

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 1(49)

2022

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 ТADEУШ – 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 «Электро-техника 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 – проректор 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 «Магистральная инженерия» АЛТ, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
19. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТГТУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
20. Харламов Виктор Васильевич – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор.

EDITORIAL BOARD

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Харламов В. В., Шкодун П. К., Попов Д. И. Исследование влияния технического состояния профиля коллектора на качество работы коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава.....2
- Петухов С. А., Росляков А. Д., Курманова Л. С., Карпенко М. Ю. Совершенствование автоматизированных систем регистрации параметров работы автономных локомотивов.....11
- Гаджиметов Г. И. О влиянии кососимметричной остаточной деформации рамы тележки вагона на безопасность движения.....22
- Кейно М. Ю. Эффективность рекуперативного торможения как критерий выбора вида тяги для новых железных дорог.....32

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

- Король Р. Г. Формирование приграничной терминально-логистической инфраструктуры для организации контрейлерных перевозок на направлении Суйфэнхэ (КНР) – Гродеково (РФ).....43
- Мухамедова З. Г., Ибрагимова Г. Р. К вопросу формирования грузовой инфраструктуры Республики Узбекистан.....57
- Давыдов А. И., Соколов М. М. Интеллектуальное управление безопасностью движения на железнодорожных переездах общего пользования.....67
- Ахмедзянов Г. Г., Галеев А. Д., Ключников М. В., Литвинов А. В. Комплекс предупреждения нештатных ситуаций на неохраемых железнодорожных переездах.....74

Электрические станции и электроэнергетические системы

- Буякова Н. В., Крюков А. В., Середкин Д. А., Фесак И. А. Моделирование электромагнитных полей трехфазной системы тягового электроснабжения.....83

Энергетические системы и комплексы

- Парамонов А. М., Резанов Е. М., Юша В. Л. О повышении энергосбережения в кузнечных и термических печах.....95
- Финиченко А. Ю., Полозкова А. П. Комбинированный метод применения солнечного коллектора и теплового насоса в условиях низких температур.....103

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Петров К. С., Петров В. В. Математическая модель функции чувствительности магнитноиндукционного датчика на основе астигматического подхода для идентификации дефектов поверхности катания колесных пар в процессе движения их над датчиком.....111
- Савоськин А. Н., Юренко К. И., Харченко П. А., Юренко И. К. Проблемно-ориентированный эволюционный алгоритм для оптимизации режимов ведения поезда.....122

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Д. И. Попов

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОФИЛЯ КОЛЛЕКТОРА НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Статья посвящена оценке влияния диагностических параметров, необходимых для оценки технического состояния профиля коллектора тяговых электродвигателей подвижного состава, на значение механической силы в контакте «щетка – коллектор». Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований оценки параметров профиля коллектора для тяговых электродвигателей ЭК810Ч магистральных электровозов 2ЭС6. Проведены четырехэтапные численные экспериментальные исследования для следующих условий: первый этап – учтены перепады высоты ламелей и гармоник; второй этап – учтены перепады высоты ламелей без влияния гармоник (с пониженным биением); третий этап – учтены гармоники без влияния перепадов высоты ламелей (с пониженным биением); четвертый этап – учтены гармоники без влияния перепадов высоты ламелей (с повышающим коэффициентом до заданного биения). С использованием математической модели движения щетки по коллектору установлена степень взаимосвязи между диагностическими параметрами, которые характеризуют состояние профиля коллектора тягового электродвигателя, и значением механической силы в контакте «щетка – коллектор». Предложен диагностический параметр, характеризующий разброс значений механической силы в контакте «щетка – коллектор» тягового электродвигателя, определяемый из соотношения силы упругого взаимодействия щетки с коллектором и среднего значения данной силы. Анализ результатов численного эксперимента показал, что коэффициент неустойчивости контакта в значительной степени определяется величиной среднего квадратического отклонения перепадов ламелей и в малой степени зависит от значений амплитуд гармоник. Гармонический состав профиля коллектора практически не влияет на значение коэффициента неустойчивости контакта при малых значениях перепадов ламелей. Сделан вывод о возможности использования диагностических параметров оценки состояния поверхности коллектора тягового электродвигателя для определения возможного неудовлетворительного контактирования между щеткой и коллектором. Предложено производить оценку качества ремонта коллекторов тяговых электродвигателей с учетом среднего квадратического отклонения (СКО) перепадов ламелей.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, коллектор, биение, диагностирование, диагностический параметр.

Viktor V. Kharlamov, Pavel K. Shkodun, Denis I. Popov

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

STUDY OF THE COLLECTOR PROFILE TECHNICAL CONDITION INFLUENCE ON THE PERFORMANCE OF THE COLLECTOR-BRUSH ASSEMBLY OF ROLLING STOCK TRACTION ELECTRIC MOTORS

Abstract. The article is devoted to assessing the influence of diagnostic parameters for assessing the technical condition of the collector profile of rolling stock traction motors on the value of the mechanical force in the «brush-collector» contact. The results of the experimental studies of the parameters of the collector profile for traction motors EK810Ch of mainline electric locomotives 2ES6 are presented. Four-stage numerical experimental studies were carried out for the following conditions: the first stage – the height differences of the lamellas and harmonics were taken into account; the second stage – the height differences of the lamellas are taken into account without the influence of harmonics (with reduced beating); the third stage – harmonics are taken into account without the influence of differences in the heights of the lamellas (with reduced beating); the fourth stage – harmonics are taken into account without the influence of differences in the heights of the lamellas (with a multiplying factor up to a given beat). Using a mathematical model of brush movement along the collector, a degree of relationship was established between the diagnostic parameters that characterize the state of the traction motor collector profile, with the value of the mechanical force in the «brush – collector» contact. A diagnostic parameter is proposed that characterizes the spread of mechanical force values in the «brush – collector» contact of a traction motor, determined from the ratio of the force of elastic interaction of the brush with the collector and the average value of this force. An analysis of the results of the numerical experiment showed that the contact instability coefficient is largely determined by the value of the standard deviation of the lamella drops and, to a small extent, depends on the values of the harmonic amplitudes. The harmonic composition of the collector profile has

practically no effect on the value of the contact instability coefficient at small values of the lamella drops. It is concluded that it is possible to use diagnostic parameters for assessing the state of the traction motor commutator surface to determine possible poor contact between the brush and the commutator. It is proposed to evaluate the quality of repair of collectors of traction motors taking into account the standard deviation of the differences of the lamella.

Keywords: traction motor, collector, runout, diagnostics, diagnostic parameter.

Бесперебойность, качество и эффективность эксплуатации магистральных локомотивов в значительной мере определяются техническим состоянием тяговых электродвигателей (ТЭД). В процессе работы ТЭД на состояние скользящего контакта «щетка – коллектор» оказывают влияние факторы механической и электрической природы. Неустойчивость в скользящем контакте «коллектор – щетка» может быть вызвана как режимом эксплуатации, так и некачественным ремонтом и техническим обслуживанием ТЭД в локомотивном сервисном депо. Имеющиеся и развивающиеся дефекты поверхности коллектора ТЭД приводят к нарушению коммутационного процесса в электродвигателе, возникновению искрения под электрическими щетками, могут вызвать их повышенный износ, привести к появлению кругового огня по коллектору и необходимости замены щеток и ремонта тяговой электрической машины [1 – 3].

Актуальным в настоящее время является вопрос повышения эффективности деятельности ОАО «Российские железные дороги» путем освоения и применения передовых инновационных технологий и технических средств, в том числе позволяющих выявлять причины неудовлетворительной работы ТЭД в условиях нарушения контактирования щетки с коллектором. Решение поставленной задачи возможно на основе использования различных диагностических параметров, характеризующих состояние рабочей поверхности коллектора, которые можно оценить при выполнении приемосдаточных испытаний ТЭД в условиях локомотивного сервисного депо [4].

В работах [5, 6] предложено использование математической модели, описывающей взаимодействие коллектора и электрической щетки ТЭД, при этом в данной модели щетка принимается как абсолютно упругое тело, совершающее радиальные и тангенциальные перемещения. Такая математическая модель содержит все необходимые основные элементы, присущие различным типам щеткодержателей, и позволяет определить траекторию движения электрической щетки в условиях взаимодействия с поверхностью коллектора. Система уравнений, описывающая силы, действующие на электрическую щетку при ее движении по коллектору, представлена двумя уравнениями с учетом принятых в модели допущений:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + F_{т. щ. д 1}(y, \dot{z}) + F_{т. щ. д 2}(y, \dot{z}) - N_p - Mg + N_k(y, z, \eta) = 0; \\ M\ddot{y} + F_{т. п}(N_p, \dot{y}) + F_{т. к}(N_k, \dot{y}) - N_1(y) + N_2(y) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где y, z – координаты щетки по тангенциальной и радиальной осям, м;

M – приведенная масса подвижных элементов коллекторно-щеточного узла (щетка, рычаг щеткодержателя, медный шунт), кг;

$F_{т. п}$ – сила трения между щеткой и рычагом щеткодержателя, знак которой зависит от направления скорости $\dot{y}$, Н;

$F_{т. к}$ – сила трения между щеткой и коллектором, знак которой зависит от направления скорости $\dot{y}$, Н;

$F_{т. щ. д 1, 2}$ – силы трения между щеткой и стенками щеткодержателя, знак которых зависит от направления скорости $\dot{z}$, Н;

$N_{1, 2}$ – горизонтальные упругие силы в местах контакта щетки со стенками щеткодержателя, Н;

N_p – сила нажатия рычага щеткодержателя на щетку, Н;

N_k – сила упругого взаимодействия щетки с коллектором, Н;

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

η – профиль коллектора в виде ряда чисел, м.

Действие различных механических сил на электрическую щетку вносит различный вклад в значение давления щетки на коллектор. На процесс взаимодействия щетки и коллектора оказывают влияние состояние профиля коллектора, механическое устройство нажимного механизма, физические свойства накладки на электрическую щетку и частота вращения якоря электродвигателя.

Проведенный анализ известных исследований [3] показал, что для оценки состояния поверхности коллектора ТЭД применяют различные диагностические параметры, характеризующие текущее значение высоты коллекторных пластин, первую и вторую производную функции профиля коллектора. Вместе с тем основными контролируемыми диагностическими параметрами, характеризующими техническое состояние коллектора (согласно действующей в настоящее время технической ремонтной документации), являются биение коллектора и изменение биения в холодном и горячем состоянии.

В работах ряда авторов проведены исследования по установлению соотношения диагностических параметров оценки технического состояния профиля коллектора и особенностей технологического процесса изготовления и ремонта узлов ТЭД. Например, в работе [7], посвященной совершенствованию технологического процесса ремонта и технического обслуживания ТЭД, предлагается оценивать качество механической обработки и сборки коллектора по изменению значений амплитуды первой – пятой гармонических составляющих периодической функции профиля коллектора на всех стадиях ремонта; качество формовки коллектора – по виду и параметрам закона распределения относительных высот ламелей (математическому ожиданию и среднему квадратическому отклонению) без учета первой и второй гармонических составляющих до и после проведения приемосдаточных испытаний ТЭД.

Целью настоящего исследования является установление взаимосвязи профиля коллектора и известных диагностических параметров, характеризующих техническое состояние профиля коллектора, с величиной механической силы в контакте «щетка – коллектор».

Для выявления совокупности диагностических параметров, определяющих влияние различных факторов на состояние поверхности коллектора и вызванных производственными и технологическими причинами, проведены экспериментальные исследования 17 ТЭД ЭК810С магистральных локомотивов 2ЭС6 в процессе приемосдаточных испытаний. Регистрация профилограмм осуществлялась с помощью разработанного на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС прибора ПКП-7Ц, который имеет бесконтактный вихретоковый параметрический датчик, осуществляющий преобразование расстояния до поверхности коллектора в электрический сигнал, который записывался в энергонезависимую память встроенного в прибор накопителя информации в виде цифровых значений [8, 9].

Обработка исходных профилограмм коллекторов ТЭД позволила вычислить диагностические параметры: биение δ , первую – пятую гармоники функции профиля коллектора $A_1 - A_5$, среднее квадратическое отклонение перепадов между соседними ламелями $\sigma_{\Delta h}$ [10, 11]. Из всего набора полученных данных были отобраны наиболее характерные профили коллекторов трех различных ТЭД для дальнейшего исследования. Результаты измерений и расчета параметров исследуемых профилей коллекторов ТЭД приведены в таблице 1.

Параметры, приведенные в таблице 1, использованы для математического моделирования движения щетки в щеткодержателе в соответствии с системой уравнений (1). При математическом моделировании приняты следующие параметры коллекторно-щеточного узла ТЭД и режима его работы: количество ламелей $K = 516$, размеры щетки – $20 \times 40 \times 60$ мм, приведенная масса подвижных элементов коллекторно-щеточного узла $M = 0,103$ кг, частота вращения коллектора $n = 770$ об/мин, сила нажатия рычага щеткодержателя на щетку $N_p = 45$ Н, диаметр коллектора $D_k = 0,63$ м, коэффициент трения щетки о коллектор $k_{т.к} = 0,3$, коэффициент трения щетки о стенки щеткодержателя $k_{т.щ.д} = 0,45$, коэффициент упругости щетки $k_{у.щ} = 10^{-6}$. Количество расчетных точек за один оборот коллектора принято равным 5000 штук.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Параметры коллекторов исследуемых ТЭД магистральных электровозов

Параметры, учитываемые при математическом моделировании	ТЭД № 1	ТЭД № 2	ТЭД № 3
Биение δ , мкм	39,179	70,655	27,938
СКО перепадов ламелей $\sigma_{\Delta h}$, мкм	10,011	8,474	5,654
Амплитуда 1-й гармоники A_1 , мкм	2,689	17,415	4,732
Амплитуда 2-й гармоники A_2 , мкм	3,521	2,749	2,777
Амплитуда 3-й гармоники A_3 , мкм	2,305	2,571	0,820
Амплитуда 4-й гармоники A_4 , мкм	0,599	0,877	0,516
Амплитуда 5-й гармоники A_5 , мкм	1,017	0,575	0,902

При выполнении моделирования производился расчет для двух полных оборотов коллектора ТЭД. Анализ параметров производился для второго оборота, т. е. в установившемся режиме работы рассматриваемой механической системы. При моделировании использованы следующие начальные условия для момента времени $t = 0$: проекции скорости щетки на оси y , z и координата щетки по оси y приняты нулевыми, начальная координата щетки по оси z принята равной высоте коллекторной пластины, имеющей максимальное значение из ламелей, находящихся под щеткой в начальный момент времени.

С целью установления влияния вычисленных диагностических параметров на динамику взаимодействия щетки с коллекторными пластинами математическая модель (1) формализована в расчетном файле программы *Mathcad*. В разработанном файле по заданным параметрам (δ , $A_1 - A_5$, $\sigma_{\Delta h}$) с помощью встроенных функций-генераторов случайных чисел (*rnorm* с нормальным законом распределения и *rnd* с равномерным законом распределения) сформированы случайные профили коллектора η по выражениям:

$$Per = \text{norm} \left(K, 0, \frac{\sigma_{\Delta h}}{k_{\text{масш}}} \right); \quad (2)$$

$$\eta_i = Per_i + A_1 \sin\left(\frac{2\pi i}{K}\right) + A_2 \sin\left(\frac{4\pi i}{K} + \text{rnd}(2\pi)\right) + A_3 \sin\left(\frac{6\pi i}{K} + \text{rnd}(2\pi)\right) + \dots \quad (3)$$

$$\dots + A_4 \sin\left(\frac{8\pi i}{K} + \text{rnd}(2\pi)\right) + A_5 \sin\left(\frac{10\pi i}{K} + \text{rnd}(2\pi)\right),$$

где K – число ламелей;

$k_{\text{масш}}$ – масштабирующий коэффициент;

i – ряд целых чисел от 0 до $K - 1$.

Для полученного профиля коллектора η вычислены значения СКО перепадов между соседними ламелями $\sigma_{\Delta h}$ и биение δ .

Проведен численный эксперимент, состоящий из четырех этапов с помощью математической модели, реализованной в программе *Mathcad*. Для каждого этапа численного эксперимента по выражениям (2) и (3) сформировано по 30 различных реализаций профиля коллектора для каждого из трех наборов параметров (ТЭД № 1 – 3), приведенных в таблице 1.

На каждом этапе численного эксперимента осуществлено математическое моделирование движения щетки для ТЭД № 1 – 3 по соответствующим сформированным профилям коллектора. В результате математического моделирования по выражению (1) получены временные диаграммы координаты центра масс щетки по вертикальной оси z и силы упругого взаимодействия щетки с коллектором N_k . Результаты моделирования для ТЭД № 2 приведены на рисунках 1 – 4.

Для первого этапа численного эксперимента по параметрам ТЭД № 1 – 3 сформированы по 30 вариантов профилей коллектора, у которых учтены заданные в таблице 1 параметры δ , $A_1 – A_5$, $\sigma_{\Delta h}$, и при этом расчетные параметры $\sigma_{\Delta h}$ и δ отклоняются от параметров, заданных в таблице 1, не более чем на 10 %.

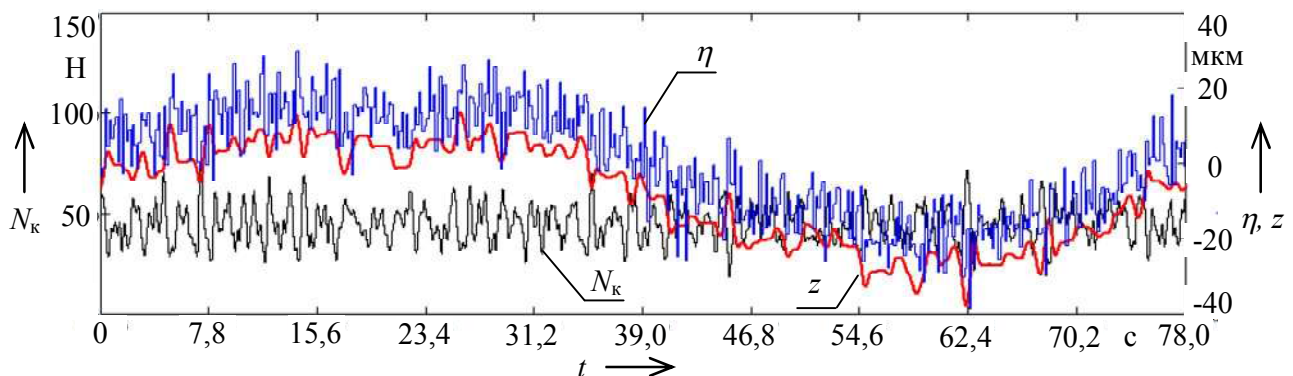


Рисунок 1 – Пример расчетных временных диаграмм с параметрами ТЭД № 2 для первого этапа численного эксперимента

Для второго этапа численного эксперимента по параметрам ТЭД № 1 – 3 сформированы по 30 вариантов профилей коллектора, у которых учтен только заданный в таблице параметр $\sigma_{\Delta h}$, при условии, что он отклоняется от заданного в таблице 1 значения не более чем на 10 %, а амплитуды $A_1 – A_5$ равны нулю. В данном случае расчетное значение биения δ для сформированного профиля коллектора оказывается несколько меньшим, чем приведено в таблице 1 для соответствующего ТЭД.

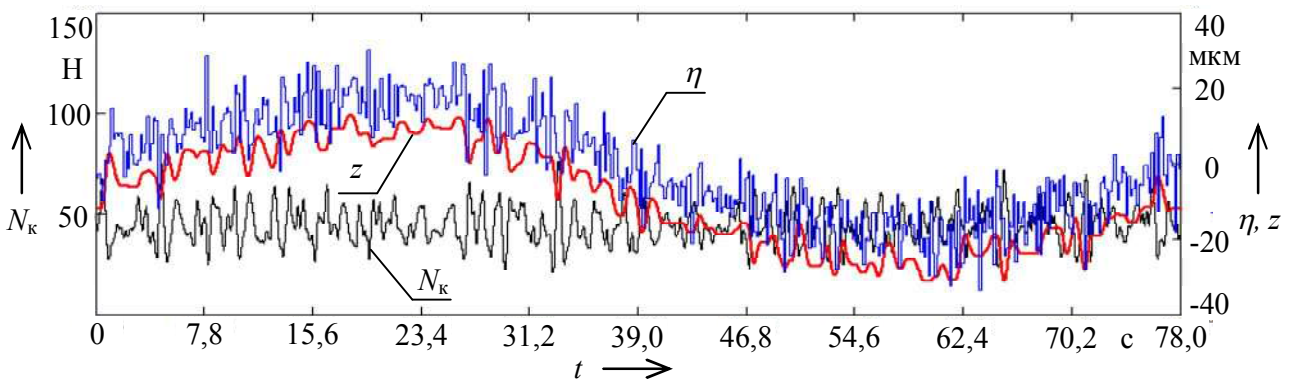


Рисунок 2 – Пример расчетных временных диаграмм с параметрами ТЭД № 2 для второго этапа численного эксперимента

Для третьего этапа численного эксперимента по параметрам ТЭД № 1 – 3 сформированы по 30 вариантов профилей коллектора, у которых учтены только заданные в таблице 1 параметры $A_1 – A_5$, а параметр $\sigma_{\Delta h} = 0$. В данном случае расчетное биение δ у сформированного профиля коллектора получается несколько ниже, чем приведенное в таблице 1 для соответствующего ТЭД.

