы экономики и управления: наука и практика. Кriuлинские чтения : сборник материалов всероссийской научно-практической конференции. – Курск : Курский гос. ун-т, 2021. – С. 199–203.

References

1. Kobulov Zh. R., Barotov Zh. S. Organization of traffic of assembled trains between technical stations for delivery of goods [Organizatsiia dvizheniia sbornyykh poezdov mezhdu tekhnicheskimi stantsiyami pri dostavke грузов]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 4 (44), pp. 104 – 111.
2. Kobulov Zh. R., Barotov Zh. S., Tashmatova M. S. On the issue of a comprehensive solution to the problem of improving the delivery time of goods by rail [K voprosu o kompleksnom reshenii zadachi sovershenstvovaniia sroka dostavki грузов na zheleznodorozhnom transporte]. *Universum: Tekhnicheskie nauki – Universum: Technical Sciences*, 2021, no. 5 (86), pp. 13 – 20.
3. Kobulov J., Barotov J. Method of Improvement of Efficiency Transportation Technology. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Volume-8, Issue-4, November 2019, pp. 7720 – 7726.
4. Kobulov Zh. R., Barotov Zh. S. Effective ways to operate railcars in railway transport [Effektivnye sposoby ekspluatatsii vagonov na zheleznodorozhnom transporte]. *Vestnik TADI – Herald of TADI*, 2019, no. 1, pp. 92 – 97.
5. Kobulov J. R., Barotov J. S. Rationing the time of departure of freight cars from stations and optimizing delivery times, *Bulletin of Tashkent Institute of railway engineers*, 2019, no. 2, pp. 92 – 97.
6. Kobulov J. R., Barotov J. S. The Development Model of Dispatching Wagons from Stations, *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 6, Issue 5, May 2019, pp. 9460 – 9466.
7. Kobulov J. R., Mukhamedova Z. G., Barotov J. S. Regulation of departure time of freight wagons from stations and optimization of delivery time of freight wagons from stations, *Monografiya pokonferencyjna: Science, research, development*, Barcelona, 2019, pp. 303 – 307.
8. Smetanin A. I. *Tekhnicheskoe normirovaniye ekspluatatsionnoi raboty zheleznyykh dorog* (Technical regulation of operational work of railways). Moscow: Transport Publ., 1984, 295 p.
9. Butunov D. B., Barotov Zh. S., Kobulov Zh. R., Zhuraboev K. A. Determination of the cause of losses affecting the amount of time spent by wagons at the station [Opredelenie prichiny poter',

vliiaushchikh na velichinu vremeni nakhozheniia vagonov na stantsii]. *TAII akhborotnomasi*, 2019, no. 2, pp. 89 – 97.

10. Kobulov J. R., Barotov J. S. The Method To Measure Time Spent On Wagons' Technological Operations at Stations, *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2019, vol. 6, Issue 11, pp. 11587 – 11594.

11. Kobulov J., Barotov J. Improvement of customer service technology in railway transport, *Railway transport: topical issues and innovations*, 2019, no. 1, pp. 41 – 46.

12. Kobulov J. R., Barotov J. S. Organization of the movement of combined trains to speed up the delivery of goods [Organizatsiia dvizheniia sbornikh poezdov dlia uskoreniia dostavki gruzov]. *Distantionnye vozmozhnosti i dostizheniia nauki: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Remote opportunities and achievements of science: collection of materials of the international scientific and practical conference). – Kiev, 2020, part 2, pp. 96 – 100.

13. Kobulov J., Barotov J. Improving the delivery of wagon shipments by mathematical-statistical methods, *E3S Web of Conferences CONMECHYDRO*, Part 1, 2021.

14. Kobulov J. R., Barotov J. S., Boboev D. Sh. Improving the system of cargo transportation by rail during carriage shipments [Sovershenstvovanie sistemy gruzoperevozok na zheleznodorozhnom transporte pri vagonnykh otpravkakh]. *Aktual'nye voprosy ekonomiki i upravleniia: nauka i praktika. Krivulinskie chteniia: sbornik materialov vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Topical issues of economics and management: science and practice. Krivulinsky readings: collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference). – Kursk, 2021, pp. 199 – 203.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кобулов Жамшид Ренатович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

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

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: + 998 93 534 16 26 (моб.).

E-mail: jam.uzb@mail.ru

Баротов Жамшид Сайфуллаевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел. + 998 91 778 10 11 (моб.).

E-mail: jamshid-uzb@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кобулов, Ж. Р. Совершенствование математической модели срока доставки груза повагонной отправки на железнодорожном транспорте / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 129 – 138.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kobulov Jamshid Renatovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lichilar str, 1, Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, professor of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: + 998 93 534 16 26.

E-mail: jam.uzb@mail.ru

Barotov Jamshid Sayfullayevich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lichilar str, 1, Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: + 998 91 778 10 11.

E-mail: jamshid-uzb@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kobulov J. R., Barotov J. S. Improvement of the mathematical model of the delivery time of wagonload cargo by rail. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 4 (48), pp. 129 – 138 (In Russian).