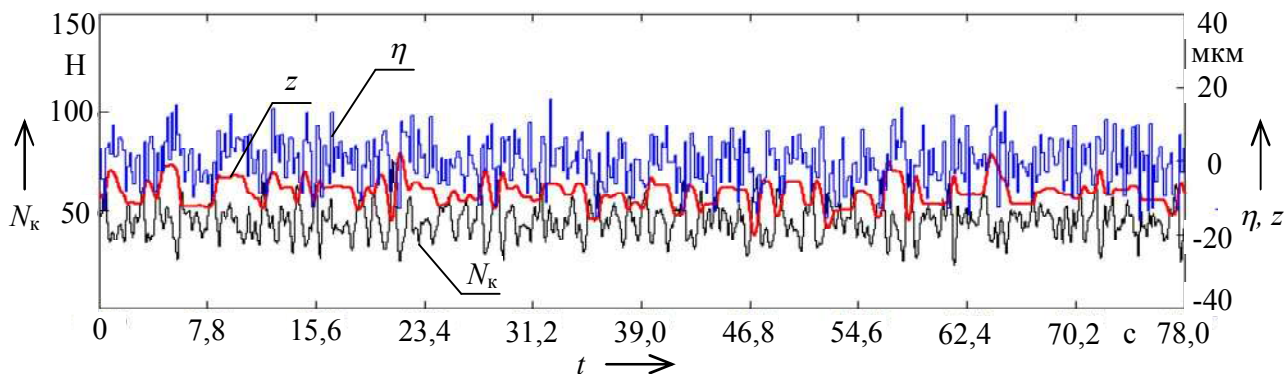


Рисунок 3 – Пример расчетных временных диаграмм с параметрами ТЭД № 2 для третьего этапа численного эксперимента

Для четвертого этапа численного эксперимента по параметрам ТЭД № 1 – 3 сформированы по 30 вариантов профилей коллектора, у которых учтены только заданные в таблице 1 параметры $A_1 - A_5$, а параметр $\sigma_{\Delta h} = 0$. Для данных профилей значения $A_1 - A_5$ умножены на одинаковый коэффициент, подобранный таким образом, чтобы расчетное значение биения δ оказалось равным заданному в таблице 1 значению биения δ .

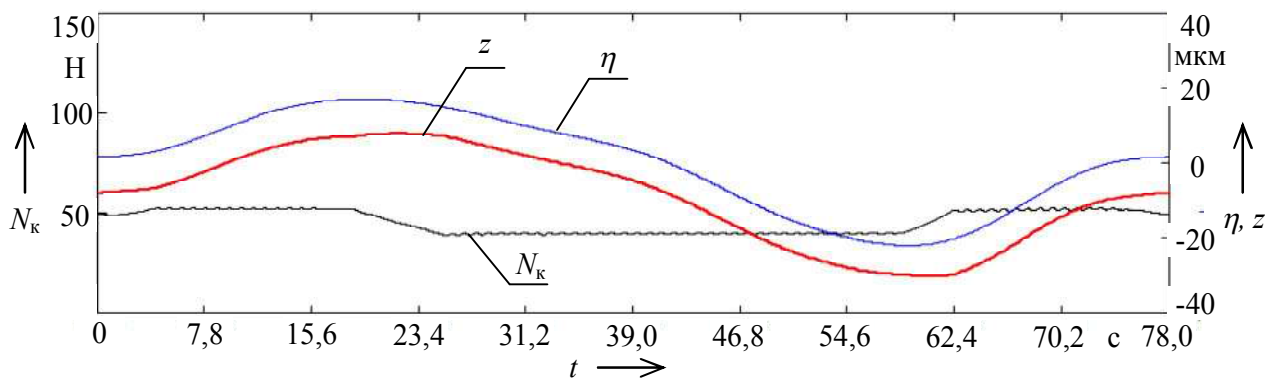


Рисунок 4 – Пример расчетных временных диаграмм с параметрами ТЭД № 2 для четвертого этапа численного эксперимента

С целью численной оценки качества контактирования щетки с поверхностью коллектора предложено использовать коэффициент неустойчивости щеточного контакта, который рассчитан для каждого сформированного профиля по выражению:

$$k_{н.у} = \frac{\sigma_{N_k}}{N_{к. ср}}, \quad (4)$$

где σ_{N_k} – СКО силы упругого взаимодействия щетки с коллектором, Н;

$N_{к. ср}$ – среднее значение силы упругого взаимодействия щетки с коллектором, равное силе нажатия курка щеткодержателя на щетку N_p , Н.

По полученным по выражению (4) тридцати значениям коэффициента неустойчивости контакта рассчитаны их средние значения и средние квадратические отклонения σ_k , приведенные в таблице 2.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Результаты расчета диагностических параметров профиля коллектора ТЭД, характеризующих устойчивость щеточного контакта

Параметры, учитываемые при математическом моделировании	ТЭД № 1		ТЭД № 2		ТЭД № 3	
	$k_{н.у}$	$\sigma_k, Н$	$k_{н.у}$	$\sigma_k, Н$	$k_{н.у}$	$\sigma_k, Н$
Перепады высоты ламелей и первой – пятой гармоник	0,217	0,014	0,201	0,015	0,136	0,006
Перепады высоты ламелей без учета первой – пятой гармоник (с пониженным биением)	0,221	0,017	0,199	0,014	0,135	0,006
Первая – пятая гармоники без учета перепадов высоты ламелей (с пониженным биением)	0,106	0,005	0,124	0,006	0,102	0,006
Первая – пятая гармоники без учета перепадов высоты ламелей (с повышающим коэффициентом до заданного биения)	0,122	0,004	0,129	0,004	0,118	0,005

В результате математической обработки профилей коллекторов ТЭД ЭК810Ч магистральных электровазов 2ЭС6 получены значения диагностических параметров, характеризующих техническое состояние поверхности коллектора. Проведен четырехэтапный численный эксперимент, заключающийся в оценке влияния первой – пятой гармоник функции профиля коллектора $A_1 – A_5$ и СКО перепадов между соседними ламелями $\sigma_{\Delta h}$ на силу упругого взаимодействия щетки с коллектором N_k . Определены значения предложенного коэффициента неустойчивости щеточного контакта $k_{н.у}$. Анализ результатов численного эксперимента показал, что коэффициент неустойчивости контакта $k_{н.у}$ в значительной степени определяется величиной СКО перепадов ламелей $\sigma_{\Delta h}$ и в малой степени зависит от значений амплитуд гармоник $A_1 – A_5$. При малых значениях перепадов ламелей $\sigma_{\Delta h}$ гармонический состав профиля коллектора практически не влияет на значение $k_{н.у}$.

Результаты проведенных исследований подтвердили, что при оценке качества ремонта коллекторов ТЭД целесообразно дополнительно к контролируемому в настоящее время значению биения осуществлять расчет СКО перепадов ламелей и предлагаемого коэффициента неустойчивости щеточного контакта, что позволяет повысить достоверность диагностирования технического состояния коллектора ТЭД магистральных электровазов.

Список литературы

1. Авилов, В. Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока / В. Д. Авилов. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 237 с. – Текст : непосредственный.
2. Авилов, В. Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока / В. Д. Авилов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – 356 с. – Текст : непосредственный.
3. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока / В. В. Харламов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2002. – 233 с. – Текст : непосредственный.

4. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года. «Белая книга». – Москва, 2018. – Текст : электронный. – URL: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (дата обращения: 08.02.2022).

5. Харламов, В. В. Разработка способа прогнозирования остаточного ресурса электрощеток тяговых электродвигателей / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 182–190.

6. Харламов, В. В. Разработка методов и средств прогнозирования остаточного ресурса электрощеток с применением данных мониторинга режимов работы двигателей / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков. – Омск : Омский научный вестник, 2021. – 168 с. – Текст : непосредственный.

7. Совершенствование технологии диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей электропоездов / П. К. Шкодун, В. В. Харламов, Д. А. Ахунов, А. В. Долгова. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – 198 с. – Текст : непосредственный.

8. Ахунов, Д. А. Совершенствование методов оценки технического состояния коллектора электрических машин постоянного тока : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ахунов Данил Асгатович ; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2013. – 21 с. – Текст : непосредственный.

9. Харламов, В. В. Совершенствование процесса диагностирования профиля коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов, А. С. Хлопцов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2013. – № 1 (13). – С. 42–48.

10. Шкодун, П. К. Разработка комплекса диагностических параметров оценки технического состояния тяговых электродвигателей подвижного состава / П. К. Шкодун. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 56–65.

11. Харламов, В. В. Формирование эффективного множества диагностических параметров для контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей в условиях неидентичности коммутационных циклов / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. П. Афонин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2012. – № 4 (12). – С. 69–75.

References

1. Avilov V.D. *Metody analiza i nastrojki kommutacii mashin postoyannogo toka* [Methods of analysis and tuning of switching DC machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995, 237 p.

2. Avilov V.D. *Optimizaciya kommutacionnogo processa v kollektornyh elektricheskikh mashinah postoyannogo toka* [Optimization of the switching process in DC collector electric machines]. Omsk, OSTU publ., 2013, 356 p.

3. Kharlamov V.V. *Metody i sredstva diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovyh elektrodvigatелеj i drugih kollektornyh mashin postoyannogo toka* [Methods and means of diagnosing the technical condition of the collector-brush assembly of traction electric motors and other DC collector machines]. Omsk, OSTU publ., 2002, 233 p.

4. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya holdinga "RZHD" na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga)* [The strategy of scientific and technological development of the holding «Russian Railways» for the period until 2025 and for the future until 2030 «White paper»]. Available at: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (accessed: 08.02.2022).

5. Kharlamov V.V., Popov D.I., Bajsadykov M.F. *Razrabotka sposoba prognozirovaniya ostatocnogo resursa elektroshchetok tyagovyh elektrodvigatелеj* [Development of a method for predicting

the residual life of electric brushes of traction motors]. *Izvestiia TPU*, 1967, vol. 332, no. 7, pp. 182-190 (In Russian).

6. Kharlamov V.V., Popov D.I., Bajsadykov M.F. *Razrabotka metodov i sredstv prognozirovaniya ostatochnogo resursa elektroshchetok s primeneniem dannyh monitoringa rezhimov raboty dvigatelej* [Development of methods and tools for predicting the residual life of electric brushes using data from monitoring engine operating modes]. Omsk, OSTU publ., 2021, 168 p.

7. Shkodun P.K., Kharlamov V.V., Ahunov D.A., Dolgova A.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigatelej elektrovozov* [Improving the technology for diagnosing the technical condition of the collector-brush unit of traction electric motors of electric locomotives]. Omsk, OSTU publ., 2013, 198 p.

8. Akhunov D.A. *Sovershenstvovanie metodov ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya kollektora elektricheskikh mashin postoyannogo toka* [Improvement of methods for assessing the technical condition of the collector of direct current electric machines]. Doctor's abstract thesis, Omsk, OSTU, 2013, 21 p. (In Russian).

9. Kharlamov V.V. *Sovershenstvovanie processa diagnostirovaniya profilya kollektora tyagovykh elektrodvigatelej s pomoshch'yu pribora PKP-4M* [Improving the process of diagnosing the profile of the collector of traction motors using the PKP-4M device]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 1 (13), pp. 42-48 (In Russian).

10. Shkodun P.K. *Razrabotka kompleksa diagnosticheskikh parametrov ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya tyagovykh elektrodvigatelej podvizhnogo sostava* [Development of a set of diagnostic parameters for assessing the technical condition of rolling stock traction electric motors]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 4 (44), pp. 56-65 (In Russian).

11. Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Afonin A.P. *Formirovanie effektivnogo mnozhestva diagnosticheskikh parametrov dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigatelej v usloviyakh neidentichnosti kommutatsionnykh tsiklov* [Formation of an effective set of diagnostic parameters for monitoring the technical condition of the collector-brush unit of traction motors in conditions of non-identical switching cycles]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 4 (12), pp. 69-75 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Шкодун Павел Константинович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Viktor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, head of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Shkodun Pavel Konstantinovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Попов Денис Игоревич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОМГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электрические машины и общая электротехника»,
ОМГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federa-
tion.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the de-
partment «Electrical machines and general electrical engi-
neering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Исследование влияния техниче-
ского состояния профиля коллектора на качество ра-
боты коллекторно-щеточного узла тяговых электро-
двигателей подвижного состава / В. В. Харламов,
П. К. Шкодун, Д. И. Попов. – Текст : непосредствен-
ный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). –
С. 2 – 11.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Popov D.I. Study
of the collector profile technical condition influence on
the performance of the collector-brush assembly of rolling
stock traction electric motors. Journal of Transsib Railway
Studies, 2022, no. 1 (49), pp. 2-11 (In Russian).

УДК 621.436

С. А. Петухов, А. Д. Росляков, Л. С. Курманова, М. Ю. Карпенко

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ эффективности автоматизированных систем регистрации параметров работы автономных локомотивов. Актуальность применения таких систем обусловлена предотвращением дефектов на этапе выявления возможных неисправностей в процессе эксплуатации локомотивов в межремонтные периоды. Поэтому рассмотрены применяемые системы параметрической диагностики энергетических установок автономных локомотивов. Также для сравнения представлен опыт зарубежных исследований по применению системы мониторинга тепловозов. Несмотря на то, что существующие автоматизированные системы регистрации параметров работы тепловозов имеют широкий функционал, позволяющий получить типовые зависимости мощности дизель-генераторной установки (ДГУ) от температуры и давления, эти системы не учитывают особенности протекания внутрицилиндровых процессов, которые могут существенно влиять на мощность ДГУ. В статье предложен способ контроля и настройки мощности ДГУ в процессе эксплуатации путем регистрации режимов работы оборудования и определения фактической мощности дизеля за счет расширения номенклатуры диагностических параметров с помощью установки дополнительных датчиков регистрации измеряемых величин для точности контроля и настройки ДГУ и принятия своевременных решений по техническому обслуживанию и ремонту тепловозов. Показаны структурная схема регистратора режимов работы с расположением датчиков для измерения информативных параметров и схема подключения регистратора к силовой цепи на примере маневрового тепловоза ЧМЭЗ. Разработано программное обеспечение, которое может быть дополнительно установлено в штатную автоматизированную систему регистрации параметров работы тепловоза ЧМЭЗ с последующей обработкой данных.

Ключевые слова: дизель-генераторная установка, тепловоз, режимы работы, система диагностики, удельный расход топлива, внутрицилиндровые параметры.

Sergei A. Petukhov, Alexey D. Roslyakov, Leila S. Kurmanova, Mikhail Y. Karpenko

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

IMPROVEMENT THE AUTOMATED SYSTEMS FOR AUTONOMOUS LOCOMOTIVES WORK PARAMETERS RECORDING

Abstract. The article presents a comparative analysis of the effectiveness of automated systems for recording the work parameters of autonomous locomotives. The relevance of the use of such systems is due to the prevention of defects at the stage of identifying possible malfunctions during the operation of locomotives during the inter-repair periods. So the used systems of parametric diagnostics of power plants of autonomous locomotives are considered. Also, for comparison, the experience of foreign research on the use of a diesel locomotive monitoring system is presented. Despite the fact that the existing automated systems for registering the parameters of diesel locomotives have a wide range of functionality that allows you to obtain typical dependences of the power of a diesel generator set (DSU) on temperature and pressure, these systems do not take into account the peculiarities of the flow of in-cylinder processes that can significantly affect the power of the DSU. The article proposes a method for monitoring and adjusting the power of the diesel engine during operation by registering the operating modes of the equipment and determining the actual power of the diesel engine by expanding the range of diagnostic parameters by installing additional sensors for registering measured values for the accuracy of monitoring and tuning the diesel engine and making timely decisions on maintenance and repair of locomotives. A block diagram of the recorder of operating modes with the location of sensors for measuring informative parameters and a diagram of connecting the recorder to the power circuit using the example of a shunting diesel locomotive CHME3 is shown. Software has been developed that can be additionally installed in the standard automated system for registering the parameters of the operation of the CHME3 diesel locomotive with subsequent data processing.

Keywords: diesel generator set, diesel locomotive, operating modes, diagnostic system, specific fuel consumption, in-cylinder parameters.

На сегодняшний день необходимость появления и развития систем диагностики автономных локомотивов обусловлена нынешним состоянием современных условий их эксплуатации, которая характеризуется превышением установленного срока службы. Многочисленные результаты исследований доказывают, что в качестве профилактических мер для предотвращения дефектов целесообразнее проводить ремонт на этапе выявления возможной неисправности, осуществляя параметрическую диагностику в процессе эксплуатации [1].

Статистический анализ основных причин unplanned ремонтов тепловозов показывает, что значительная доля случаев приходится на дизель-генераторную установку (ДГУ) и составляет 30 %. Также необходимо отметить, что значительная доля отказов и неисправностей ДГУ выявляется в межремонтные периоды [1, 2].

Устойчивая и надежная работа энергетической установки автономных локомотивов напрямую влияет на эффективность их эксплуатации. В настоящее время технологический уровень подготовки современного цифрового производства способствует созданию ряда надежных и экономически целесообразных автоматизированных систем регистрации параметров работы локомотивов, способных собирать и анализировать информацию с борта автономного локомотива как в процессе объема обязательных работ при техническом обслуживании и ремонте, так и в процессе эксплуатации (рисунок 1).

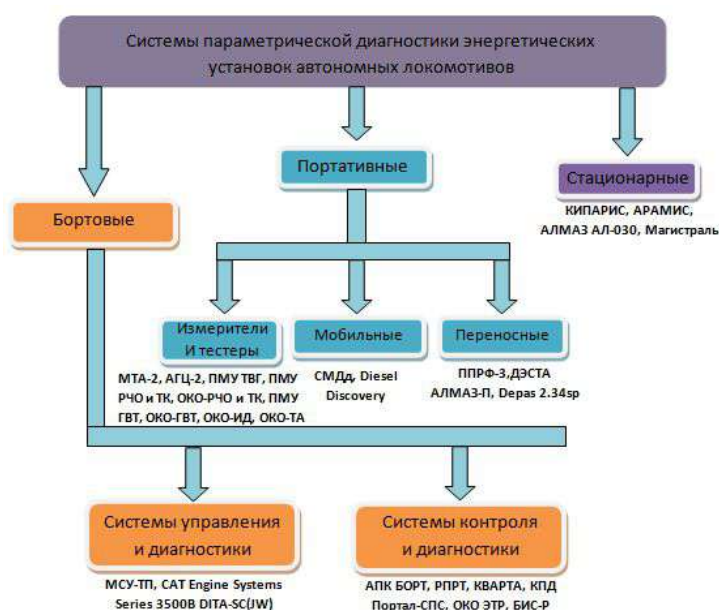


Рисунок 1 – Применяемые системы параметрической диагностики энергетических установок автономных локомотивов

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

У существующих систем параметрической диагностики имеется широкий функционал, который позволяет оценивать уровень текущего технического состояния энергетических установок автономных локомотивов, а также их основных систем и сборочных единиц с последующим принятием корректирующих действий в соответствии с правилами, установленными нормативно-технической документацией.

К основным операциям систем параметрической диагностики относятся регистрация, обработка, оформление, накопление и хранение данных с последующей передачей их посредством канала GPRS.

С учетом огромного массива данных, который обрабатывается с помощью диагностических систем, и того количества датчиков, которое установлено на борту локомотива, становится возможным совершенствование системы регистрации и параметров работы без существенного увеличения и удорожания оборудования локомотива.

Значительный опыт по применению систем параметрической диагностики с целью мониторинга технического состояния автономных локомотивов имеется у американской компании General Electric Transportation (GE) [2].

В процессе эксплуатации тепловозов бортовая система диагностики Bright Star производит сбор и анализ данных о работе локомотивов на основе порядка 250 измеряемых параметров. Технический и экономический эффекты от применения данной бортовой системы диагностики достигаются с помощью комплексного подхода, который включает в себя контроль основных процессов энергетических установок, сокращение аварийных ситуаций, уменьшение потерь и всевозможных задержек (рисунок 2).

Система мониторинга позволяет сократить вдвое повторные заходы на ремонт, обнаружить неисправности на ранней стадии их возникновения и сократить время непроизводительных простоев.

Подобные системы мониторинга создаются большинством зарубежных локомотивных компаний.

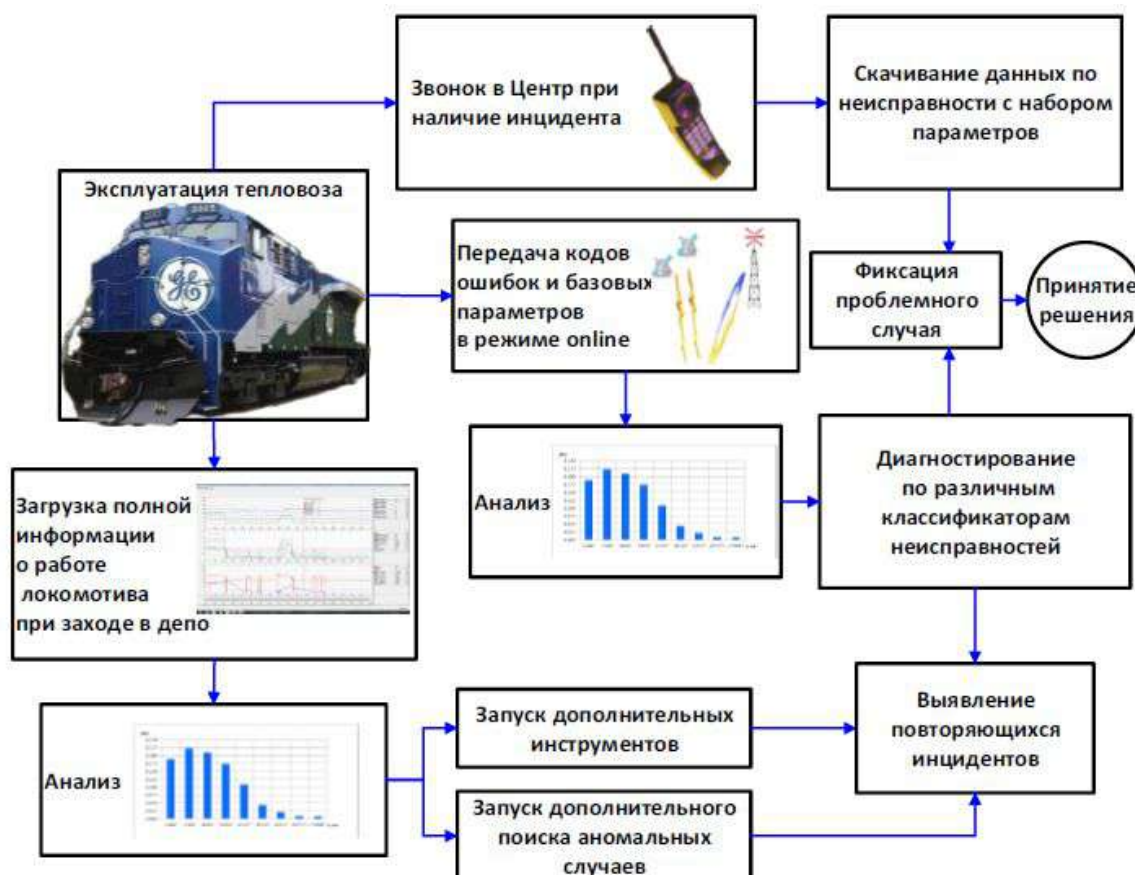


Рисунок 2 – Концепция мониторинга автономных локомотивов компании General Electric

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Несмотря на значительный опыт зарубежных исследований, на отечественном железнодорожном транспорте имеется большой научно-технический задел, позволяющий создавать автоматизированные системы регистрации параметров работы автономных локомотивов (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристика некоторых распространенных автоматизированных систем регистрации параметров работы автономных локомотивов и учета дизельного топлива

Наименование характеристики	Вид автоматизированной системы регистрации параметров работы		
	АСК-ВИС-2ВК [3]	АПК «Борт» [4]	«РПРТ» [5]
Измеряемые и контролируемые параметры:			
- напряжение ТГ	+	+	+
- ток ТГ	+	+	+
- частота вращения коленчатого вала дизеля	+	+	+
- масса топлива	+	+	+
- объем топлива	+	+	+
- давление топлива	+	+	+
- плотность топлива	+	+	+
- давление масла	+	+	+
- давление воздуха	+	-	+
- температура воды	+	+	+
- температура топлива	+	+	+
- температура масла	+	+	+
- давление в коллекторе турбонаддува	+	+	+
- скорость тепловоза	+	+	-
- позиция контроллера машиниста	+	+	+
Функциональные возможности	Позволяет осуществлять измерение и запись регистрируемых параметров с обеспечением их хранения, передачи по радиоканалу (GPRS), а также осуществление самодиагностики модулей	Позволяет осуществлять диагностирование и управление теплотехническим состоянием ДГУ тепловозов	Позволяет регистрировать параметры работы тепловоза и осуществлять автоматическое измерение топлива, а также сравнивать фактический расход топлива с расчетными значениями для выполнения одинаковой работы за смену
Недостатки	Отсутствует возможность контроля протекания внутрицилиндровых процессов, учета влияния скоростного напора воздуха и атмосферных условий		

Так, например, АПК «Борт», разработанный ОАО «НИИТКД» (г. Омск), позволяет обнаружить несанкционированные сливы топлива, оценить состояние систем тепловоза как в режиме реального времени, так и при анализе накопленных данных, объективно нормировать расход топлива, отслеживать пробег тепловоза, горячего простоя, заглушенного состояния, работы тягового генератора.

Регистратор параметров работы тепловоза «РПРТ», разработанный совместными усилиями сотрудников ЗАО «ОЦВ» и АО «ВНИИЖТ», позволяет осуществлять автоматизированный сбор, регистрацию и обработку информации о работе тепловоза с целью контроля, учета и анализа расхода топлива тепловозом в эксплуатации.

Еще одна система регистрации параметров автономных локомотивов – АСК-ВИС – аналог АПК «Борт» – разработана компанией «СпецАвтоИнжиниринг». Имеется положительный опыт использования диагностических данных при эксплуатации тепловозов 2ТЭ116 на полигоне Октябрьской железной дороги. АСК-ВИС осуществляет запись более 40 регистрируемых параметров с последующим их хранением около 30 суток. Также в функциональные возможности системы АСК-ВИС входит передача данных по радиоканалу GPRS на сервер единой системы мониторинга и самодиагностики модулей.

Несмотря на многообразие решаемых задач, применяемые автоматизированные системы регистрации режимов работы автономных локомотивов имеют следующий набор функций [6 – 9]:

- 1) опрос датчиков локомотива;
- 2) воздействие на локомотивные цепи;
- 3) визуализация информации;
- 4) аналитика и управление;
- 5) хранение информации;
- 6) передача информации на персональный компьютер;
- 7) обработка информации на рабочем месте;
- 8) централизованное хранение диагностической информации.

Проводя анализ имеющейся информации, можно сделать вывод о том, что существующие автоматизированные системы регистрации параметров работы автономных локомотивов не позволяют контролировать протекание внутрицилиндровых процессов и не учитывают влияние скоростного напора воздуха и атмосферных условий.

Необходимо отметить, что тепловозные дизели работают при непрерывно изменяющихся атмосферных условиях, причем изменения могут происходить как в течение одной поездки, так и при смене сезона эксплуатации. Существенно изменяется температура воздуха на всасывании в компрессор, в меньшей степени меняется атмосферное давление. Как понижение атмосферного давления, так и повышение температуры и относительной влажности приводят к уменьшению воздушного заряда и коэффициента избытка воздуха, а цикловая подача топлива, определяемая постоянным положением регулирующего органа, сохраняется неизменной. Уменьшение коэффициента избытка воздуха на режимах номинальной мощности и близких к нему приводит к падению индикаторного КПД дизеля [11].

Эксплуатация дизелей, например, в условиях отрицательных температур имеет особую специфику. Прежде всего обращает на себя внимание интенсификация процесса сгорания в дизеле. На рисунке 3 представлены индикаторные показатели дизеля с непосредственным впрыскиванием 6Ч 10/18 (Д6) при полных нагрузках для различных температур окружающей среды t_a . Как видно из индикаторных диаграмм (рисунок 3, а), чем ниже температура окружающей среды t_a , тем круче идет нарастание давления в процесс сгорания и максимум давления достигается раньше относительно верхней мертвой точки (ВМТ). В дизеле максимальное давление сгорания $P_{\max}$ и скорость его нарастания при температуре воздуха -40°C (233 K) принимают критические значения. В частности, в диапазоне температур воздуха от $+20$ до -40°C $P_{\max}$ возросло с 5,88 до 11 МПа, а величина $\Delta p/\Delta \alpha$ увеличилась с 1 до 2,95 МПа/град (рисунок 3, в).

Таким образом, в связи с изложенным теоретическим материалом одним из направлений решения данного вопроса является разработка методов и средств, позволяющих проводить оценку технического состояния ДГУ в условиях эксплуатации при отклонениях основных параметров ее работы, еще не приведших к ухудшению эксплуатационных показателей, но требующих принятия определенных мер.

При проведении реостатных испытаний на территории сервисных локомотивных депо заключение о годности к эксплуатации оформляется при соответствии ряда параметров техническим нормам, в том числе мощности ДГУ, которая, как правило, снимается с графиков зависимости мощности от температуры и давления. Следует отметить, что техническое состояние ДГУ соответствует техническим нормам только для тех условий, при которых проходили испытания.

Таким образом, для совершенствования существующих автоматизированных систем регистрации параметров работы автономных локомотивов необходимо произвести следующее.

1. Основываясь на детализации диагностических показателей текущего состояния дизеля, необходимо определить наиболее информативные из них, после чего требуется определить приоритетные параметры исходя из критериев информационной и универсальной составляющих.

2. На данном этапе необходимо определить наиболее важные параметры системы и обосновать их выбор.

3. Получить значения параметров с помощью средств диагностирования и контроля непосредственно с ДГУ тепловоза.

4. Так как надежность и ресурс, энергетические и экологические показатели тепловоза подвергаются изменениям в процессе эксплуатации, необходимо определить момент изменения технического состояния ДГУ тепловоза с использованием аппаратных средств.

5. Обеспечить безотказную и эффективную работу автономных локомотивов с сохранением ресурса и надежности на весь межремонтный период.

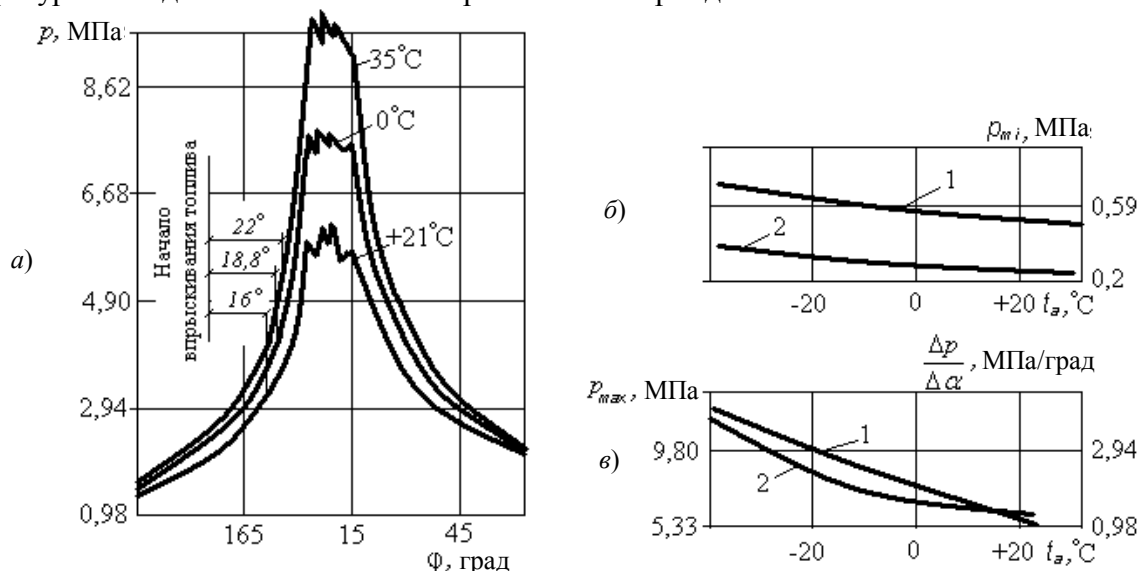


Рисунок 3 – Индикаторные показатели дизеля 6Ч 15/18:

a – зависимость текущего давления в цилиндре двигателя p от температуры окружающего воздуха t_a и угла поворота коленчатого вала ϕ ; $б$ – зависимость среднего индикаторного давления p_{mi} от температуры окружающего воздуха; $в$ – зависимость максимального давления сгорания P_{max} и скорости его нарастания $\Delta p/\Delta \alpha$ от температуры окружающего воздуха: для б: 1 и 2 – 100 и 50 % нагрузки; для в: 1 – P_{max} ; 2 – $\Delta p/\Delta \alpha$

Для реализации способа оценки технического состояния ДГУ тепловоза с учетом климатических условий разработан и защищен охранным документом регистратор режимов работы. Структурная схема регистратора приведена на рисунке 4.

Функционирование регистратора режимов работы ДГУ осуществляется следующим образом.

В процессе эксплуатации тепловоза в микроконтроллер-микросхему через аналого-цифровой преобразователь и дифференциальные усилители непрерывно поступают аналоговые сигналы по току и напряжению главного генератора, сигналы по скорости движения тепловоза и сигналы, соответствующие той или иной позиции контроллера машиниста.

Согласно схеме подключения регистратора режимов работы к силовой цепи маневрового тепловоза ЧМЭЗ, приведенной на рисунке 5, значения напряжений главного генератора фиксируются на клеммах резистора, расположенного в цепи катушек напряжения дифференциального реле. Значения тока главного генератора фиксируются на клеммах амперметра. Значения скорости тепловоза фиксируются генератором постоянного тока, который устанавливается на корпус буксового узла первой колесной пары. Положения рукоятки контроллера машиниста фиксируются датчиками, которые устанавливаются на главной рукоятке контроллера с храповым механизмом.

Данные, поступившие в память Data Flash регистратора, фиксируются и подвергаются обработке в конце рабочей смены. Таким образом, выявленные значения устанавливают причинно-следственную связь, в результате которой снижается мощность тягового генератора во

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

время эксплуатации, и сигнализируют о необходимости проведения мер по настройке характеристики ДГУ.

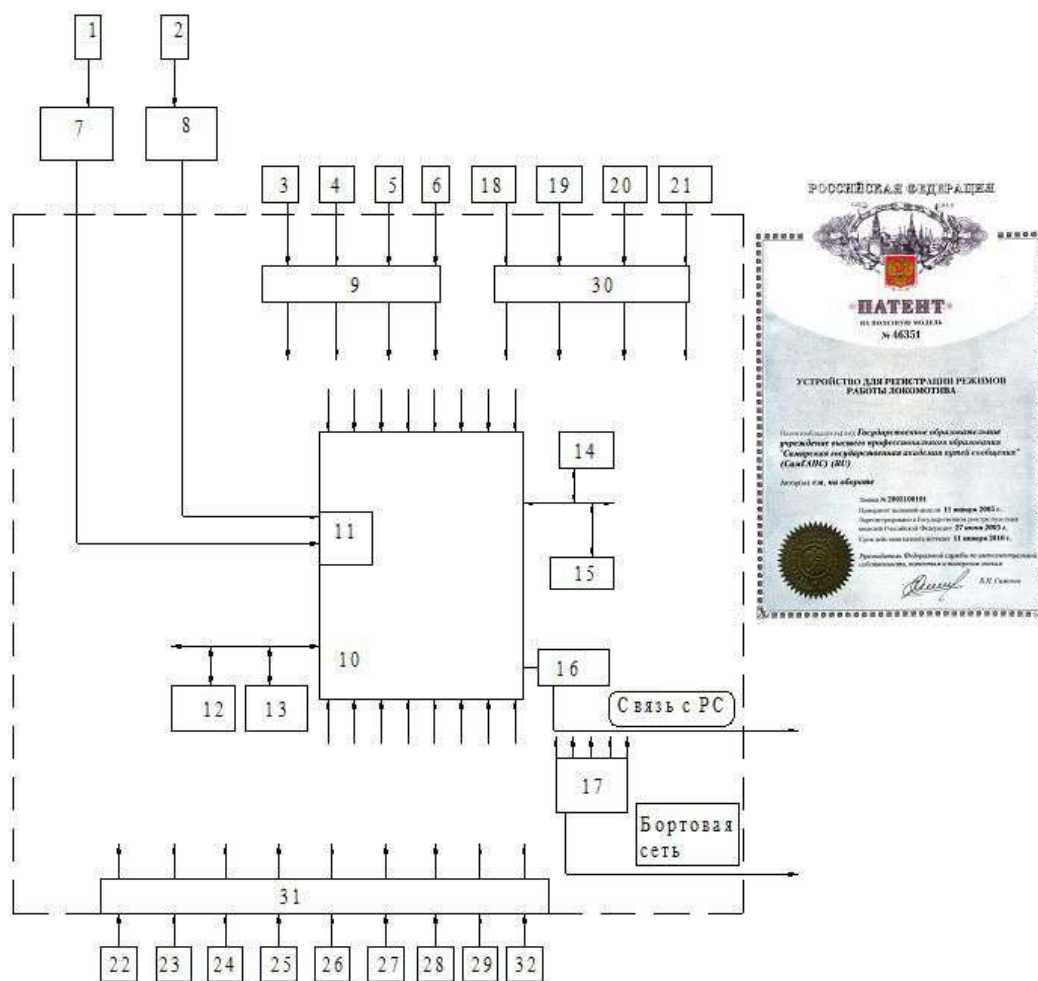


Рисунок 4 – Структурная схема регистратора режимов работы энергетических установок автономных локомотивов: 1–датчик аналогового сигнала по току (I_T); 2 – датчики аналогового сигнала по напряжению (U_T); 3, 4, 5, 6 – датчики, входящие в блок релейных сигналов; 7, 8 – усилители; 9 – адаптер; 10 – микроконтроллер-микросхема; 11 – аналого-цифровой преобразователь; 12 – часы; 13 – карта памяти; 14 – монитор; 15 – клавиатура; 16 – коммуникационный порт; 17 – источник питания; 18 – датчик частоты вращения коленчатого вала дизеля (n_d); 19 – датчик частоты вращения ротора турбокомпрессора (n_{TK}); 20 – датчик расхода топлива на выходе из топливного бака (G_T); 21 – датчик расхода топлива на входе в топливный бак (G_{T_1}); 22 – датчик температуры топлива в топливном баке ($t_{топл}$); 23 – датчик температуры воздуха на входе в компрессор турбокомпрессора ($t_{воз}$); 24 – датчик давления воздуха на входе в компрессор турбокомпрессора ($P_{воз}$); 25 – датчик перепада давления дроссельной шайбы расходомера (ΔP); 26 – датчик температуры в выпускном коллекторе (t_v); 27 – датчик давления в выпускном коллекторе (P_v); 28 – датчик температуры отработавших газов в выпускном коллекторе ($t_{o.r}$); 29 – датчик давления отработавших газов в выпускном коллекторе ($P_{o.r}$); 30 – преобразователь частоты; 31 – аналого-цифровой преобразователь; 32 – датчик давления газов в цилиндрах (P_z , P_c)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

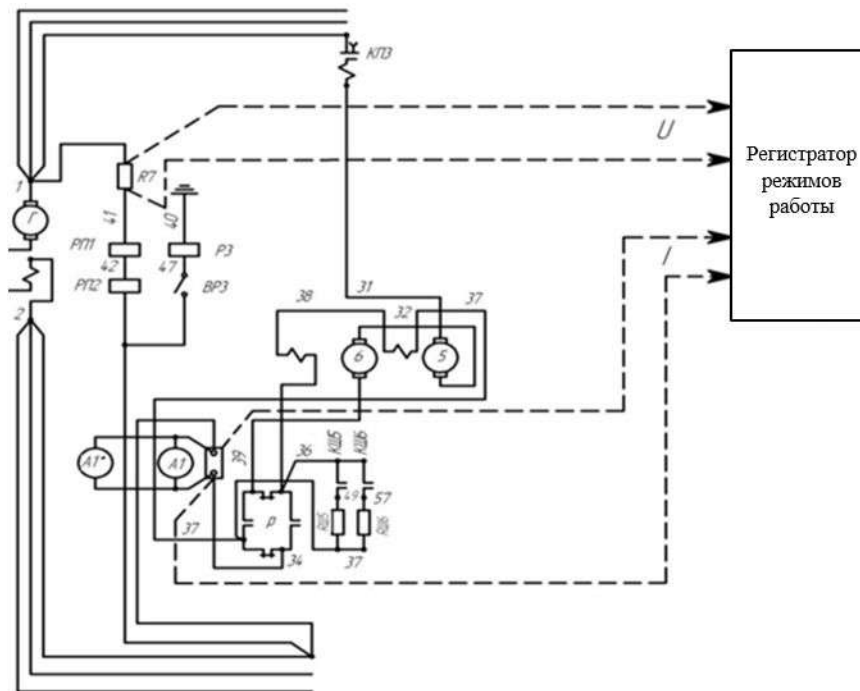


Рисунок 5 – Схема подключения регистратора режимов работы к силовой цепи маневрового тепловоза ЧМЭЗ [10]

На кафедре «Локомотивы» ФГБОУ ВО «СамГУПС» разработан и защищен охранным документом программный комплекс для обработки данных, поступающих с регистратора режимов работы ДГУ тепловоза в процессе испытаний (рисунок 6).