А. С. Краснов, К. К. Ким

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ОТ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. При разработке комплекса организационно-технических энергосберегающих мер необходимо правильно оценивать целесообразность применения тех или иных мероприятий не только с точки зрения окупаемости инвестиций, но и исходя из технологического процесса предприятия. Необходимо учитывать кроме текущих параметров установленного оборудования и другие немаловажные факторы, например, степень загрузки оборудования в течение года, так как этот параметр в межотопительный период, как правило, существенно меньше, чем в отопительный. Следует также учитывать и перспективы развития предприятия. Многие современные энергосберегающие технологии имеют длительный срок окупаемости, и вызвано это не столько малым энергосберегающим эффектом, сколько малой известностью и малым спросом данных технологий, что приводит к высокой стоимости покупки и обслуживания. При правильном выборе и эксплуатации оборудования такого рода предприятие может ощутимо снизить себестоимость выпускаемой продукции и повысить свою конкурентоспособность на рынке. В статье рассматриваются аспекты подходов оценки потенциала энергосбережения и выбора приоритетных направлений для повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий. Описываются наиболее распространенные энергосберегающие мероприятия, которые применимы ко многим существующим системам теплоснабжения. Приведенные процедуры оценки технико-экономического эффекта позволят предварительно оценить значимость и целесообразность применения того или иного мероприятия.

Ключевые слова: энергосбережение, система теплоснабжения, показатель энергоэффективности, энергосберегающие мероприятия.

Anton S. Krasnov, Konstantin K. Kim

Petersburg State Transport University (PGUPS), St. Petersburg, the Russian Federation

EVALUATION OF EFFECT FROM IMPLEMENTATION OF ENERGY-SAVING MEASURES IN HEAT SUPPLY SYSTEMS

Abstract. When developing a set of organizational and technical energy saving measures, it is necessary to correctly assess the feasibility of using certain measures not only in terms of return on investment, but also based on the technological process of the enterprise. It is necessary to take into account not only the current parameters of the installed equipment, but also other, important factors: the degree of equipment utilization during the year, since this parameter in the equipment during the inter-heating period, as a rule, is significantly less than in the heating period. It should also take into account the prospects for the development of the enterprise. Many modern energy-saving technologies have a long payback period, and this is caused not so much by a small energy-saving effect as by the low popularity and low demand for these technologies, which leads to high purchase and maintenance costs. With the right choice and operation of equipment of this kind, an enterprise can significantly reduce the cost of its products and increase its competitiveness in the market. The article discusses the issues of approaches to assessing the potential of energy saving and the choice of priority areas for increasing the energy efficiency of heat supply systems of industrial enterprises. The described energy saving measures are applicable to the majority of existing heat supply systems and are the most common. The given procedures for assessing the technical and economic effect allow us to pre-evaluate the significance and feasibility of applying a particular event.

Keywords: energy saving, heating system, energy efficiency indicators, energy saving measures.

Внедрение энергосберегающих технологий является наиболее перспективным направлением при модернизации систем теплоснабжения. Правильный выбор энергосберегающих мероприятий служит основой как для экономии энергоресурсов, так и для снижения себестоимости выпускаемой предприятием продукции.

Обоснованный выбор энергосберегающих мероприятий может быть выполнен только на основании сравнения топливно-энергетических балансов, построенных с учетом реализации энергосберегающих мероприятий и балансов базового и прогнозируемого периодов. Подробное

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

описание и классификация энергетических и топливно-энергетических балансов довольно полно раскрыты в работах [1 – 4]. Обобщенные данные приведены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классификация энергетических балансов

Топливо-энергетический баланс содержит основную техническую информацию, характеризующую работу системы теплоснабжения и играет главную роль при оценке энергетической эффективности системы теплоснабжения. Структурные элементы топливно-энергетического баланса системы теплоснабжения и схема их взаимодействия показаны на рисунке 2.

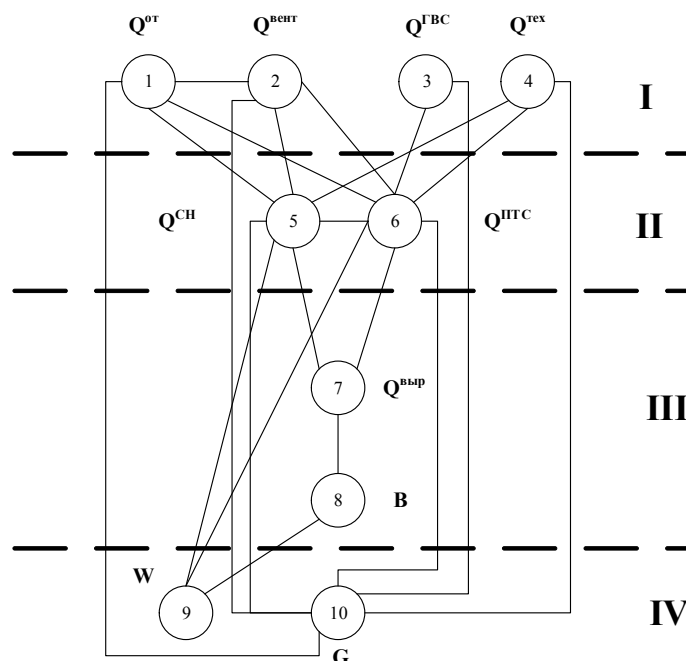


Рисунок 2 – Структурные составляющие топливно-энергетического баланса системы теплоснабжения:

I – потребление тепловой энергии; II – потери и затраты тепловой энергии; III – производство тепловой энергии и затраты топлива; IV – затраты электроэнергии и воды; 1 – 4 – полезный отпуск тепловой энергии на нужды отопления, вентиляции, горячего водоснабжения (ГВС) и технологические нужды соответственно; 5 – затраты тепловой энергии на собственные нужды источника тепловой энергии; 6 – потери тепловой энергии при транспортировке по тепловым сетям; 7 – выработка тепловой энергии; 8 – затраты топлива; 9 – затраты электроэнергии; 10 – затраты воды

Для полного анализа работы системы теплоснабжения используются следующие топливно-энергетические балансы:

баланс базового периода, характеризующий работу системы теплоснабжения за прошедший период (месяц, квартал, год), в течение которого имеется наиболее полная информация по потреблению энергетических ресурсов и режимах работы основного и вспомогательного оборудования;

баланс текущего периода, характеризующий работу системы теплоснабжения в текущем периоде (месяц, квартал, год). Данный вид баланса используется для изучения особенностей работы системы теплоснабжения в переходный период, так как включает в себя базовую и прогнозируемую части;

баланс прогнозируемого периода, характеризующий работу системы теплоснабжения и возможные изменения на последующие периоды (месяц, квартал, год).

Обработка данных, входящих в состав топливно-энергетических балансов, выполняется на основе критериальной оценки, методика которой подробно описана в источниках [5 – 7].

С использованием полученных коэффициентов энергетической эффективности, с целью определения наиболее приоритетных направлений энергосбережения выполняется анализ результатов с применением метода экспертной оценки качества продукции (метода ранжирования). В основе метода лежит ранжирование группой экспертов ряда показателей по величине. В рассматриваемом случае в качестве «экспертов» целесообразно применить временной период (год, квартал, месяц и т. д.), за который производится оценка энергетической эффективности системы теплоснабжения. В качестве объекта оценивания принимаются коэффициенты энергетической эффективности k . Численное значение ранга в ряду возрастающей шкалы порядка увеличивается от 1 до m . Определяются суммы рангов N_i каждого из объектов экспертной оценки, на основании чего строится обобщенный ранжированный ряд. Обобщенные экспертные оценки качества группы – коэффициенты весомости – вычисляются по формуле:

$$Q_i = \frac{\sum_{j=1}^m N_{i,j}}{\sum_{i=1, j=1}^{n,m} N_{i,j}}, \quad (1)$$

где m – количество экспертов (рассматриваемых периодов); n – число оцениваемых коэффициентов энергетической эффективности; $\sum_{j=1}^m N_{i,j}$ – суммарное количество рангов, полученных i -м объектом от всех j -экспертов (периодов); $\sum_{i=1, j=1}^{n,m} N_{i,j}$ – наибольшее число рангов всех оцениваемых коэффициентов.

Точность экспертных оценок определяется в соответствии с коэффициентом конкордации:

$$W = \frac{12 \cdot S}{n^2 \cdot (m^3 - m)}, \quad (2)$$

где S – сумма квадратов отклонений рангов от среднего арифметического значения рангов,

$$S = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m N_{i,j} - N_{\text{ср}})^2, \quad (3)$$

где $N_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение рангов.

Значения коэффициента конкордации лежат в диапазоне $0 \dots 1$, где 0 означает полную несогласованность, а 1 – полную согласованность экспертных оценок.

По полученному обобщенному ранжированному ряду коэффициентов энергетической эффективности определяются наиболее перспективные с точки зрения повышения энергетической эффективности направления. Такие направления будут соответствовать минимальному значению ранга коэффициента k .

Кроме того, применение экспертного метода с использованием временного периода в качестве «эксперта» позволяет выделить благоприятные и неблагоприятные условия эксплуатации основного и вспомогательного оборудования системы теплоснабжения при различных влияющих факторах, таких как климатические условия, объемы производимой продукции и пр.

Обработка данных с использованием критериальной оценки и экспертного метода ранжирования позволяет с высокой степенью точности определить наиболее выгодные с точки зрения реализации энергосберегающие мероприятия для конкретно рассматриваемой системы теплоснабжения. Употребление в качестве основы топливно-энергетических балансов обеспечивает оценку эффективности того или иного мероприятия с учетом возможного влияния различных факторов.

Основные способы повышения энергетической эффективности главных элементов системы теплоснабжения промышленного предприятия, применимые к большинству систем теплоснабжения, основаны на опыте как отечественных, так и зарубежных [8] наработок в этой области.

Энергосберегающие мероприятия для систем теплоснабжения разделяются на четыре укрупненных группы в соответствии с распределением показателей энергетической эффективности.

1. Котельные агрегаты или теплогенерирующие устройства. К этой группе относятся мероприятия, направленные на повышение энергетической эффективности теплогенерирующего оборудования, в том числе проведение режимно-наладочных работ, составление скорректированных графиков работы оборудования, замена котельного оборудования.

К наиболее распространенным энергосберегающим мероприятием в данной группе относится замена котлоагрегатов с низким КПД на современные высокотехнологичные котлоагрегаты. Техничко-экономический эффект достигается за счет существенного снижения потребления топлива.

Определение удельного расхода топлива на отпуск тепловой энергии после замены котлоагрегата и расхода топлива в натуральном выражении производится на основании топливно-энергетического баланса предприятия с использованием энергетических характеристик новых котлоагрегатов. Зависимость удельного расхода топлива от КПД котлоагрегата показана на рисунке 3. На основании данной зависимости можно оценить изменение расхода топлива в зависимости от КПД и предполагаемой загрузки выбираемого котлоагрегата.