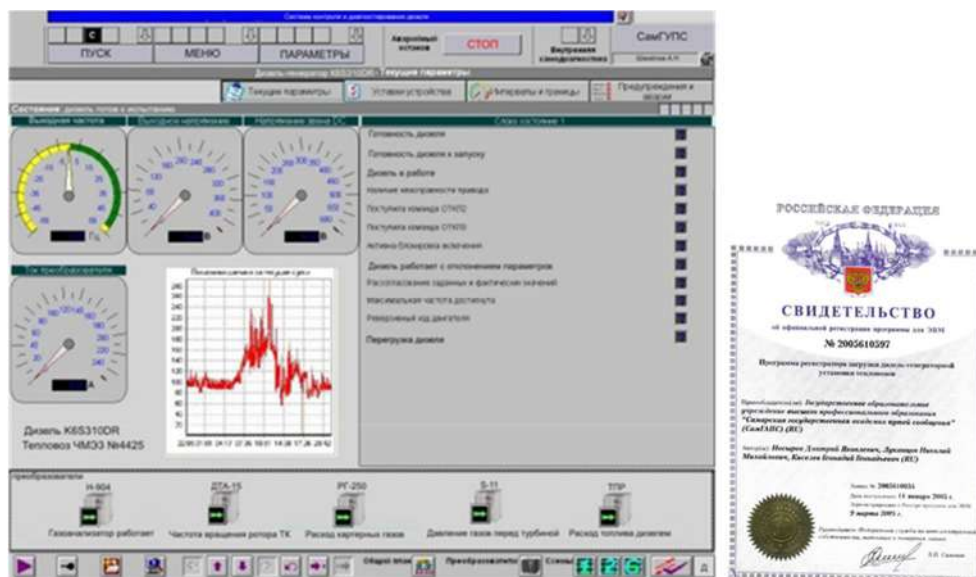


Рисунок 6 – Окно программного комплекса системы регистрации параметров работы ДГУ тепловоза

Для режима номинальной мощности современных тепловозных двигателей с турбокомпрессорным наддувом и охлаждением воздуха после компрессора приведение максимальной (нормальной) мощности к нормальным атмосферным условиям производится согласно диагностической модели, которая учитывает изменение эффективной мощности и удельного эффективного расхода топлива (при постоянной цикловой подаче топлива) в зависимости от температуры и давления окружающей среды.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Приведение максимальной мощности к нормальным атмосферным условиям рекомендуется производить по формуле [11]:

$$N_{e0} = N_{eh}/\alpha_0, \quad (1)$$

где N_{eh} – мощность, замеренная при испытаниях в данных атмосферных условиях;

α_0 – коэффициент пересчета мощности;

N_{e0} – мощность на номинальном режиме.

Коэффициент пересчета мощности определяется по выражению:

$$\alpha_0 = \kappa - 0,7(1 - \kappa) \left(\frac{1}{\eta_{mo}} - 1 \right), \quad (2)$$

где κ – коэффициент, учитывающий изменение индикаторной мощности;

η_{mo} – механический КПД.

Коэффициент « κ » равен отношению индикаторной мощности при условиях окружающей среды, отличающихся от нормальных, к индикаторной мощности при нормальных значениях атмосферного давления P_0 и температуры T_0 и определяется по формуле:

$$\kappa = \left(\frac{B-p_n}{P_0} \right)^{m_0} \left(\frac{T_0}{T_h} \right)^{n_0} \left(\frac{T_{\omega 0}}{T_{\omega h}} \right)^q, \quad (3)$$

где $p_n = \varphi_v \cdot p_{нас}$ – парциальное давление водяных паров при данной температуре окружающей среды T_h ;

φ_v – относительная влажность воздуха;

$p_{нас}$ – давление насыщения водяных паров при данном барометрическом давлении P_0 ;

m_0, n_0, q – экспериментальные коэффициенты (определяются по таблице 2);

$T_{\omega 0}, T_{\omega h}$ – абсолютные значения температуры окружающей среды (воды) на входе в воздухоохладитель.

Таблица 2 – Определение экспериментальных коэффициентов в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Коэффициент избытка воздуха α	Показатели		
	m_0	n_0	q
Более 2,1	0,1	$0,20(1 - 0,5 \eta_{то})$	$0,2 \eta_{то}$
1,7 – 2,1	0,1	$0,35(1 - 0,5 \eta_{то})$	$0,3 \eta_{то}$
Менее 1,7	0,3	$0,55(1 - 0,5 \eta_{то})$	$0,6 \eta_{то}$

Из формулы (3) видно, что на изменение индикаторной мощности четырехтактных дизелей в большей мере влияет температура воздуха, нежели давление. Так, при изменении атмосферного давления на 20 % индикаторная мощность меняется на 13 %, в то же время при одинаковом относительном изменении температуры индикаторная мощность изменяется на 44 % (при отсутствии охлаждения воздуха после компрессора) и на 24 % при наличии промежуточного охлаждения воздуха.

Программный комплекс позволяет выполнить следующие функции:

- измерение параметров (тока, напряжения тягового генератора) и их трансляцию на монитор в режиме реального времени с последующим построением зависимостей;
- проведение процедуры обкатки дизеля в широком диапазоне нагрузок;
- измерение параметров в установившихся режимах работы;
- получение графиков и отчетов по итогам испытаний;
- ведение единой информационной базы данных испытаний.

Таким образом, типовые зависимости мощности дизель-генераторной установки от температуры и давления не учитывают особенности протекания внутрицилиндровых процессов, которые могут существенно влиять на мощность. Поэтому целесообразно норму на мощность при изменении условий эксплуатации определять по зависимостям (1) – (3) и с учетом экспериментальных коэффициентов, указанных в таблице 2.

Установка датчиков в силовой схеме тепловоза, входящих в состав регистратора режимов работы, позволит повысить точность контроля на 2 – 3 %, точность настройки ДГУ – на 2 – 3 %, тем самым получить комплексную оценку технического состояния ДГУ и принять своевременные решения по профилактическим мерам обслуживания или ремонта. Система позволит также обеспечить снижение удельного расхода топлива в эксплуатации на 2 – 5 % за счет учета влияния скоростного напора воздуха и атмосферных условий.

Список литературы

1. Лакин, И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лакин Игорь Игоревич ; Московский гос. ун-т путей сообщения императора Николая II. – Москва, 2016. – 195 с. – Текст : непосредственный.
2. Hedlund, Eric. Apparatus and Method for Performance and Fault Analysis. Патент США WO 01/31450 / HEDLUND Eric, RODDY Nicholas, GIBSON David, BLILEY Richard. – США: General Electric Company, 2001 – 58 с. – Текст : непосредственный.
3. Система измерительная для автоматизированного контроля параметров тепловоза (АСК-ВИС-2ВК) : Руководство по эксплуатации РЭ 002-01-2009. – Химки : ТехноВИС, 2009. – 22 с. – Текст : непосредственный.
4. Системы топливоизмерительные аппаратно-программного комплекса БОРТ. Приложение к свидетельству № 65521 об утверждении типа средств измерений // docplayer.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://docplayer.com/59733160-Sistemy-toplivoizmeritelnye-apparatno-programmnogo-kompleksa-bort.html> (дата обращения: 24.03.2022).
5. Регистратор параметров работы тепловоза (РПРТ) : Руководство по эксплуатации КНГМ.421429.004 РЭ // avpt.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://avpt.ru/upload/RE_RPRT.pdf (дата обращения: 24.03.2022).
6. Оценка эффективности работы дизель-генераторных установок по результатам контроля параметров при проведении реостатных испытаний / А. К. Белоглазов, В. Ф. Тарута, В. А. Четвергов, А. В. Чулков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 2 (30). – С. 2–8.
7. Киселев, Г. Г. Повышение топливной экономичности и эффективности эксплуатации дизель-генераторных установок тепловозов на основе контроля теплоэнергетических параметров : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Киселев Геннадий Геннадьевич ; Самарская гос. акад. путей сообщения. – Самара, 2005. – 188 с. – Текст : непосредственный.
8. Петухов, Ю. А. Совершенствование методов контроля расхода топлива на маневровые и хозяйственные работы с использованием бортовых систем / Ю. А. Петухов, Е. И. Сковородников, Д. Э. Тиссен. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2013. – № 3 (15). – С. 61–66.
9. Лобанов, И. А. Повышение эксплуатационной эффективности тепловозных дизелей применением средств оперативной диагностики : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лобанов Иван Игоревич ; Российский ун-т транспорта (МИИТ). – Москва, 2017. – 209 с. – Текст : непосредственный.

10. Нотик, З. Х. Тепловозы ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЭ / З. Х. Нотик. – Москва : Транспорт, 1996. – 444 с. – Текст : непосредственный.

11. Фишбейн, Б. Д. Железнодорожная климатология : монография / Б. Д. Фишбейн, А. А. Бондаренко [и др.]; под ред. д.т.н., проф. Б. Д. Фишбейна. – Самара : Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2007. – 508 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Lakin I.I. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmnykh kompleksov* (Monitoring of the technical condition of locomotives according to on-board hardware and software systems). Doctor's thesis, Moscow, RUT (MIIT), 2016, 195 p. (In Russian).

2. HEDLUND Eric, RODDY Nicholas, GIBSON David, BLILEY Richard. *Patent USA WO 01/31450*, 2001.

3. *Sistema izmeritelnaya dlya avtomatizirovannogo kontrolya parametrov teplovoza (ASK-VIS-2VK)* [Measuring system for automated control of locomotive parameters (ASK-VIS-2VK)]. Operating Manual RE 002-01-2009. LLC «Technovis», 2009, 22 p.

4. *Sistemy toplivoizmeritelnye apparatno-programmnogo kompleksa BORT* [Fuel measuring systems of the BORT hardware and software complex]. Appendix to Certificate no. 65521, 2017, 10 p. Available at: <https://docplayer.com/59733160-Sistemy-toplivoizmeritelnye-apparatno-programmnogo-kompleksa-bort.html> (accessed: 24.03.2022).

5. *Registrator parametrov raboty teplovoza (RPRT)* [Register of locomotive operation parameters (RPTT)]. Operating manual KNGM.421429.004 RE, 49 p. Available at: https://avpt.ru/upload/RE_RPRT.pdf (accessed: 24.03.2022).

6. Beloglazov A.K., Taruta V.F., Chetvergov V.A., Chulkov A.V. Evaluation of the efficiency of diesel generator sets based on the results of parameter control during rheostatic tests. *Izvestiya Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 2(30), pp. 2-8 (In Russian).

7. Kiselev G.G. *Povysheniye toplivnoy ekonomichnosti i effektivnosti ekspluatatsii dizel-generatornykh ustanovok teplovoznov na osnove kontrolya teploenergeticheskikh parametrov* (Improving fuel efficiency and operational efficiency of diesel generator sets of locomotives based on the control of thermal power parameters). Candidate's thesis, Samara, STU, 2005, 188 p. (In Russian).

8. Petukhov Yu.A., Skovorodnikov E.I., Thyssen D.E. Improvement of methods of fuel consumption control for maneuvering and household work using on-board systems. *Izvestiya Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 3(15), pp. 61-66 (In Russian).

9. Lobanov I.A. *Povysheniye ekspluatatsionnoy effektivnosti teplovoznnykh dizeley primeneniye sredstv operativnoy diagnostiki* (Improving the operational efficiency of diesel locomotives using operational diagnostic tools). Candidate's thesis, Moscow, RUT (MIIT), 2017, 209 p. (In Russian).

10. Notik Z.H. *Teplovozy ChME3. ChME3T. ChME3E* [Diesel locomotives ChME3, ChME3T, ChME3E]. Moscow, Transport, 1996, 444 p.

11. Fishbein B.D., Bondarenko A.A., Grigoryev V.L., Kapranov N.N., Bulatov A.A., Nosyrev D.Ya., Balalayev A.N., Glushchenko I.N. *Zheleznodorozhnaya klimatologiya* [Railway climatology]. Samara, STU, 2007, 508 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петухов Сергей Александрович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», СамГУПС.

Тел.: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: sakmara-cite@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petukhov Sergei Aleksandrovich

Samara State Transport University (SSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Locomotives», SSTU.

Phone: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: sakmara-cite@mail.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Росляков Алексей Дмитриевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы», СамГУПС.

Тел.: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: roslykov_ad@mail.ru

Roslyakov Alexey Dmitrievich

Samara State Transport University (SSTU).

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

Doctor Of Sciences in Engineering, professor of the department «Locomotives».

Phone: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: roslykov_ad@mail.ru

Курманова Лейла Салимовна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», СамГУПС.

Тел.: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: leyla_kurmanova@mail.ru

Kurmanova Leila Salimovna

Samara State Transport University (SSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Locomotives», SSTU.

Phone: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: leyla_kurmanova@mail.ru

Карпенко Михаил Юрьевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

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

Студент кафедры «Локомотивы».

Тел.: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: lokosss1@mail.ru

Karpenko Mikhail Yurievich

Samara State Transport University (SSTU).

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

Student of the department «Locomotives»

Phone: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: lokosss1@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Совершенствование автоматизированных систем регистрации параметров работы автономных локомотивов / С. А. Петухов, А. Д. Росляков, Л. С. Курманова, М. Ю. Карпенко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 11 – 22.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petukhov S.A., Roslyakov A.D., Kurmanova L.S., Karpenko M.Yu. Improvement the automated systems for autonomous locomotives work parameters recording. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 1 (49), pp. 11-22.

УДК 629.4.027.2(045)

Г. И. Гаджиметов

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

О ВЛИЯНИИ КОСОСИММЕТРИЧНОЙ ОСТАТОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ВАГОНА НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. Для повышения скорости доставки грузов разрабатываются грузовые вагоны, рассчитанные на конструкционную скорость 140 км/ч. Одной из важных частей грузового вагона является ходовая тележка, от конструкции которой зависят динамические качества вагона. В тележке таких вагонов используется рама жесткой конструкции, которая восприимчива к кососимметричным нагрузкам. Анализ стандартов показал, что проверка прочности во время проектирования рамы тележки жесткой конструкции при воздействии максимальных кососимметричных сил, которые могут возникнуть в эксплуатации при сходе колеса с рельса, не требуется, что может привести к остаточной кососимметричной деформации рамы тележки. Для оценки влияния остаточной кососимметричной деформации на безопасность движения по коэффициенту запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов выполнены теоретические исследования. Результаты исследований показали, что остаточная деформация рамы тележки приводит к перераспределению нагрузок на шейки оси колесной пары, которое по влиянию на коэффициент запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов

схоже с боковой качкой вагона. Боковая качка при движении вагона влияет на снижение коэффициента запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов в большей степени, чем колебания при галопировании и подпрыгивании. Таким образом, допуск к эксплуатации вагонов с кососимметричной остаточной деформацией рамы тележки без ее дефектоскопии может привести к нарушению безопасности движения. Для соблюдения безопасности движения вагонов с тележками, имеющими жесткие рамы, и снижения экономических потерь на стадии проектирования должна быть проведена оценка прочности рамы в зависимости от действия кососимметричных сил.

Ключевые слова: скоростная тележка, вагон, сварная рама, стендовые испытания, расчетные режимы, кососимметричные силы.

Gadzhimet I. Gadzhimetov

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

ABOUT THE INFLUENCE OF ANTISYMMETRIC PERMANENT STRAIN OF THE WAGON BOGIE FRAME ON TRAFFIC SAFETY

Abstract. To increase the speed of the cargo delivery, freight wagons are being developed, intended for the design speed of 140 km/h. One of the important parts of a freight wagon is the bogie, the design of which determines the wagon dynamic behaviour. The bogie of such wagons uses a frame of a rigid design, which is susceptible to antisymmetric loads. The analysis of standards has shown that the strength test during designing a rigid bogie frame under the impact of maximum antisymmetric forces that may occur in operation when a wheel derails is not required, which can lead to a residual antisymmetric deformation of the bogie frame. Theoretical research is performed to estimate the impact of the residual antisymmetric deformation on traffic safety using the wheelset safety factor against derailment. The research results have shown that the bogie frame residual deformation leads to a load redistribution on the wheelset axle journal, which, in terms of the impact on the wheelset safety factor against derailment, is similar to the wagon rolling motion. The wagon rolling motion affects the reduction of the wheelset safety factor against derailment to a greater extent than oscillations during pitching and bouncing. Thus, the permission to operate wagons with the antisymmetric residual deformation of the bogie frame without its non-destructive testing can lead to traffic safety violation. In order to ensure the traffic safety of wagons with bogies having rigid frames and reduce economic losses at the design stage, bogies strength depending on the action of antisymmetric forces should be estimated.

Keywords: high-speed bogie, wagon, welded frame, bench tests, design modes, antisymmetric forces.

Для ускорения доставки грузов железнодорожным транспортом предусмотрено увеличение скоростей движения грузовых поездов [1]. Максимальная скорость движения находящихся в эксплуатации грузовых вагонов на трехэлементных тележках ограничена 90 км/ч [2]. Для повышения скорости движения разрабатываются грузовые вагоны, рассчитанные на конструкционную скорость 140 км/ч. Опытный образец такой платформы был представлен в 2021 г. на международном железнодорожном салоне техники и технологий ЭКСПО 1520 [3]. В составе таких грузовых вагонов используются тележки с жесткой рамой сварной конструкции.

Проектирование и допуск к эксплуатации нового подвижного состава предусматривает комплекс расчетно-экспериментальных проверок, целью которых является обеспечение безопасности его применения в эксплуатации. В соответствии с рекомендациями источника [4] при эксплуатации нового подвижного состава должны обеспечиваться прочность и отсутствие пластических деформаций при предельных режимах нагружения и воздействиях, т. е. должна обеспечиваться механическая безопасность. Данное требование должно соблюдаться на стадиях конструирования, изготовления и проведения приемочных и сертификационных испытаний объекта. Испытания проводятся по методам, установленным в ГОСТ 33788–2016 [5], при которых в лабораторных условиях на стендовом оборудовании воспроизводятся режимы нагружения, оценивается прочность по допускаемым напряжениям относительно предела текучести материала $\sigma_{0,2}$ и выполняется проверка на отсутствие остаточных деформаций при этом.

В эксплуатации встречаются случаи проваливания одного колеса внутрь колеи (рисунок 1) [6], при котором возникает максимальная кососимметричная нагрузка.

Проваливание колеса колесной пары внутрь колеи связано с уширением рельсовой колеи в кривых участках железнодорожного пути из-за его некачественного содержания [7].



Рисунок 1 – Случаи проваливания колеса колесной пары внутрь колеи

Расчетные режимы нагружения несущих конструкций тележки, при воздействии которых проверяется статическая прочность, приведены в ГОСТ 33211–2014 [8] и не предусматривают оценку прочности при максимальных кососимметричных силах. Требования стандарта [8] в основном сформированы исходя из опыта эксплуатации вагонов, оборудованных трехэлементными тележками, где соединение надрессорной балки и рам боковых условно можно считать шарнирным, так как оно позволяет последним вращаться относительно друг друга в отличие от тележек с жесткой сварной рамой (рисунок 2), т. е. для рам тележек жесткой конструкции обеспечение прочности при кососимметричном нагружении является актуальным.

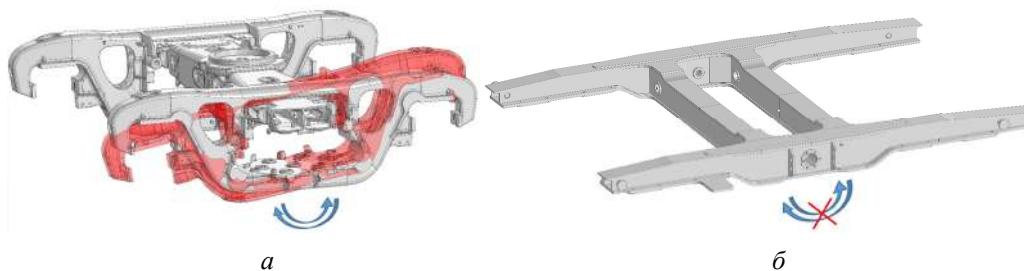


Рисунок 2 – Схематизированное представление восприимчивости несущих конструкций тележек к кососимметричным нагрузкам: *а* – сочленение несущих конструкций тележки типа 18-100; *б* – рама тележки жесткой сварной конструкции

Стоит отметить, что при сходе колеса с рельса перемещение колеса больше тех, при которых рассчитываются кососимметричные силы для расчета сопротивления усталости [8, 9]. В случае, если прочность рамы не рассчитана на такие нагрузки, возможно возникновение остаточной деформации, что приведет к изменению нагрузки на шейки оси колесной пары и может вызвать нарушение безопасности.

Изложенное подчеркивает необходимость обстоятельного рассмотрения вопроса о степени влияния остаточных деформаций рамы тележки на безопасность движения для обоснования дополнительного расчетного режима для оценки прочности.

Оценка безопасности движения при остаточной кососимметричной деформации рамы тележки. Устойчивость движения колесной пары по рельсовой колее оценивается по показателю безопасности – коэффициенту запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов (K_{yc}), для определения которого используется формула [8]:

$$K_{yc} = \frac{\tan \beta - \mu}{1 + \mu \cdot \tan \beta} \cdot \frac{P_b}{P_6}, \quad (1)$$

где β – угол наклона образующей гребня колеса к горизонтали;

μ – коэффициент трения поверхностей колес и рельсов;

P_b – вертикальная сила от набегающего колеса на рельс, Н;

P_6 – боковая сила от взаимодействия гребня набегающего колеса и рельса, Н.

При проведении испытаний вагона или расчетов определяют (вычисляют) динамические вертикальные силы, действующие на шейки оси колесной пары $Q_{ш1}$ и $Q_{ш2}$, и горизонтальную силу H_p . Схема действия сил на колесную пару при движении по рельсовой колее показана на рисунке 3.

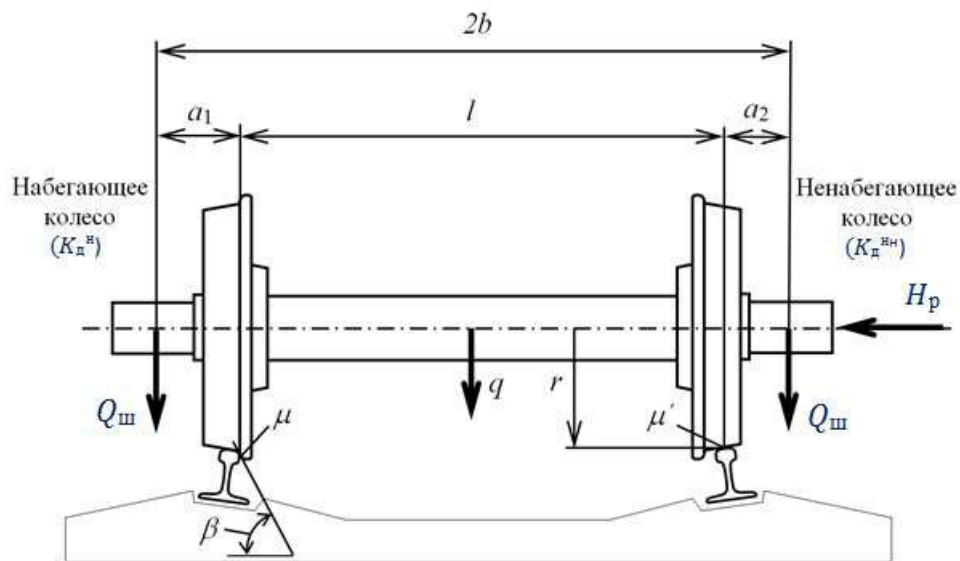


Рисунок 3 – Расчетная схема приложения сил к колесной паре

Вертикальную (P_v) и боковую ($P_б$) силы давления колес на рельсы вычисляют по формулам [5]:

$$P_v = Q_{ш} \cdot \left[\frac{2(b-a_2)}{l} - K_{дн} \cdot \frac{2b-a_2}{l} + K_{днн} \cdot \frac{a_2}{l} \right] + q \cdot \frac{b-a_2}{l} + \frac{r}{l} \cdot H_p; \quad (2)$$

$$P_б = \mu \cdot Q_{ш} \cdot \left[\frac{2(b-a_1)}{l} + K_{дн} \cdot \frac{a_1}{l} - K_{днн} \cdot \frac{2b-a_2}{l} \right] + \mu \cdot q \cdot \frac{b-a_1}{l} + \left(1 - \frac{r}{l} \cdot \mu \right) \cdot H_p, \quad (3)$$

где $Q_{ш}$ – вертикальная статическая сила, действующая на шейку оси колесной пары, кН;

q – вес необрессоренных частей, приходящийся на колесную пару, кН;

$2b$ – расстояние между точками приложения вертикальных сил к шейкам оси колесной пары, м;

a_1, a_2 – расчетные расстояния от точек контакта колес с рельсами до середины соответствующих (набегаящей и ненабегаящей) шеек оси колесной пары, м;

μ – коэффициент трения между гребнем набегаящего колеса и рельсом, принимают 0,3;

r – радиус колеса по кругу катания, м;

l – расстояние между точкой контакта на гребне набегаящего колеса и кругом катания ненабегаящего колеса, м;

$K_{дн}$ и $K_{днн}$ – коэффициенты вертикальной динамики в буксовой ступени рессорного подвешивания на набегаящем и ненабегаящем колесах соответственно;

H_p – рамная сила, кН.

При движении вагона по рельсовой колее кузов совершает колебания подпрыгивания, галопирования и боковой качки, которые приводят к изменению сил, действующих на шейки оси колесной пары.

При подпрыгивании и галопировании вагона шейки осей колесной пары нагружаются равномерно и на них действуют одинаковые дополнительные силы. Для такого случая коэффициент динамики вертикальных колебаний обрессоренных частей определяют по формуле:

$$K_{дв} = \frac{Q_{ш1} + Q_{ш2}}{2Q_{ш.ст}}, \quad (4)$$

где $Q_{ш.ст}$ – статическая нагрузка на шейку оси колесной пары, кН;

$Q_{ш1}, Q_{ш2}$ – дополнительные динамические силы, действующие на шейки оси от вертикальных колебаний обрессоренных частей, кН.

При колебаниях боковой качки шейка оси колесной пары с одной стороны догружается, а с противоположной стороны пропорционально разгружается. Коэффициент динамики при боковой качке определяется по формуле:

$$K_{д.бк} = \frac{Q_{ш1} - Q_{ш2}}{2Q_{ш.ст}}. \quad (5)$$

При остаточной деформации рамы тележки жесткой конструкции происходит перераспределение нагрузок от колес колесной пары на рельсы относительно равномерного распределения нагрузок при проектом состоянии, т. е. возникнет кососимметричное нагружение шеек оси колесной пары (рисунок 4).

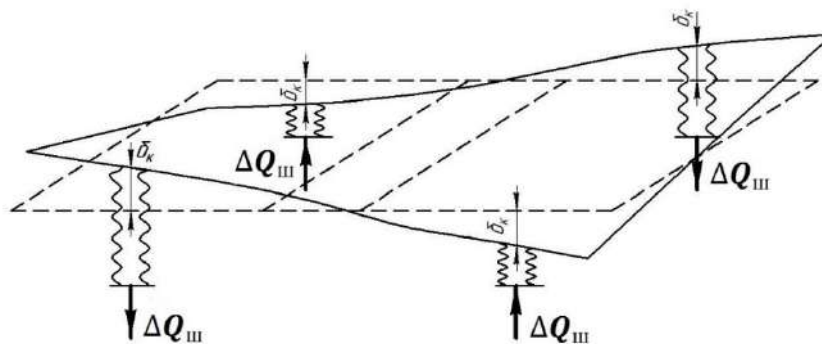


Рисунок 4 – Изменение вертикальных нагрузок, обусловленное действием сил от кососимметричной остаточной деформации рамы тележки

Величину этих дополнительных нагрузок можно определить по формуле:

$$\Delta Q_{ш} = \delta_k \cdot \frac{C_б \cdot C_p}{C_б + C_p}, \quad (6)$$

где $\Delta Q_{ш}$ – дополнительная догружающая/разгружающая шейку оси сила, кН;

δ_k – кососимметричная деформация рамы тележки, м;

$C_б$ – жесткость рессорного подвешивания (на один буксовый узел), кН/м;

C_p – жесткость рамы тележки при кососимметричной нагрузке, кН/м.

На рисунке 5 представлена зависимость кососимметричных догружающих и разгружающих сил на шейки оси от степени деформации рамы тележки, рассчитанная на примере двухосной тележки с характеристиками рессорного подвешивания, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики рессорного подвешивания тележки

Параметр	Значение параметра
Жесткость рессорного подвешивания (на один буксовый узел), кН/м	950,0
Жесткость рамы тележки при кососимметричной нагрузке, кН/м	5364,8

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

По своей природе дополнительные догружающие и разгружающие шейки оси колесной пары силы при кососимметричной остаточной деформации рамы тележки идентичны боковой качке. Отличие заключается в том, что изменение нагрузки на шейки оси колесной пары при боковой качке при движении по рельсовой колее – это динамический колебательный процесс, а изменение нагрузки при кососимметричной остаточной деформации – статическое состояние.

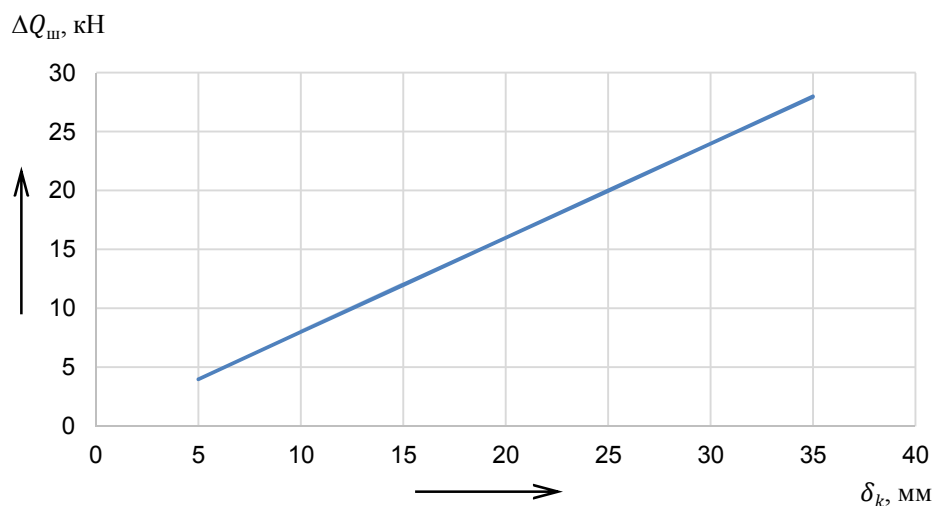


Рисунок 5 – График зависимости кососимметричных догружающих и разгружающих сил на шейки оси от степени остаточной деформации рамы тележки

В связи с этим далее по тексту коэффициент боковой качки от остаточной кососимметричной деформации рамы тележки принимается эквивалентным коэффициенту боковой качки при динамических колебаниях обрессоренных частей относительно продольной оси вагона.

Зависимость коэффициента боковой качки, вычисленная по формуле (5) на основании графика изменения нагрузки на шейки оси при остаточной кососимметричной деформации рамы тележки (см. рисунок 4), приведена на рисунке 6.

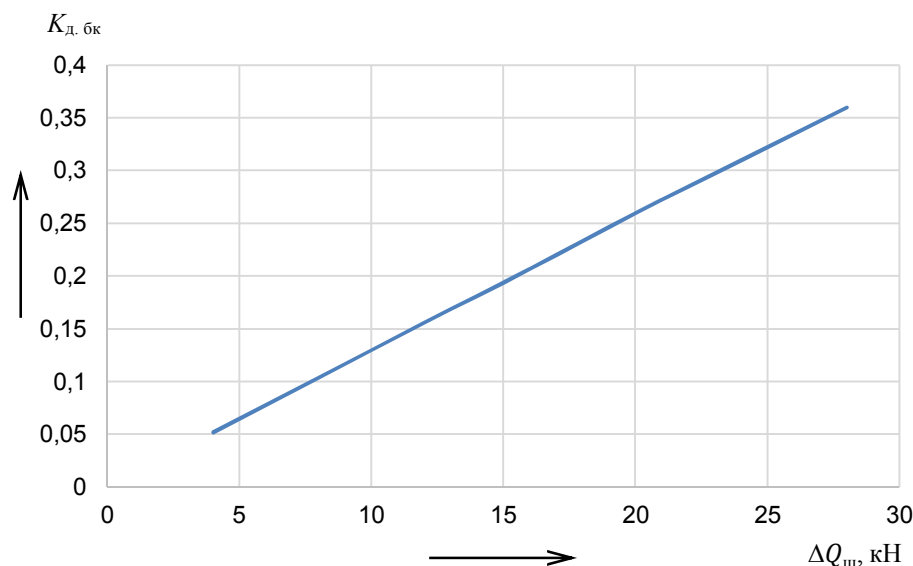


Рисунок 6 – График зависимости коэффициента боковой качки от сил, возникающих при остаточной деформации рамы тележки

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На основании графиков, приведенных на рисунках 5 и 6, выведем зависимость коэффициента боковой качки от степени остаточной кососимметричной деформации рамы тележки (рисунок 7).

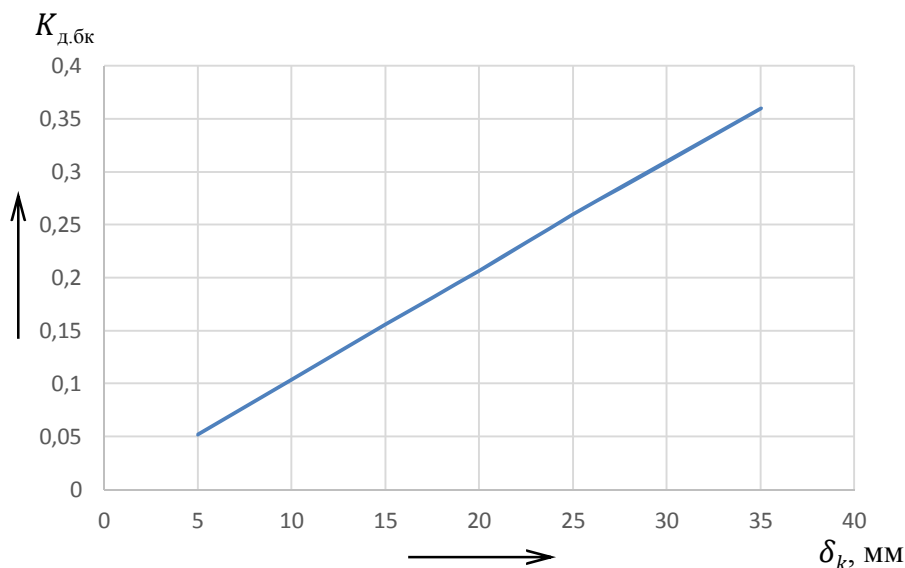


Рисунок 7 – График зависимости коэффициента боковой качки от степени остаточной кососимметричной деформации рамы тележки

Используя формулы (1) – (3), определим влияние разного уровня коэффициента динамики от боковой качки, галопирования, подпрыгивания на коэффициент запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов $K_{ус}$ при различных значениях рамных сил (рисунок 8). Графики составлены для экипажа с нагрузкой от колесной пары на рельсы 17 тс (167 кН) и параметрами, приведенными в таблице 2.

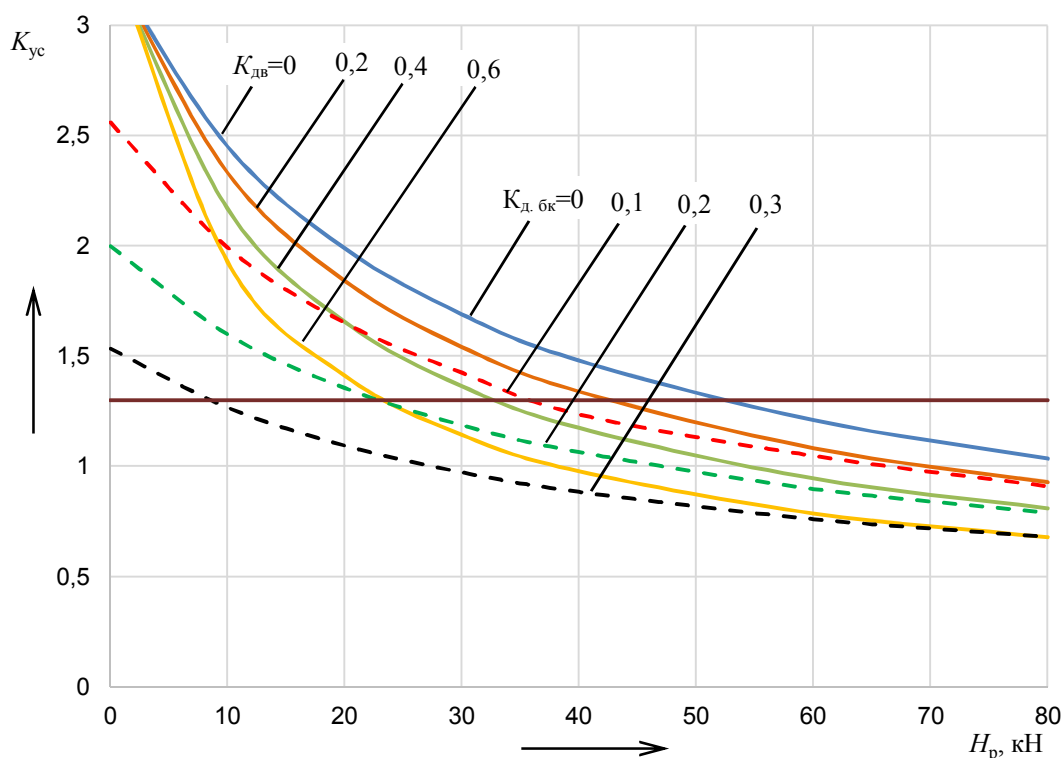


Рисунок 8 – Графики зависимости коэффициента устойчивости колеса против схода с рельса $K_{ус}$ от рамных сил H_p и коэффициентов динамики $K_{д.бк}$ и $K_{дв}$

Таблица 2 – Параметры экипажа вагона для расчета K_{yc}

Параметр	Значение параметра
Вертикальная статическая сила, действующая на шейку оси колесной пары $Q_{ш}$, кН	77
Вес необрессоренных частей q , приходящийся на колесную пару, кН	12,8
Расстояние между точками приложения вертикальных сил к шейкам оси колесной пары $2b$, м	2,036
Расстояние между точкой приложения вертикальной силы на шейку оси на набегающем колесе и точкой контакта на гребне a_1 , м	0,25
Расстояние между точкой приложения вертикальной силы на шейку оси на ненабегающем колесе и точкой контакта на его поверхности катания a_2 , м	0,22
Радиус колеса по кругу катания r , м	0,475
Расстояние между точкой контакта на гребне набегающего колеса и кругом катания ненабегающего колеса l , м	1,58
Угол наклона образующей гребня колеса к горизонтальной плоскости β , градус	60

Анализ графика (см. рисунок 8) показывает, что боковая качка вагона по влиянию на устойчивость колеса против вкатывания колеса на головку рельса является худшим случаем, чем при галопировании или подпрыгивании. Например, при среднем вероятном значении рамной силы 22 кН, рассчитанной по ГОСТу [8] для конструкционной скорости 140 км/ч, уже при коэффициенте боковой качки $K_{д. бк}$, равном 0,2, коэффициент запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов K_{yc} снижается до минимального нормативного значения 1,3, в то время как от галопирования и подпрыгивания оно достигается только при коэффициенте динамики $K_{дв} = 0,6$. Это обстоятельство показывает, что появление остаточной деформации рамы влияет на безопасность движения в большей степени, чем при равномерном нагружении шеек оси колесной пары при галопировании и подпрыгивании.