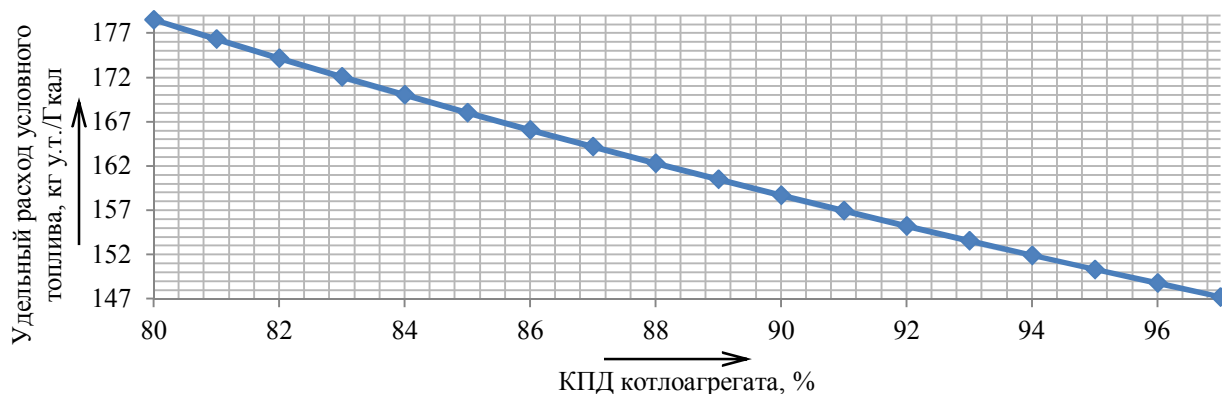


Рисунок 3 – Зависимость удельного расхода топлива от КПД котлоагрегата

Рисунок 4 иллюстрирует зависимость стоимости условного топлива (из расчета 4500 руб./тыс. м³ природного газа, затрачиваемого на выработку 1 Гкал тепловой энергии) от КПД котлоагрегата.

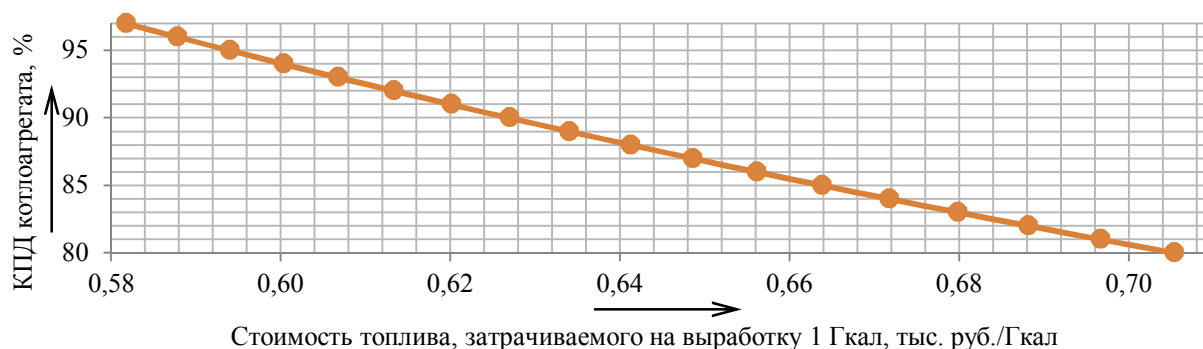


Рисунок 4 – Зависимость стоимости условного топлива, затрачиваемого на выработку 1 Гкал тепловой энергии, от КПД котлоагрегата

Величина экономии условного топлива при замене котлоагрегатов рассчитывается по формуле:

$$\Delta B = Q_{\text{ч}} \cdot T_{\text{пер}} \cdot (b_{\text{ф}} - b_{\text{н}}) \cdot 10^{-3}, \text{ кг у. т.}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{ч}}$ – среднечасовая тепловая нагрузка котлоагрегата, Гкал/ч; $T_{\text{пер}}$ – число часов работы котлоагрегата в рассматриваемом периоде, ч; $b_{\text{ф}}$ – удельный расход топлива на фактический отпуск тепловой энергии, кг у.т./Гкал; $b_{\text{н}}$ – удельный расход топлива на прогнозируемый отпуск тепловой энергии, кг у.т./Гкал.

Формула (1) в совокупности с графиками, приведенными на рисунках 3 и 4, позволяет оценить технико-экономический эффект от установки новых котельных агрегатов. При изменении стоимости топлива построение графика, приведенного на рисунке 4, может быть пересчитано по формуле:

$$c_{\text{т}} = b \cdot \frac{7000}{Q_{\text{р}}^{\text{н}}} \cdot C_{\text{т}}, \text{ тыс. руб./Гкал}, \quad (5)$$

где b – удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии, кг у.т./Гкал; $Q_{\text{р}}^{\text{н}}$ – низшая рабочая теплота сгорания используемого топлива, ккал/кг (ккал/м³); $C_{\text{т}}$ – стоимость используемого топлива, тыс. руб.

2. Источники теплоснабжения. В качестве мероприятий, направленных на повышение энергетической эффективности источника теплоснабжения в целом, могут быть применены децентрализация системы теплоснабжения, использование бросовой тепловой энергии, утилизируемой в атмосферу (выпар деаэратора, тепловая энергия конденсата и пр.), применение когенерационных или тригенерационных установок.