Возможные последствия при применении рамы тележки жесткой конструкции, не рассчитанной на действие кососимметричной нагрузки. При возникновении аварий на железнодорожных путях общего и необщего назначения должен производиться разбор аварийного случая с привлечением контрольных и надзорных органов. На рисунке 9 приведен алгоритм действий при возникновении случая со сходом колеса на низкой скорости на путях необщего пользования, при котором в раме тележки возникают максимальные кососимметричные силы, и его влиянии на безопасность движения и возможные последствия при его нарушении.

Выполнение работ по оценке прочности рамы тележки от воздействия максимальных кососимметричных нагрузок позволит избежать экономических потерь из-за порчи несущих элементов тележки при эксплуатации, повысить надежность и обеспечить безопасность движения в случае нарушения регламентных работ, выполняемых при сходе эксплуатируемого подвижного состава. Стоит отметить, что европейский стандарт [10] предусматривает оценки прочности несущих конструкций тележки в режиме, воспроизводящем эффект схода колеса с рельса на небольшой скорости.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

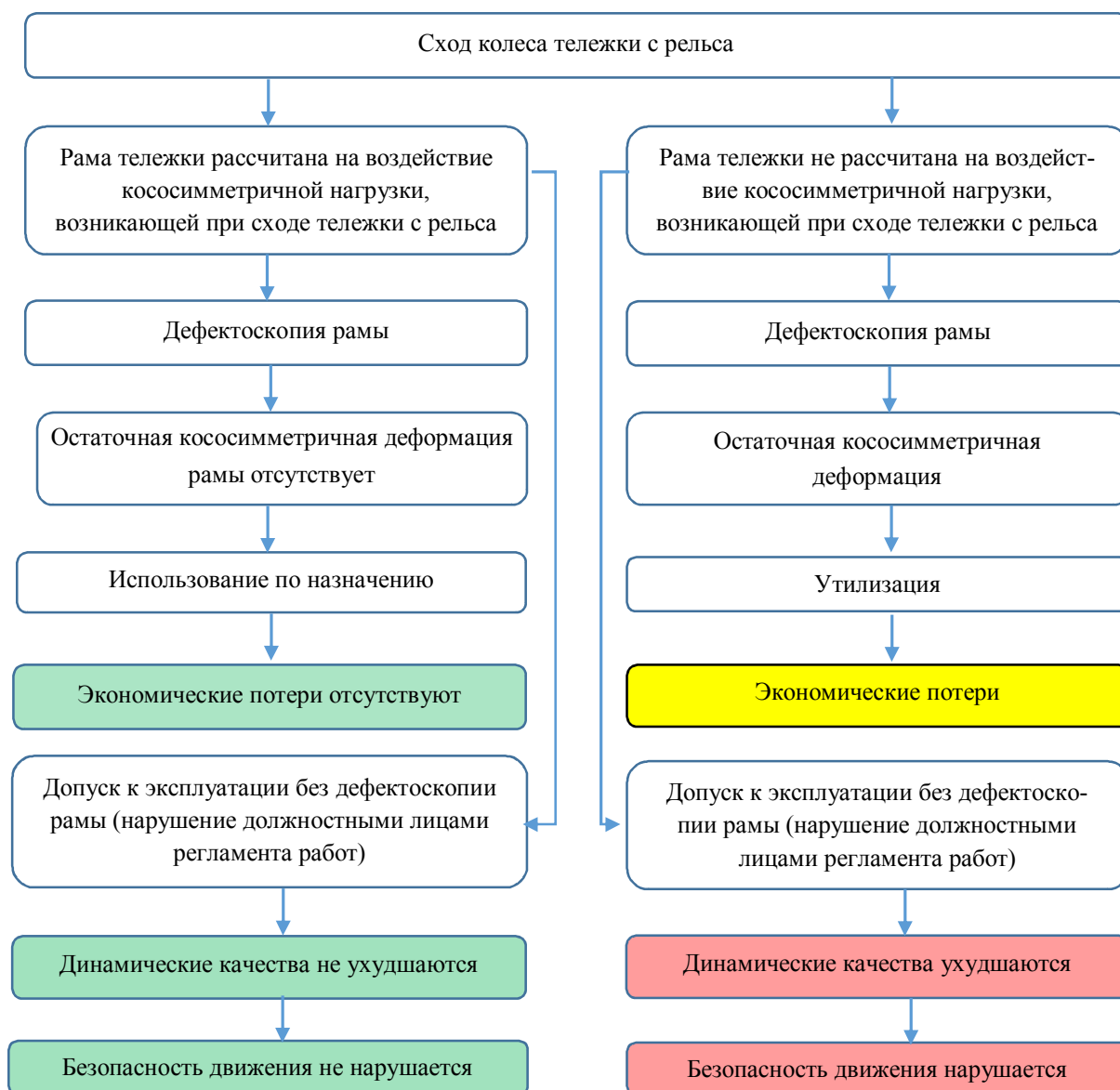


Рисунок 9 – Алгоритм действий при сходе колеса с рельса и последствия его нарушения

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Остаточная кососимметричная деформация рамы тележки влияет на распределение нагрузок на шейки оси колесной пары.
2. Характер изменения нагрузки на шейки оси колесной пары по влиянию на снижение коэффициента запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов схож с процессом боковой качки вагона.
3. Допуск к эксплуатации вагонов с кососимметричной остаточной деформацией рамы тележки без ее дефектоскопии может привести к нарушению безопасности движения.

Список литературы

1. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года. Утв. Распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 № 466р // sudact.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-19032019-n-466-r/> (дата обращения: 01.04.2022).
2. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утв. приказом Мин-ва трансп. Рос. Федерации № 286 от 21.12.2010 // base.garant.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://base.garant.ru/55170488/> (дата обращения: 01.04.2022).

3. Скоростной вагон-платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-6704: особенности конструкции и перспективы применения / В. С. Коссов, В. А. Никонов [и др.]. – Текст : непосредственный // Техника железных дорог. – 2021. – № 3. – С. 30–35.
4. О безопасности железнодорожного подвижного состава: технический регламент Таможенного союза: ТР ТС 001/2011 // eurasiancommission.org : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/txnnreg/deptexreg/tr/Documents/TR%20Podvig-noisos-te-v%20PID.pdf> (дата обращения: 01.04.2022).
5. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 50 с. – Текст : непосредственный.
6. Ночью на станции Дербышки с путей сошли два грузовых вагона // realnoevremya.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://realnoevremya.ru/news/63310-nochyu-na-stancii-derbyshki-s-putey-soshli-dva-gruzovyh-vagona> (дата обращения: 01.04.2022).
7. Дудкин, Е. П. Проблемы устройства и содержания железнодорожных путей необщего пользования / Е. П. Дудкин, В. М. Рыбачок. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации: Журнал о науке, экономике, практике. – 2008. – № 2. – С. 16–17.
8. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 58 с. – Текст : непосредственный.
9. Вагоны : учебник / Л. А. Шадур, И. И. Челноков [и др.]; под ред. Л. А. Шадура. – Москва : Транспорт, 1980. – 439 с. – Текст : непосредственный.
10. DIN EN 13749-2011. Railway applications – Wheelsets and bogies – Method of specifying the structural requirements of bogie frames, German version EN 13749:2011, 57 p.

References

1. *Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZHD» do 2025 goda* [Long-term development program of JSC RZD until 2025]. Approved by RF Government Executive Order of March 19, 2019, No. 466r. Available at: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-19032019-n-466-r/> (accessed 01.04.2022).
2. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznikh dorog Rossiyskoy Federatsii* [Railway Operating Rules of Russian Federation]. Approved by Order of Russian Federation Minister of Transport No. 286 of December 21, 2010. Available at: <https://base.garant.ru/55170488/> (accessed 01.04.2022).
3. Kossov V.S., Nikonov V.A., Shevtsov A.M., Romanov C.A., Epstein K.K., Savchenkov V.V. High-speed flat wagon for transportation of model 13-6704 large-tonnage container: design features and application prospects. *Tekhnika zheleznikh dorog – Railway Equipment Magazine*, 2021, no. 3, pp. 30-34 (In Russian).
4. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava, CUTR 001/2011 (On the safety of railway rolling stock, Technical Regulation of the Customs Union 001/2011). Available at: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/txnnreg/deptexreg/tr/Documents/TR%20Podvig-noisos-te-v%20PID.pdf> (accessed 01.04.2022).
5. National Standard 33788–2016. Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic qualities. Moscow, Standardinform Publ., 2016, 50 p. (In Russian).
6. At night, two freight wagons derailed at Derbyshki station. Available at: <https://realnoevremya.ru/news/63310-nochyu-na-stancii-derbyshki-s-putey-soshli-dva-gruzovyh-vagona> (accessed 01.04.2022).
7. Dudkin E.P., Rybachok V.M. Problems of arrangement and maintenance of non-public railway tracks. *Transport Rossiyskoy Federatsii: Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike. – Transport of the Russian Federation. The magazine of science, practice, economics*, 2008, no. 2, pp. 16-17 (In Russian).
8. National Standard 33211–2014. Freight wagons. Requirements for strength and dynamic qualities. Moscow, Standardinform Publ., 2020, 58 p. (In Russian).
9. Shadur L.A., Chelnokov I.I., Nikolskii L.N., Nikolskii E.N., Koturanov V.N., Proskurnev P.G.,

Kazanskii G.A., Spivakovsky A.L., Devyatkov V.F. *Vagony* (Cars). Moscow: Transport Publ., 1980, 439 p. (In Russian).

10. Railway applications. Wheelsets and bogies. Method of specifying the structural requirements of bogie frames; DIN EN 13749-2011. German version EN 13749:2011, 57 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гаджиметов Гаджимет Исамединович

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

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

Руководитель Испытательного центра подвижного состава.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 11-27.

E-mail: gajimetov-gi@vnikti.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gadzhimetov Gadzhimet Isamedinovich

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

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, Russian Federation.

Head of Rolling Stock Test Center

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 11-27.

E-mail: gajimetov-gi@vnikti.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гаджиметов, Г. И. О влиянии кососимметричной остаточной деформации рамы тележки вагона на безопасность движения / Г. И. Гаджиметов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 22 – 32.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gadzhimetov G.I. About the influence of antisymmetric permanent strain of the wagon bogie frame on traffic safety. Journal Of Transsib Railway Studies, 2022, no. 1 (49), pp. 22-32 (In Russian).

УДК 625.111:629.4.016.3:621.337.522

М. Ю. Кейно

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ КАК КРИТЕРИЙ ВЫБОРА ВИДА ТЯГИ ДЛЯ НОВЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Статья посвящена оценке возможности эффективного использования рекуперированной энергии как ключевого фактора при выборе типа тягового подвижного состава для вождения поездов на проектируемой железнодорожной линии Дальнего Востока России. Проектируемая линия будет использоваться для перевозки угля и генеральных грузов, отправляемых в порты Охотского моря и на экспорт. Строительство новой линии даст толчок развитию северных районов Хабаровского края и северо-востока Амурской области. С учетом уникального профиля линии, имеющей протяженный спуск к морскому побережью, основная идея работы состоит в том, чтобы использовать огромное количество потенциальной энергии для выработки достаточного количества электричества для покрытия потребностей поездов встречного направления, идущих на подъем. Выполнены тягово-энергетические расчеты, которые позволили определить расчетный диапазон скоростей движения поездов и объемы потребляемой энергии. Показана возможность существенного энергетического самообеспечения рассматриваемого участка для тяги поездов при условии организации эффективного энергообмена между электровозами, находящимися на одной межподстанционной зоне, что возможно только при движении грузовых поездов по фиксированному расписанию. Оценка объемов рекуперированной энергии показала, что рассматриваемые объемы энергии не могут быть сохранены в бортовых накопителях автономных локомотивов при существующем уровне технологий, что подтверждает необходимость электрификации. Использование электровозов с асинхронным тяговым приводом и энергоэффективными четырехквadrантными тяговыми преобразователями может обеспечить повышение уровня использования рекуперативной энергии по сравнению с электровозами с зонно-фазным регулированием напряжения на тяговых двигателях. Предлагаемое решение позволяет значительно снизить углеродный след железнодорожного транспорта на рассматриваемой линии. Возможность эффективного использования рекуперативной энергии позволяет применять этот критерий в качестве ключевого фактора при выборе вида тяги на вновь проектируемых железнодорожных линиях.

Ключевые слова: железная дорога, проектирование, уголь, электрическая тяга, рекуперация, энергия.

Maxim Yu. Keyno

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

RECUPERATION EFFICIENCY AS A KEY FACTOR IN CHOOSING THE TYPE OF TRACTION FOR NEW RAILWAYS

Abstract. The paper is devoted to the evaluation of the possibility of effective use of recuperation as a key factor for the traction selection on a prospective railroad in the Russian Far East. The planned line will carry coal and general cargoes, shipping to Sea of Okhotsk ports and overseas. The construction of a new railroad will push development in the north of the Khabarovsk Territory and the northeast of the Amur Region. Due to the line will have a long descent to the seacoast, the main idea is to use the potential energy to generate electricity that covers power needed for oncoming trains going uphill. Performed traction-energy calculations allowed determining the available speed and energy consumption for uphill trains. Shown the ability of power self-sufficient train operations that provided under the condition of ensuring efficient energy exchange between electric locomotives located on the common feeding zone, which is possible only when freight trains operate on a fixed schedule. Given volumes of recuperated energy considered in the research cannot be stored onboard at autonomous locomotives using the existing level of technology, which confirms the need for electrification. The implementation of electric locomotives with an asynchronous traction drive and energy-efficient four-quadrant traction converters can provide an increase in the level of regenerative energy use compared to electric locomotives with zone-phase voltage regulation on traction motors. The proposed solution can significantly reduce the carbon footprint of railroad transportation on the line in question. The possibility of effective use of recuperative energy can use as a key selection factor for the type of traction on prospective railway lines.

Keywords: railroad, design, coal, electric traction, recuperation, energy.

Необходимость развития пропускной способности железных дорог на Дальнем Востоке России требует строительства в ближайшем будущем новой железнодорожной ветки, которая соединит Байкало-Амурскую магистраль (БАМ) с побережьем Охотского моря. В настоящее время, и это признано российским правительством, и БАМ, и Транссибирская магистраль загружены почти на 100 % от их номинальной мощности [1], но растущий транзит угля нуждается в альтернативном маршруте к морским портам для сокращения пути к потребителям. Одним из перспективных способов сокращения времени доставки грузов является строительство принципиально новой железнодорожной ветки от БАМа до ближайшего побережья. Рассматривая карту северо-восточной части БАМа в районе станции Улак (рисунк 1), можно обнаружить, что ближайшее морское побережье лежит всего в 400 км, тогда как существующий путь по БАМу до порта Ванино на берегу Татарского пролива составляет около 1500 км.



Рисунок 1 – Карта Байкало-Амурской магистрали (БАМа)
(источник: А. Светлов – openstreetmap.org, лицензия CC BY-SA 2.0)

За последнее десятилетие небольшой разъезд Улак превратился в одну из самых загруженных развязок на БАМе – после успешной разработки одного из самых богатых на Востоке России Эльгинского угольного месторождения, начиная с 2022 г., и горнякам, и ОАО «Российские железные дороги» (РЖД) необходим эффективный способ вывозки 30 млн т высококачественного коксующегося угля в год [2].

В течение последних 15 лет РЖД последовательно игнорировали открытую информацию от горнодобывающих компаний об инвестициях в разработку новых угольных месторождений. Сегодня, находясь в условиях нехватки рабочей силы, времени и финансирования, РЖД не могут предоставить эффективных решений, обеспечивающих освоение требующихся грузопотоков в краткосрочной перспективе. Отказавшись от внедрения современных технологий тяжеловесного движения, РЖД тратят государственные инвестиции в масштабных проектах, таких как строительство вторых путей на всем протяжении БАМа, полная электрификация линий и масштабное обновление инфраструктуры. Сроки реализации выполняемых и запланированных мероприятий уходят далеко за сроки завершения проектов развития добывающих мощностей и портовой перевалочной инфраструктуры. Согласно прогнозу международного энергетического агентства ЕИА, несмотря на снижение потребления угля в ряде стран, в ближайшие десятилетия общая тенденция роста потребления угля в мире сохранится на уровне 0,5 % в год, в то время как в Индии и на других азиатских рынках, за исключением Китая, вырастет на 3,1% [3]. Таким образом, очевидно, что несмотря на экологические тренды и развертывание в Европе и по всему миру программы энергоперехода, потребность в увеличении провозной способности железных дорог Восточного полигона в текущем десятилетии будет сохраняться.

Одной из ближайших перспектив переброски угольного потока с БАМа на ближайшее морское побережье является строительство новой железнодорожной ветки от станции Улак до Охотского моря в районе поселка Чумикан [4]. Предлагаемая железнодорожная линия может сократить время и стоимость доставки не только угля, но и генеральных грузов в населенные пункты Охотского побережья: в Аян, в Охотск и даже в Магадан, порты Камчатки и на ряд островов Курильской гряды. Несмотря на то, что текущие грузообороты портов Охотского моря остаются на уровне менее миллиона тонн в год, согласно статистическим данным Администрации морских портов Охотского моря и Татарского пролива [5], обсуждаемые сегодня новые проекты развития могут потребовать существенного увеличения в грузоперевозках в ближайшие годы.

В 2020 – 2021 гг. в Дальневосточном государственном университете путей сообщения был разработан проект по оценке строительства новой железнодорожной линии и сравнению нескольких вариантов возможных трасс с использованием благоприятного рельефа Верхне-Зейской равнины и Удского прогиба. Как и большая часть сырьевых, угольных и рудных, месторождений, Эльгинский угольный разрез лежит на возвышенности в глубине материка на высоте 1000 м от уровня моря. Профиль кратчайшего пути от Улака до побережья моря на начальном участке имеет подъем протяженностью около 100 км, а затем – преимущественный спуск длиной около 350 км (рисунок 2). Как видно из сравнения, приведенного на рисунке 2, предлагаемая новая линия не только на 1200 км сокращает расстояние доставки грузов до порта, но и обеспечивает существенный энергетический выигрыш за счет меньшей разницы высот начальной и максимальной точек участка.

Профиль проектируемой линии очень похож на некоторые рудовозные и углевозные линии в Австралии, Бразилии, Китае и Южной Африке (рисунок 3). Как было показано в работе Dave van der Meulen, 2013, эти линии с движением тяжеловесных поездов массой до 20 – 41 тыс. т обладают высокой способностью возврата энергии, если будут использовать электрическую или гибридную тягу [6].

Основная идея довольно проста: использовать рекуперативную энергию, вырабатываемую при движении под гору тяжелого, груженого поезда, для питания локомотива, тянущего

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

в гору легкий порожний поезд. Если суммарный объем возвращаемой энергии при такой технологии будет покрывать сколько-нибудь значительную часть энергии, необходимой для тяги порожних поездов, то необходимо оценить целесообразность электрификации линии, а также оценить возможность разработки графика движения поездов на однопутной линии, согласованного таким образом, чтобы возвращаемая энергия вовремя находила своего потребителя. Подобный прием уже используется в городском рельсовом транспорте и некоторых транспортных системах [7, 8]. Однако в контексте магистральных железных дорог с грузовым движением подобная задача отечественными исследователями еще не решалась в силу уникальности профиля рассматриваемой в работе линии.