При рассмотрении способов экономии топливно-энергетических ресурсов применительно к источникам тепловой энергии можно выделить наиболее распространенный – увеличение коэффициента использования основного оборудования, т. е. его эксплуатация на номинальной нагрузке (с большим КПД). На рисунке 5 показаны зависимости КПД паровых и водогрейных котлоагрегатов различной мощности, работающих на природном газе, от теплопроизводительности. Анализ этих зависимостей, приведенных на рисунке 5, а, свидетельствует о том, что эксплуатация котлоагрегатов большой мощности на малых нагрузках неэффективна ввиду малого КПД, в то же время КПД котлоагрегатов меньшей мощности на данных нагрузках существенно выше. Эксплуатация отечественных водогрейных котлоагрегатов (рисунок 5, б) рекомендуется на нагрузках 70 – 95 % от номинальной, так как при данной нагрузке они обладают большим КПД.

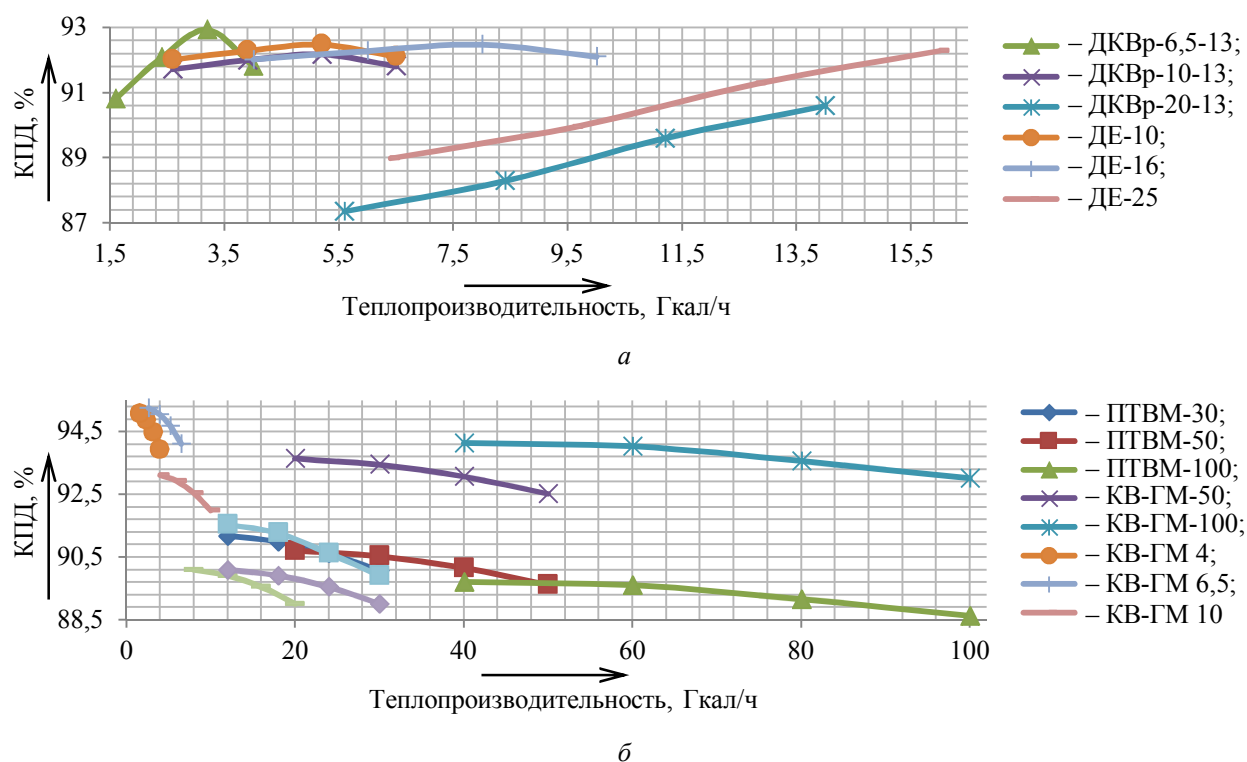


Рисунок 5 – Зависимость КПД котлоагрегатов от теплопроизводительности: паровые (а) и водогрейные (б) котлоагрегаты

Децентрализация системы теплоснабжения в ряде случаев позволяет существенно снизить потребление предприятием топливно-энергетических ресурсов, таких как топливо, тепловая энергия, вода и повысить энергетическую эффективность системы теплоснабжения.

Технико-экономический эффект от децентрализации систем теплоснабжения достигается за счет ликвидации протяженных участков тепловой сети и паропроводов, что обеспечивает

- устранение избытков тепловых потерь при передаче тепловой энергии;
- снижение потребления электроэнергии на перекачку теплоносителя по тепловым сетям;
- создание одного или нескольких децентрализованных источников энергии с высокими технико-экономическими показателями.