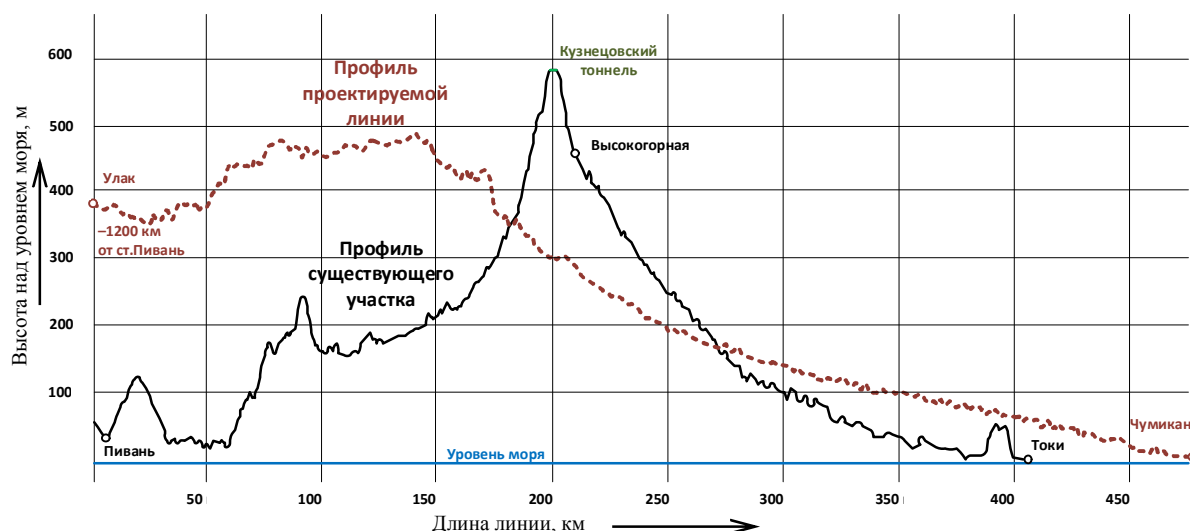


Рисунок 2 – Сравнение профиля пути предлагаемой линии с профилем перевального участка существующей линии от станции Комсомольск-на-Амуре до станции Токи (источник: автор)

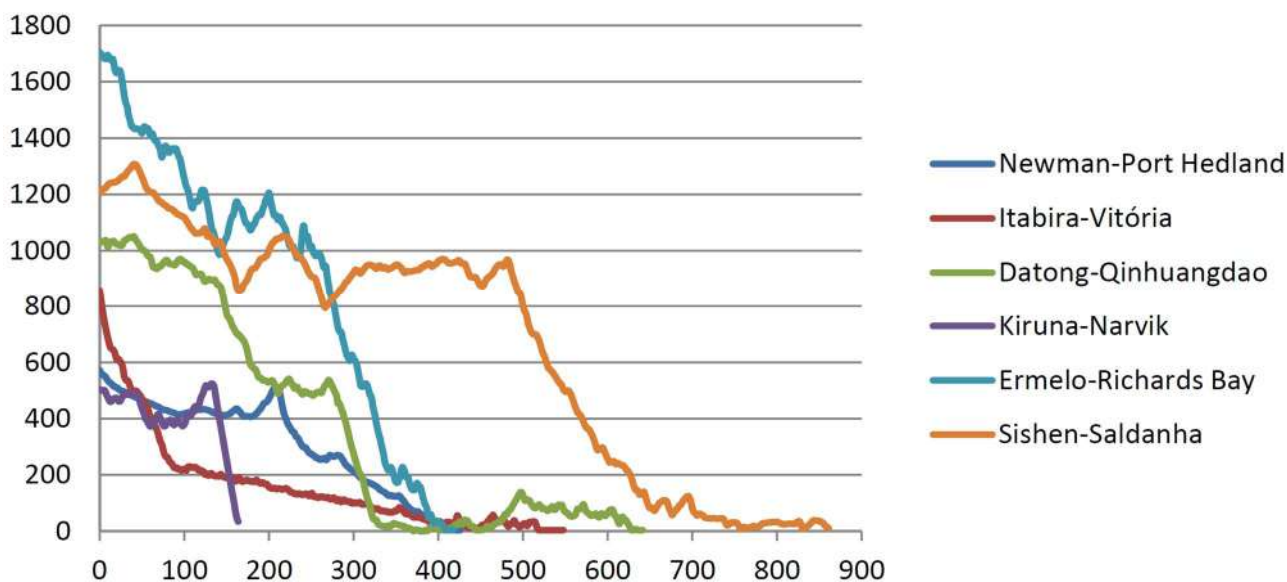


Рисунок 3 – Продольные профили нескольких линий с движением тяжеловесных поездов. По вертикали – высота над уровнем моря в метрах, по горизонтали – длина линии в километрах (источник: Dave van der Meulen, 2013)

Исторически возможность повторного использования рекуперированной энергии представляла интерес для поездов метро. Поскольку расписание поездов метро фиксируется в секундах, а процедуры отправления-прибытия постоянно повторяются, многие исследователи ищут

возможность использовать преимущества такой оптимизации расписания, при которой поезда, идущие к станциям, питают отправляющиеся поезда.

В работе [9] подчеркивается, что основной мерой эффективного использования рекуперативного торможения является оптимизация графиков движения для максимального энергообмена между транспортными средствами, поездами. Gupta, Tobin и Pavel, 2016 [10], основываясь на модели линейного программирования, представили метод оптимизации для быстрого расчета энергоэффективных расписаний в сетях метрополитена, который дал значительное снижение эффективного энергопотребления – в худшем случае на 19,27 %.

Так как на Восточном полигоне ОАО «РЖД» применяется электрическая тяга на переменном токе, представляется целесообразным рассматривать три основных варианта тягового обеспечения: тепловозы с дизельным или газодизельным циклом, аккумуляторные локомотивы и электровозы переменного тока. Для выбора вида тяги предлагается использовать «энергетический» подход: основным критерием для выбора типа тяги предполагается возможность максимального использования потенциальной энергии поездов, идущих по длинному спуску. За первые 100 км пути от верхней точки участка поезд спускается примерно на 270 м, что соответствует изменению потенциальной энергии на 5,22 МВт·ч при массе поезда 7100 т. Исследуем основные физические параметры потребления энергии электровозами в режимах тяги и рекуперации. В тяговом режиме для питания тяговых двигателей постоянного тока, которые широко используются на электровозах ЗЭС5К, работающих на Восточном полигоне, переменное напряжение 25 кВ от контактной сети преобразуется в напряжение ниже 1 кВ. Согласно техническому описанию ЗЭС5К на первом этапе тяговый трансформатор номинальной мощностью 4350 кВ·А снижает напряжение переменного тока примерно в 20 раз – до 1260 В (для режимов высокой скорости/мощности) или в 40 раз – до 630 В (для режимов малой скорости и малой мощности). На втором этапе пара тиристорных выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИПов) преобразует переменное напряжение в постоянное для питания четырех тяговых двигателей. Два двигателя по 820 кВт питаются от одного ВИПа номинальной мощностью 4000 кВт. В зависимости от установленного машинистом локомотива тока в режиме ручного регулирования или скорости в режиме автоматического регулирования тяговый преобразователь может регулировать уровень выпрямленного напряжения за счет изменения углов открытия тириستоров и использования секций вторичной обмотки тягового трансформатора.

При работе локомотива в режиме рекуперативного торможения мощность постоянного тока от тяговых двигателей, работающих в генераторном режиме, преобразуется в мощность переменного тока выпрямительно-инверторным преобразователем, работающим в этом случае в режиме инвертора. Напряжение переменного тока от ВИПа повышается до уровня напряжения контактной сети тяговым трансформатором. В режиме рекуперативного торможения на скоростях 50 – 70 км/ч все 12 тяговых электродвигателей вместе могут выдавать мощность постоянного тока около 9,6 МВт, но из-за ограничения максимального тормозного усилия на уровне 500 кН по соображениям безопасности трехсекционный электровоз может генерировать только 6,94 МВт мощности постоянного тока. Эффективная мощность, которая может быть возвращена в электросеть после инвертирования и преобразования, за вычетом энергии, затрачиваемой на собственные нужды локомотива и на возбуждение тяговых двигателей, составит около 4,5 МВт.

Максимальная величина уклонов проектируемой линии составляет 9 ‰. Используя формулу (1) из Правил тяговых расчетов для поездной работы, можно определить основное удельное сопротивление движению грузового поезда при расчетных скоростях 50 и 67 км/ч: 10,89 и 13,57 Н/т соответственно. Таким образом, при движении по уклону величиной 9 ‰ груженому поезду массой брутто 7100 т для поддержания постоянной скорости около 50 км/ч потребуется тормозное усилие 549,6 кН (таблица), а при скорости 67 км/ч – 530,5 кН. Для реализации такого тормозного усилия в пересчете на электроэнергию постоянного тока локомотив должен

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

генерировать около 6,9 – 9,3 МВт. Но из-за ограничений тормозной характеристики электро-воз будет генерировать только 6,6 – 8,0 МВт – дефицит тормозного усилия будет покрываться за счет применения пневматических тормозов поезда в сочетании с электродинамическим тормозом локомотива:

$$w_o'' = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785v + 0,027v^2}{q_o}, \text{ Н/т} \quad (1)$$

Расчеты для груженого поезда, идущего на спуск, выполнены в таблице с учетом затрат энергии на преодоление сопротивления движению поезда, что позволяет определить потребное тормозное усилие для поддержания установившейся скорости движения:

$$B_t = \frac{(i \cdot 9,81 - w_o'') \cdot Q}{1000}, \text{ кН}. \quad (2)$$

На уклонах малых величин (до 9 ‰) потребное тормозное усилие не будет попадать под ограничение 500 кН, установленное по соображениям безопасности движения, выше – вне зависимости от требуемого усилия локомотив сможет обеспечить тормозное усилие только 500 кН. Исходя из определения работы в механических системах можно определить для каждой величины уклона мгновенную мощность, реализуемую электродвигателями. После учета электрических потерь в тяговых двигателях, преобразователях и в трансформаторе, можно определить суммарный объем электрической энергии, возвращаемой при следовании поезда по участку с нормированным перепадом высот 100 м. Расчет для тяги порожнего поезда имеет аналогичную структуру:

$$N = B_t \cdot v, \text{ кВт}. \quad (3)$$

Энергетический расчет для груженных и порожних поездов при скорости 50 км/ч

Величина уклона, ‰	Потребное тормозное усилие, кН	Реализуемое тормозное усилие, кН	Мгновенная мощность торможения, кВт	Мгновенная мощность, возвращаемая в сеть, кВт	Возврат энергии на 100 м спуска, кВт · ч	Реализуемое тяговое усилие, кН	Потребление порожнего поезда на каждые 100 м подъема, кВт · ч	Энергетический баланс, кВт · ч	Общая экономия на 100 м спуска, млн руб.
Груженный поезд: масса – 7100 т; удельное сопротивление – 10,89 Н/т						Порожний поезд: масса – 1562 т; удельное сопротивление – 31,05 Н/т			
0,5	-42,5	-47,5	-659,8	-428,9	-1715,5	61,2	3999,6	-5715,1	-102,8
1	-7,6	-12,7	-176,1	-114,5	-228,9	68,9	2250,2	-2479,1	-44,6
2	62,0	57,0	791,3	751,7	751,7	84,2	1375,5	-623,8	-11,2
3	131,7	126,6	1758,6	1670,7	1113,8	99,5	1083,9	29,9	0,5
4	201,3	196,3	2726,0	2589,7	1294,9	114,8	938,1	356,7	6,4
6	340,6	335,6	4660,8	4427,7	1475,9	145,5	792,3	683,6	12,3
9	549,6	500,0	6944,4	6597,2	1466,0	191,4	695,1	770,9	13,9

Как видно из данных таблицы, для ведения по подъему величиной 9 ‰ порожнего поезда из 71 вагонов массой 22 т каждый с постоянной скоростью 50 км/ч требуется тяговое усилие около 191,4 кН. Мощность, потребляемая трехсекционным электровозом из энергосистемы в таком режиме движения, составит около 2,87 МВт. Таким образом, при скорости 50 км/ч пара груженных и порожних поездов имеет избыток энергии в любом случае при движении груженого поезда под уклон более 3 ‰ (рисунок 4).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таким образом, для рассматриваемой линии существует принципиальная возможность практически полностью покрыть затраты на тягу порожних поездов, идущих на подъем, за счет энергии, возвращаемой от локомотивов, движущихся под уклон с груженными поездами. Для уточнения режимов движения поездов и определения скоростей их движения были выполнены энергетические расчеты для тяговых и тормозных режимов движения груженых и порожних поездов на проектируемой линии.

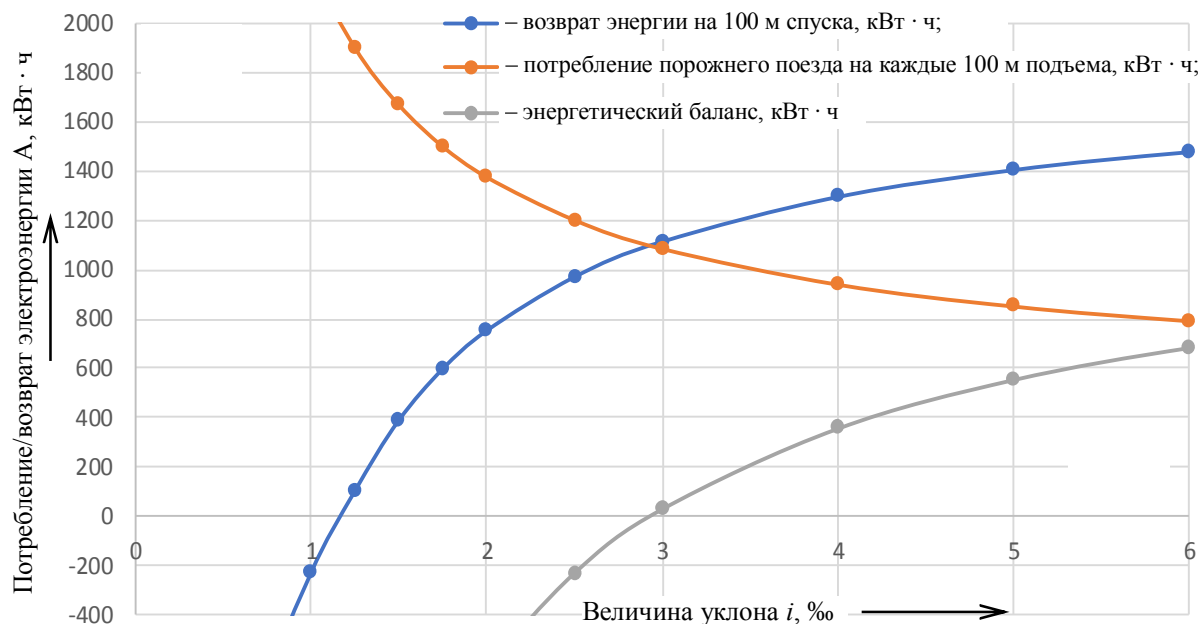


Рисунок 4 – Баланс потребляемой и рекуперированной энергии в зависимости от величины уклона (источник: автор)

С учетом технических характеристик электровоза ЗЭС5К часовая скорость составляет 49,9 км/ч, а скорость длительного режима – не менее 51 км/ч. Результаты тягового расчета подтвердили, что порожний поезд массой брутто 1562 т может поддерживать постоянную скорость около 70 км/ч на максимальном подъеме, используя лишь 50 % номинальной мощности электровоза ЗЭС5К. Таким образом, с технической точки зрения на первом этапе проектирования за расчетный диапазон скоростей на рассматриваемом участке можно принять скорости 50 – 67 км/ч.

Рекуперация на переменном токе с помощью преобразователей с зонно-фазовым алгоритмом управления приводит к тому, что значительная часть рекуперированной энергии возвращается в питающую сеть в моменты, когда лишь незначительная ее часть может расходоваться на тяговую мощность. Поэтому эффективность рекуперации на переменном токе с зонно-фазовым управлением очень далека от 100 % даже при движении одного поезда в тяговом режиме рядом с другим поездом в режиме рекуперативного торможения. Некоторые разработчики пытаются повысить эффективность системы тягового обеспечения путем внедрения различных корректоров коэффициента мощности [11] или путем изменения топологии питающей сети [12]. Однако при современном уровне техники наилучшая энергоэффективность может быть достигнута с использованием преобразователей 4q-S, которые обеспечивают практически синусоидальный ток в режимах потребления и рекуперации [13, 14]. При этом наилучшим способом использования рекуперированной энергии является обеспечение постоянного нахождения на одной и той же фазовой зоне не менее двух поездов, одного – движущегося под уклон, а другого – движущегося в подъем.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В связи с предполагаемой пропускной способностью линии около 30 – 45 млн т в год представляется целесообразным проектировать основную часть линии как однопутную для пропуска 16 – 23 груженных поездов в сутки. Электрифицированные однопутные железные дороги не редкость в России. По данным UIC Statistic общая протяженность электрифицированных путей в Российской Федерации на конец 2020 г. составила 44,255 км, из них 10,282 км – однопутные. Поскольку основная часть линии будет проходить по незаселенным районам, в настоящее время нет необходимости планировать множество станций или разъездов. Для обеспечения безопасности движения и для сокращения потерь времени и мощности при скрещении поездов наилучшим способом представляется строительство коротких, по 8 – 10 км, двухпутных вставок, обеспечивающих безостановочное скрещение поездов (рисунки 5 и 6).