3. Тепловые сети. Повышение энергетической эффективности систем транспортировки тепловой энергии достигается заменой труб тепловых сетей на современные, диспетчеризацией тепловых сетей и использованием современной тепловой изоляции. Последнему способу придается особый приоритет, к нему также можно отнести использование предизолированных труб. Выбор оптимальной толщины и типа тепловой изоляции зависит от множества факторов, таких как стоимость изоляции, условия эксплуатации, стоимость тепловой энергии и др. Сравнительный анализ основных характеристик различных типов тепловой изоляции трубопроводов приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ теплоизоляционных материалов трубопроводов

Вид тепловой изоляции	Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м ² ·°C)	Диапазон рабочих температур, °C	Срок эксплуатации, лет
Пенополиуретан (ППУ) жесткий	0,019 ... 0,04	–150 ... +145	30
Пенополистирол	0,043 ... 0,064	–80 ... +80	15
Минеральная вата	0,052 ... 0,058	–40 ... +120	5
Керамзит	0,120 ... 0,18	–	15
Пробковая плита	0,05 ... 0,06	–30 ... +90	3

Согласно данным таблицы 1 наиболее оптимальным материалом для тепловой изоляции являются пенополиуретан и минеральная вата. Однако пенополиуретан по сравнению с минеральной ватой характеризуется более низким коэффициентом теплопередачи и высоким сроком службы.

Применение пенополиуретана позволяет снизить потери тепловой энергии при передаче тепловой энергии практически в два раза.

Система оперативного дистанционного контроля (ОДК), которой оборудуются предизолированные трубы, предназначена для непрерывного или периодического контроля состояния теплоизоляционного слоя и обнаружения мест увлажнения изоляции.

Данные о техническом эффекте при замене предельно изношенных труб тепловой сети (система отопления по температурному графику 95/70 °С) на предизолированные, полученные авторами в ходе расчетных исследований, представлены на рисунке 6. В качестве климатических условий принимались данные для г. Санкт-Петербурга.

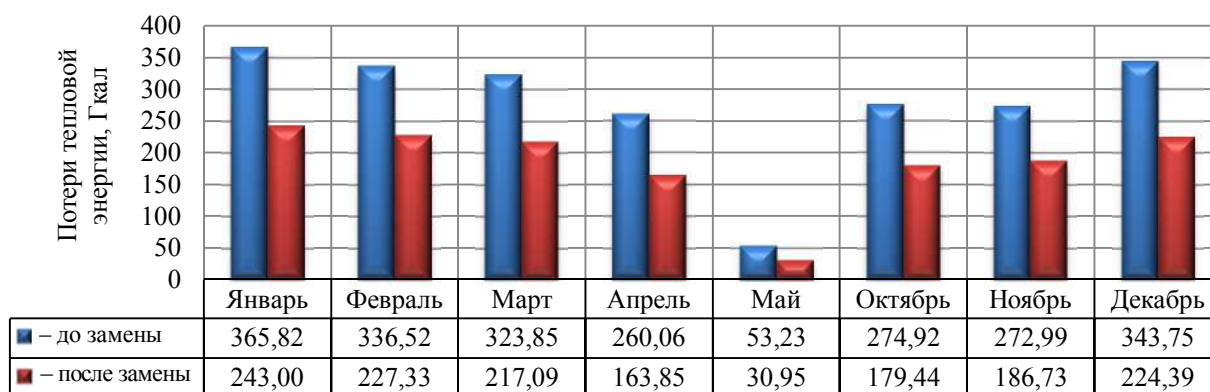


Рисунок 6 – Технический эффект от применения предизолированных труб

4. Потребители тепловой энергии. К рассматриваемой группе можно отнести мероприятия, направленные на повышение энергетической эффективности систем отопления, вентиляции, ГВС и снижение потребления тепловой энергии на технологические нужды предприятия. К ним причисляются такие мероприятия, как утепление фасадов зданий и сооружений, применение систем рекуперации тепловой энергии, использование систем погодного регулирования и автоматизации систем отопления и вентиляции [9] и др.

К распространенным энергосберегающим мероприятиям, способным существенно снизить потребление топливно-энергетических ресурсов потребителями тепловой энергии, относятся терморенновация ограждающих конструкций зданий. Эффект в этом случае достигается за счет увеличения термического сопротивления ограждающих конструкций, приводящего к уменьшению тепловых потерь [10]. В ряде случаев после терморенновации ограждающих конструкций в помещениях восстанавливается температурный режим согласно санитарным нормам, который не приводит к существенному снижению расхода тепловой энергии.

Коэффициенты теплопроводности λ современных теплоизоляционных материалов, использование которых возможно при реализации данного мероприятия, показаны на рисунке 7. Как видно из представленных данных, среднее значение теплопроводности применяемых в настоящее время теплоизоляционных материалов лежит в диапазоне 0,041...0,042 Вт/(м·К).

Сравнительный анализ использования различных типов тепловой изоляции на примере стены из красного кирпича толщиной 250 мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,64$ Вт/(м·°С) показан в таблице 2. При выполнении оценочных расчетов толщина используемого материала тепловой изоляции принималась равной 100 мм.

На основе данных таблицы 2 можно заключить, что установка или замена тепловой изоляции ограждающих конструкций обеспечивает снижение потерь тепловой энергии через эти конструкции практически на 20 %.

Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

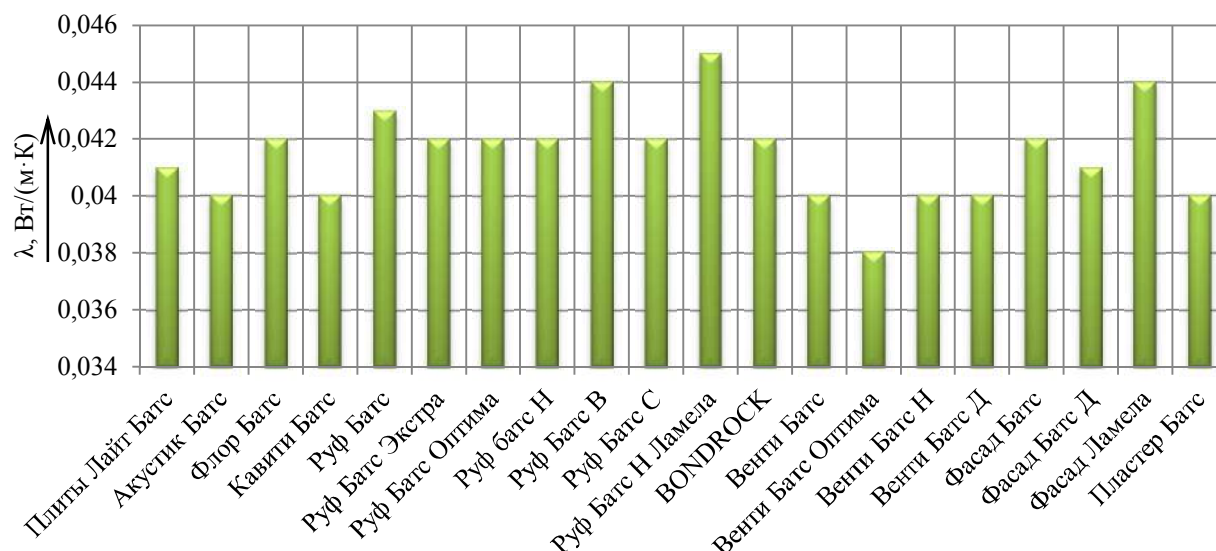


Рисунок 7 – Теплопроводность современных теплоизоляционных материалов

Таблица 2 – Сравнительный анализ применения различных типов тепловой изоляции

Марка изоляции	Фактическое сопротивление теплопередаче, $R_{\text{факт}}$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	Прогнозируемое сопротивление теплопередаче, $R_{\text{прогн}}$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	ΔR , ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	Потери тепловой энергии без тепловой изоляции $Q_{\text{ф}}$, Вт/100 м^2	Прогнозируемые потери тепловой энергии с использованием тепловой изоляции $Q_{\text{пр}}$, Вт/100 м^2
Плиты Лайт Батс	0,55	2,99	2,44	36,4	29,7
Акустик Батс	0,55	3,05	2,50	36,4	29,8
Флор Батс	0,55	2,93	2,38	36,4	29,6
Кавити Батс	0,55	3,05	2,50	36,4	29,8
BONDROCK	0,55	2,93	2,38	36,4	29,6
Венти Батс	0,55	3,05	2,50	36,4	29,8
Венти Батс Оптима	0,55	3,18	2,63	36,4	30,1
Венти Батс Н	0,55	3,05	2,50	36,4	29,8
Венти Батс Д	0,55	3,05	2,50	36,4	29,8
Фасад Батс	0,55	2,93	2,38	36,4	29,6
Фасад Батс Д	0,55	2,99	2,44	36,4	29,7
Фасад Ламела	0,55	2,82	2,27	36,4	29,3
Пластер Батс	0,55	3,05	2,50	36,4	29,8

При разработке комплекса организационно-технических энергосберегающих мер необходимо правильно оценивать целесообразность применения тех или иных мероприятий. Этого можно достичь применением современных методов оценки энергетической эффективности систем теплоснабжения, в том числе с применением критериальной оценки. При выборе мероприятий необходимо учитывать не только текущие параметры установленного оборудования, но и другие немаловажные факторы: степень загрузки оборудования, перспективы развития системы теплоснабжения и изменения подключенных тепловых нагрузок.

Предложенный инновационный подход к оценке энергетической эффективности систем теплоснабжения и выбора энергосберегающих мероприятий, базирующийся на критериальной оценке и методе экспертного ранжирования показателей, позволяет не только выявить недостатки системы теплоснабжения, но и определить значимость влияния внешних факторов на ее работу.

Описанные в статье энергосберегающие мероприятия наиболее распространены и применимы к большинству систем теплоснабжения. Приведенные описания помогают оценить предполагаемый эффект от реализации мероприятий на стадии прогнозирования работы

системы теплоснабжения. Следует обратить внимание на то, что оценка полного технико-экономического эффекта возможна только на основании сравнительного анализа нескольких топливно-энергетических балансов конкретной рассматриваемой системы.

При правильном выборе и внедрении рассмотренных мероприятий предприятие может ощутимо снизить затраты на топливно-энергетические ресурсы и себестоимость выпускаемой продукции и повысить свою конкурентоспособность на рынке.

Список литературы

1. Практическое пособие по выбору и разработке энергосберегающих проектов / под общ. ред. д.т.н. О. Л. Данилова, П. А. Костюченко. – Москва : Технопромстрой, 2006. – 688 с. – Текст : непосредственный.
2. Фокин, В. М. Основы энергосбережения и энергоаудита / В. М. Фокин. – Москва : Машиностроение-1, 2006. – 256 с. – Текст : непосредственный.
3. Самойлов, М. В. Основы энергосбережения / М. В. Самойлов, В. В. Паневчик, А. Н. Ковалев. – Минск : Белорус. гос. экон. ун-т, 2002. – 198 с. – Текст : непосредственный.
4. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / под рук. профессора О. Л. Данилова. – Москва : МЭИ, 2010. – 188 с. – Текст : непосредственный.
5. Фрейдкина, Е. М. Методы и критерии оценки эффективности энергосбережения : учебное пособие / Е. М. Фрейдкина. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский гос. технол. ун-т растительных полимеров, 2013. – 52 с. – Текст : непосредственный.
6. Середкин, А. А. Методика и критерий оценки энергоэффективности систем теплоснабжения / А. А. Середкин. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2017. – Т. 23. – № 1. – С. 27–35.
7. Посашков, М. В. Многокритериальное оценивание и направления повышения системной энергетической эффективности теплоснабжения от автономных энергоисточников : специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Посашков Михаил Викторович ; Самарский гос. техн. ун-т. – Самара, 2011. – 24 с. – Текст : непосредственный.
8. Методические рекомендации по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий. – Минск : Комитет по энергоэффективности при Совете министров Республики Беларусь, 2003. – 53 с. – Текст : непосредственный.
9. Энергоэффективность системы теплоснабжения зданий при различных методах регулирования теплопотребления / П. А. Стрижак, М. Н. Морозов. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 3 (202). – С. 88–96.
10. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения: 21.12.2021).

References

1. Smetanin A. I. *Prakticheskoe posobie po vyboru i razrabotke energosberegaiushchikh projektov* (A practical guide to the selection and development of energy saving projects). Moscow: Tekhnopromstroy Publ., 2006, 688 p.
2. Fokin V. M. *Osnovy energosberezheniya v voprosah teploobmena* (Basics of energy saving in heat exchange), Moscow: Mashinostroyeniye-1 Publ., 2005, 192 p.
3. Samoilov M. V., Panevchik V. V., Kovalev A. N. *Osnovy energosberezheniya* (Fundamentals of energy saving). Minsk: Belarusian State Economic University Publ., 2002, 198 p.
4. Danilov O. L. ed. *Energosberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiiakh* (Energy saving in thermal power engineering and thermal technologies). Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publ., 2010, 188 p.

5. Freydkina E. M. *Metody i kriterii ocenki effektivnosti energosberezheniya: uchebnoe posobie* (Methods and criteria for evaluating the efficiency of energy saving: training manual). Saint-Petersburg: Saint Petersburg State Technological University of Plant Polymers Publ., 2013, 52 p.
6. Seredkin A. A. Procedure and criterion for energy efficiency assessment of heat supply systems [Metodika i kriterij ocenki energoeffektivnosti sistem teplosnabzheniya]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta – Petersburg State Polytechnical University Journal: Natural and Engineering Sciences*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 27 – 35.
7. Posashkov M. V. *Sovershenstvovaniye metodov modelirovaniya iznashivaniya kontaktnykh elementov tokopriyomnikov elektropodvizhnogo sostava* (Multi-criteria assessment and directions for improving the system energy efficiency of heat supply from autonomous energy sources). Ph. D. thesis abstract, Samara, Samara State Technical University, 2011, 24 p.
8. *Prakticheskoe posobie po vyboru i razrabotke energosberegaiushchikh projektov* (Metodicheskie rekomendatsii po sostavleniiu tekhniko-ekonomicheskikh obosnovanii dlia energosberegaiushchikh meropriyatii). Minsk : Committee on Energy Efficiency under the Council of Ministers of the Republic of Belarus Publ., 2003, 53 p.
9. Strizhak P. A., Morozov M. N. Energy efficiency of buildings heating system using various methods of heat consumption regulation [Energoeffektivnost' sistemy teplosnabzheniya zdaniy pri razlichnykh metodah regulirovaniya teplopotrebleniya]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta – Petersburg State Polytechnical University Journal: Natural and Engineering Sciences*, 2014, no. 3 (202), pp. 88 – 96.
10. *SP 50.13330.2012 Teplovaia zashchita zdaniy* (SP 50.13330.2012 Thermal protection of buildings.), Available at: [https:// docs.cntd.ru/document/1200095525](https://docs.cntd.ru/document/1200095525) (accessed 21 December 2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Краснов Антон Сергеевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).
Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Электротехника и теплоэнергетика», ПГУПС.

Тел.: +7 (812) 457-85-37.

E-mail: anton.s.krasnov@gmail.com

Ким Константин Константинович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика», ПГУПС.

Тел.: +7 (812) 457-81-42.

E-mail: toe@pgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Краснов, А. С. Оценка эффекта от реализации энергосберегающих мероприятий в системах теплоснабжения / А. С. Краснов, К. К. Ким. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 139 – 148.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Krasnov Anton Sergeevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University» (PGUPS).

9, Moscow av., St. Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Electrical and heat power engineering», PGUPS.

Phone: +7 (812) 457-85-37.

E-mail: anton.s.krasnov@gmail.com

Kim Konstantin Konstantinovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University» (PGUPS).

9, Moscow av., St. Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, head of the department «Electrical and heat power engineering», PGUPS.

Phone: +7 (812) 457-81-42.

E-mail: toe@pgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Krasnov A. S., Kim K. K. Evaluation of effect from implementation of energy-saving measures in heat supply systems. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 4 (48), pp. 139 – 148 (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); содержание аннотации (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, подписочные 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* (не менее 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»

№ 4 (48) 2021

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), реестровый номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в официальном каталоге «Подписные издания» АО «Почта России» – ПП914.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии:

644046, Омская область, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;

тел.: +7 (3812) 31-05-54;

e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 28.02.2022.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 11.03.2022.