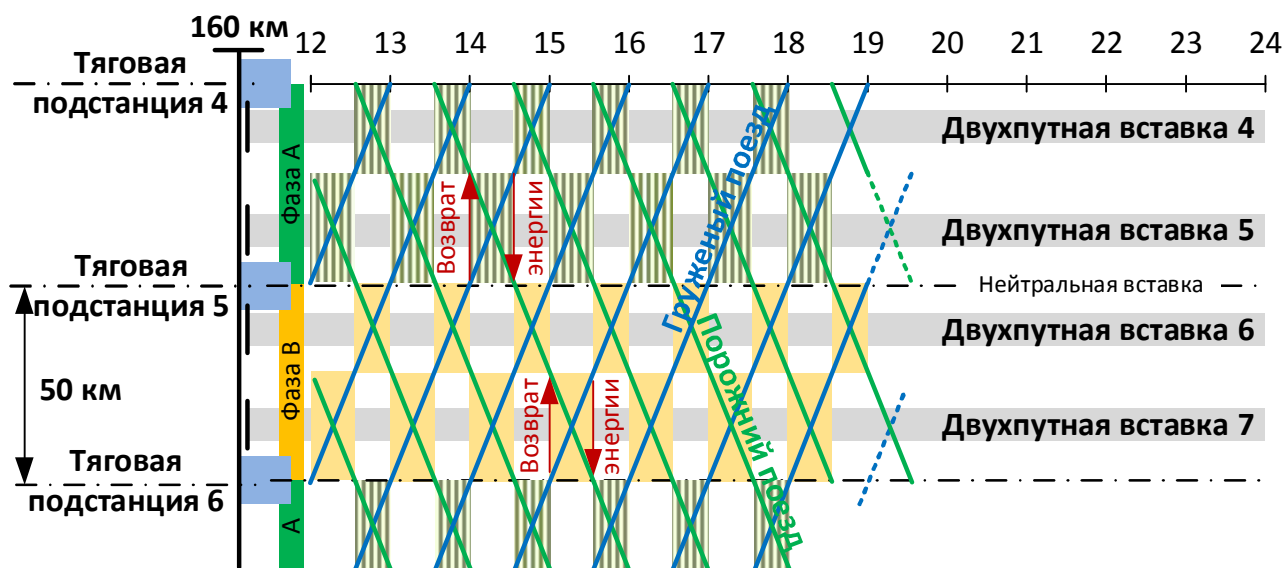


Рисунок 5 – Фрагмент графика движения при расчетной скорости 50 км/ч и межпоездном интервале 1 ч (источник: автор)

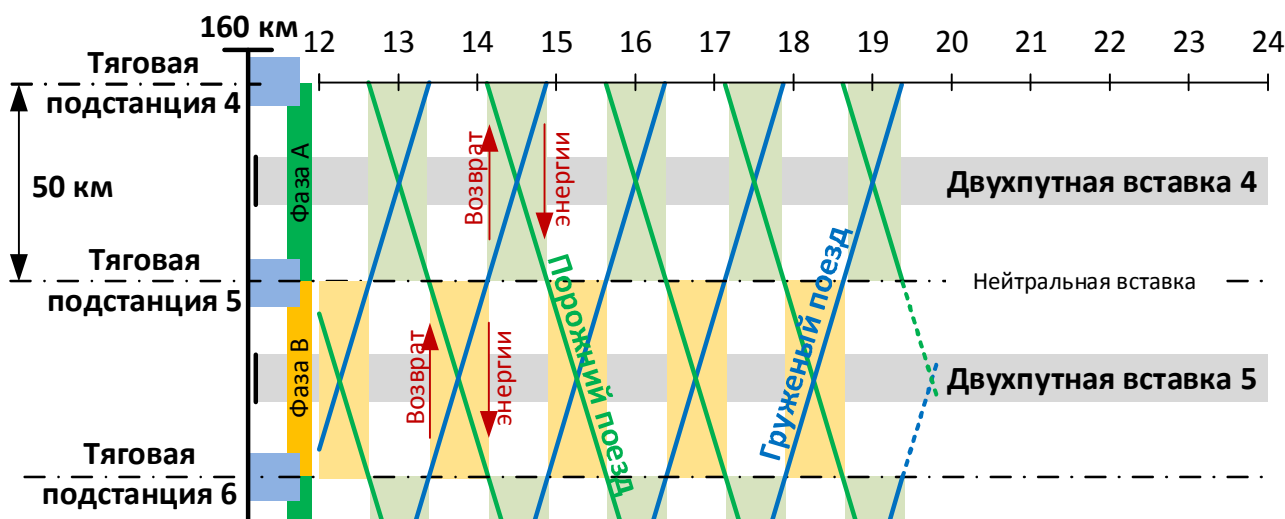


Рисунок 6 – Фрагмент графика движения при расчетной скорости 67 км/ч и межпоездном интервале 1,5 ч (источник: автор)

Проведенные расчеты наглядно показывают возможный эффект от использования рекуперативной энергии на проектируемой железнодорожной линии. Окупаемость инвестиций можно оценить, рассчитав потребность в энергии для подъема порожних поездов на высоту около 500 м над уровнем моря при движении на расстояние около 350 км. При использовании

электрической тяги для подъема одного порожнего вагона потребуется 160,4 МДж, что с учетом КПД электрической тяги 0,85 и стоимости электроэнергии 3,08 руб./кВт · ч дает общие годовые затраты около 66,95 млн руб. при пропуске 16 поездов в сутки. Этот относительно небольшой эффект можно соотнести с затратами на вождение поездов с применением дизельной тяги: учитывая теплотворную способность дизельного топлива 43,12 МДж/л, КПД дизельной тяги 0,27 и стоимость дизельного топлива 50 руб. за литр, для выполнения той же работы потребуется 285,67 млн руб. Это внушительная сумма для такой небольшой линии. При правильном проектировании системы электроснабжения участка с учетом необходимости передачи электроэнергии для питания груженых поездов, идущих на подъем (в среднем 120 м на 100 км пути), общий эффект от электрификации может быть значительно увеличен. Все приведенные выше расчеты учитывают только энергетические затраты и не включают в себя общую стоимость владения активами: инфраструктурой, вагонами и локомотивами. Объективно полное сравнение вариантов требует детальной оценки затрат на электрификацию линии и затрат на содержание инфраструктуры электроснабжения, пути и систем сигнализации. Однако и текущие результаты исследований раскрывают техническую и экономическую основу для последующих углубленных расчетов.

Оценивая возможные риски и значение потенциального экономического выигрыша при использовании электрической тяги, необходимо учитывать, что восточная часть БАМа в настоящее время использует тепловозную тягу, поэтому электрификация отдельного, относительно небольшого и изолированного участка железной дороги неизбежно вызовет определенные трудности в организации эксплуатационной работы, технического обслуживания и ремонта электровозов.

Заменить электротягу на автономные локомотивы с накопителями энергии при текущем уровне технологии непросто: несмотря на достаточно успешную гибридную энергетику с бортовыми накопителями для маневровых локомотивов и электропоездов, в настоящее время объемы запаасаемой энергии на борту тягового подвижного состава еще весьма далеки от тех объемов энергии, которые могут быть рекуперированы при движении груженого поезда по уклону в течение нескольких часов. Так, например, один из наиболее успешных современных магистральных аккумуляторных локомотивов, FLXdrive производства компании Wabtec, США, может накопить в бортовых батареях около 2,4 МВт · ч электроэнергии, в то время как на рассматриваемом участке за первые 100 км спуска объем рекуперированной энергии составит 7,8 МВт · ч. Возможно, что дальнейшее развитие гибридных локомотивов с бортовыми накопителями энергии позволит сохранять в бортовых накопителях десятки мегаватт-часов для повторного использования, но пока эффективность и ресурс таких батарей остаются достаточно низкими, и поэтому в настоящее время сложно предложить реальную альтернативу электрификации проектируемого участка.

Выбор вида тяги кроме очевидного энергетического выигрыша может оказать существенное влияние на развитие транспортной инфраструктуры региона, в котором будет строиться новая линия, а также повлиять на достижение требующихся от отрасли уровней снижения углеродного следа в ближайшем будущем. Рассматривая риски проектов электрификации БАМа и смежных линий с использованием действующего габарита подвижного состава магистральных железных дорог России, можно отметить один из неочевидных недостатков: электрификация фактически закрывает потенциальную возможность двухъярусных контейнерных перевозок, которая имеется на линиях с тепловозной тягой так, как это реализовано на североамериканских железных дорогах и в ряде других стран. Стандартная в России высота подвески контактного провода на участках переменного тока напряжением 25 кВ не может обеспечить достаточный зазор для безопасной двухъярусной перевозки контейнеров даже с использованием низкоуровневых платформ («платформа-колодез»), таких как платформа модели 13-3124 Брянского машиностроительного завода. С учетом заметного роста контейнеризации грузопотоков появление такого ограничения представляется весьма существенным и должно учитываться при отказе от тепловозной тяги.

Следуя мировым тенденциям, РЖД проводят реформы, предполагающие разделение собственника инфраструктуры, перевозчиков и операторов подвижного состава. В такой ситуации задачу электрификации участков железных дорог следует оценивать, как и в ряде стран Восточной Европы [15], как комплексный экономический проект с четкими для всех участников правилами, устанавливаемыми на длительный срок, сопоставимый со сроком возврата инвестиций в инфраструктуру и подвижной состав линии.

Как подтверждают проведенные расчеты, существует принципиальная возможность организации перевозок по проектируемому участку железной дороги с минимальным использованием энергии от внешних источников. Более того, используя электровазны новой постройки с асинхронным тяговым приводом и современными тяговыми преобразователями 4q-S, обеспечивающими возврат в сеть практически чистых синусоидальных напряжения и тока с высоким значением коэффициента мощности около 0,999, становится возможным резко повысить эффективность использования рекуперированной энергии. Приведенные в статье аргументы показывают технико-экономическую целесообразность строительства электрифицированной однопутной железной дороги с двухпутными вставками для пропуска 16 – 24 пар поездов в сутки с общей провозной способностью в груженом направлении до 30 – 45 млн т в год.

Эффективное использование рекуперативной энергии позволяет реализовать практически энергонезависимую транспортировку угля и генеральных грузов, что подтверждает важность этого фактора при выборе типа тяги для новых или реконструируемых линий.

Список литературы

1. Совещание с членами Правительства РФ 7 июля 2021 года – Президент России // kremlin.ru: сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/66160> (дата обращения: 20.09.2021).
2. Малышев, Ю. Н. Обращение главного редактора / Ю. Н. Малышев. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2021. – № 4. – С. 6–7. – URL: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4>.
3. International Energy Outlook 2021. Release date: October 6, 2021 / U.S. Energy Information Administration (EIA). // eia.gov: сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/> (дата обращения: 10.10.2021).
4. К вопросу транспортного развития Дальнего Востока России / М. Ю. Кейно, А. Р. Едигарян, Н. С. Нестерова, П. А. Оненко. – Текст : непосредственный // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2021. – № 9. – С. 5–17.
5. Статистика АМП, Охотского моря и Татарского пролива // ampvano.ru: сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://ampvano.ru/wp-content/uploads/2021/07/dinamika-gruzooborota-zal-polugodie-2021-goda.docx> (дата обращения: 09.08.2021).
6. Van Der Meulen D., Möller F. Sustainable heavy haul traction energy: A review of systemic issues. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2014, vol. 228, no. 6, pp. 687-694, <https://doi.org/10.1177/0954409714532793>.
7. Pei L., Lixing Y., Ziyu G., Yeran H., Shukai L., Yuan G. Energy-Efficient Train Timetable Optimization in the Subway System with Energy Storage Devices. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 1-17, <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2789910>.
8. Dingjun C., Sihan L., Junjie L., Shaoquan N., Xiaolong L. Optimal High-Speed Railway Timetable by Stop Schedule Adjustment for Energy-Saving. *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2019, Article ID 4213095, 9 pages, <https://doi.org/10.1155/2019/4213095>.
9. Douglas H., Roberts C., Hillmans S., Schmid F. An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 106, pp. 1149-1165, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.053>.
10. Gupta S.D., Tobin J.K., Pavel L. A two-step linear programming model for energy-efficient timetables in metro railway networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, vol. 93, pp. 57-74, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.07.003>.

11. Monjo L., Sainz L., Rull J. Statistical study of resonance in AC traction systems equipped with Steinmetz circuit. *Electric Power Systems Research*, 2013, vol. 103, pp. 223-232, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.05.014>.
12. Fathima F., Karthikeyan S.P. Harmonic analysis on various traction transformers in co-phase traction system. *Ain Shams Engineering Journal*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 627-638, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.06.004>.
13. Brenna M., Foadelli F., Roscia M., Zaninelli D. Current Distortion Evaluation in Traction 4Q Constant Switching Frequency Converters. *Journal Electromagnetic Analysis & Applications*, 2009, vol. 1, no. 3, pp. 129-137, <https://doi.org/10.4236/jemaa.2009.13021>.
14. Glyzin I.I., In'kov Y.M., Kuchumov V.A., Litovchenko V.V. Improving the Energy Efficiency of a Traction Network and Electric Rolling Stock of Alternating Current with a 4qS-Converter. *Russian Electrical Engineering*, 2019, vol. 90, no. 9, pp. 641-646, <https://doi.org/10.3103/S1068371219090050>.
15. Massel A. Operational criteria in the justification of electrification of railway lines. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 180, 06005, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818006005>.

References

1. *Soveshchanie s chlenami Pravitel'stva RF 7 iulija 2021 goda – Prezident Rossii* (Meeting with Government members July, 7 2021 – President of Russia). Available at: <http://kremlin.ru/events/president/news/66160> (accessed 20.09.2021).
2. Malyshev Yu. N. From the Editor. *Gornaia promyshlennost' – Mining Industry Journal*, 2021, no. 4, pp. 6-7. Available at: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4> (In Russian).
3. International Energy Outlook 2021. Release date: October 6, 2021 / U.S. Energy Information Administration (EIA). Available at: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/> (accessed 10.10.2021).
4. Keyno M.Yu., Edigarian A.R., Nesterova N.S., Onenko P.A. On the Issue of Transport Development of the Russian Far East. *Proektirovanie razvitiia regional'noi seti zheleznykh dorog – Designing the development of regional railroad networks*, 2021, no. 9, pp. 5-17 (In Russian).
5. *Statistika AMP, Okhotskogo moria i Tatarskogo proliva* (Statistic – Sea of Okhotsk and Tatar Strait). Available at: <http://ampvanino.ru/wp-content/uploads/2021/07/dinamika-gruzooborota-za-1-polugodie-2021-goda.docx> (accessed 09.08.2021).
6. Van Der Meulen D., Möller F. Sustainable heavy haul traction energy: A review of systemic issues. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2014, vol. 228, no. 6, pp. 687-694, <https://doi.org/10.1177/0954409714532793>.
7. Pei L., Lixing Y., Ziyu G., Yeran H., Shukai L., Yuan G. Energy-Efficient Train Timetable Optimization in the Subway System with Energy Storage Devices. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 1-17, <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2789910>.
8. Dingjun C., Sihan L., Junjie L., Shaoquan N., Xiaolong L. Optimal High-Speed Railway Timetable by Stop Schedule Adjustment for Energy-Saving. *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2019, Article ID 4213095, 9 pages, <https://doi.org/10.1155/2019/4213095>.
9. Douglas H., Roberts C., Hillmans S., Schmid F. An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 106, pp. 1149-1165, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.053>.
10. Gupta S.D., Tobin J.K., Pavel L. A two-step linear programming model for energy-efficient timetables in metro railway networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, vol. 93, pp. 57-74, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.07.003>.
11. Monjo L., Sainz L., Rull J. Statistical study of resonance in AC traction systems equipped with Steinmetz circuit. *Electric Power Systems Research*, 2013, vol. 103, pp. 223-232, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.05.014>.
12. Fathima F., Karthikeyan S.P. Harmonic analysis on various traction transformers in co-phase traction system. *Ain Shams Engineering Journal*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 627-638, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.06.004>.

13. Brenna M., Foiadelli F., Roscia M., Zaninelli D. Current Distortion Evaluation in Traction 4Q Constant Switching Frequency Converters. *Journal Electromagnetic Analysis & Applications*, 2009, vol. 1, no. 3, pp. 129-137, <https://doi.org/10.4236/jemaa.2009.13021>.

14. Glyzin I.I., In'kov Y.M., Kuchumov V.A., Litovchenko V.V. Improving the Energy Efficiency of a Traction Network and Electric Rolling Stock of Alternating Current with a 4qS-Converter. *Russian Electrical Engineering*, 2019, vol. 90, no. 9, pp. 641-646, <https://doi.org/10.3103/S1068371219090050>.

15. Massel A. Operational criteria in the justification of electrification of railway lines. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 180, 06005, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818006005>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кейно Максим Юрьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры «Транспорт железных дорог», ДВГУПС.

Тел.: +7 (421-2) 407-076.

E-mail: max@festu.khv.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Keyno Maxim Yurievich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

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

Senior lecturer of the department «Railroads Rolling Stock», FESTU.

Phone: +7 (421-2) 407-076.

E-mail: max@festu.khv.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кейно, М. Ю. Эффективность рекуперативного торможения как критерий выбора вида тяги для новых железных дорог / М. Ю. Кейно. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 32 – 43.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Keyno M.Yu. Recuperation efficiency as a key factor in choosing the type of traction for new railways. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 1 (49), pp. 32-43 (In Russian).

УДК 656.073(510):656.136

Р. Г. Король

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

ФОРМИРОВАНИЕ ПРИГРАНИЧНОЙ ТЕРМИНАЛЬНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА НАПРАВЛЕНИИ СУЙФЭНЬХЭ (КНР) – ГРОДЕКОВО (РФ)

Аннотация. В январе 2022 г. на российско-китайской границе образовалась очередь из двух тысяч автомобилей в ожидании пропуска через государственную границу [1]. Основными причинами скопления большого числа транспортных средств на пограничных пунктах пропуска являются ограничения по перемещению транспорта и груза в связи со сложной эпидемиологической обстановкой, отсутствие оперативного информационного взаимодействия транспортных организаций и контролирующих органов, недостаточная пропускная способность транспортной и терминально-логистической инфраструктуры. Грузоотправители переходят на отправку контейнеров железнодорожным транспортом, в том числе рассматривается вопрос контрейлерных перевозок. Холдинг ОАО «РЖД» в последние годы активно развивает логистический сервис по перевозке полуприцепов железнодорожным транспортом, в том числе в международном сообщении. Транспортировка грузов в контрейлерах из приграничных провинций Китайской Народной Республики в направлении северо-восточных регионов России, где слабо развита транспортная инфраструктура, сложные климатические условия и неритмичное транспортное сообщение, является эффективным способом доставки товаров для обеспечения бесперебойного снабжения населения региона. В рамках стратегии нового Шёлкового пути «Один пояс – один путь» можно организовать контрейлерные маршруты на направлении Суйфэньхэ – Гродеково – Нижний Бестях с формированием необходимой трансграничной терминально-логистической и транспортной инфраструктуры. Предметом данного исследования является анализ инфраструктуры железнодорожного пункта пропуска

«Пограничный» и технологических процессов организации международных контейнерных перевозок. Целью работы является разработка проекта инфраструктурного оснащения терминально-логистического комплекса железнодорожного пункта пропуска «Пограничный» для организации контейнерных перевозок. В данной работе использованы теоретические методы исследования, включая системный анализ и синтез информации. С помощью анализа количественных и качественных показателей, технологии работы и технического оснащения станции Гродеково были определены объекты терминально-логистической инфраструктуры и вопросы, которые требуют решения при осуществлении контейнерных перевозок. В статье представлены транспортно-технологические схемы доставки контейнеров, которые основаны на функционировании терминально-логистических комплексов, объединенных единым информационным пространством, а также рассмотрены элементы, влияющие на эффективность организации контейнерных перевозок. Специалисты транспортной отрасли прогнозируют дальнейшее увеличение объемов пропуска и перевалки грузов через дальневосточные транспортные коридоры, поэтому применение бесперегрузочных технологий транспортировки и реализации принципов «бесшовной» логистики потребуют реформатирования приграничной терминально-логистической инфраструктуры с внедрением цифровых сервисов взаимодействия участников международной перевозки.

Ключевые слова: контейнерные перевозки, терминально-логистическая инфраструктура, пограничные пункты пропуска.

Roman G. Korol

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

FORMATION OF A BORDER TERMINAL AND LOGISTICS INFRASTRUCTURE FOR THE ORGANIZATION OF PIGGYBACK TRANSPORTATION ON THE SUIFENHE (CHINA) – GRODEKOV (RUSSIA) ROUTE

Abstract. In January 2022, a line of 2,000 cars formed at the Russian-Chinese border, waiting to be allowed to cross the state border [1]. The main reasons for the accumulation of a large number of vehicles at border checkpoints are restrictions on the movement of vehicles and cargo due to the difficult epidemiological situation, the lack of operational information interaction between transport organizations and regulatory authorities, insufficient capacity of the transport and terminal and logistics infrastructure. Consignors are switching to sending containers by rail, including the issue of piggyback transportation. In recent years, Russian Railways Holding has been actively developing a logistics service for the transportation of semi-trailers by rail, including in international traffic. Transportation of goods in piggybackers from the border provinces of the People's Republic of China towards the northeastern regions of Russia, where the transport infrastructure is poorly developed, difficult climatic conditions and irregular transport links, is an effective way to deliver goods to ensure an uninterrupted supply of the population of the region. As part of the strategy of the new Silk Road «One Belt – One Road» one can organize piggyback routes in the direction of Suifenhe – Grodekovo – Nizhny Bestyakh with the formation of the necessary cross-border terminal, logistics and transport infrastructure. The subject of this study is the analysis of the infrastructure of the Pogranichny railway checkpoint and the technological processes for organizing international piggyback transportation. The aim of the work is to develop a project for the infrastructure equipment of the terminal and logistics complex of the Pogranichny railway checkpoint for the organization of piggyback transportation. This paper uses theoretical research methods, including system analysis and information synthesis. By analyzing quantitative and qualitative indicators, operating technology and technical equipment of the Grodekovo station, the objects of the terminal and logistics infrastructure and issues that need to be addressed in the implementation of piggyback transportation were identified. The article presents the transport and technological schemes for the delivery of piggybackers, which are based on the functioning of terminal and logistics complexes, united by a single information space, and also considers the elements that affect the efficiency of organizing piggyback transportation. Transport industry experts predict a further increase in the volume of passage and transshipment of goods through the Far Eastern transport corridors, so the use of non-reloading transportation technologies and the implementation of the principles of «seamless» logistics will require reformatting the border terminal and logistics infrastructure with the introduction of digital services for the interaction of participants in international transportation.

Keywords: piggyback transportation, terminal and logistics infrastructure, border checkpoints.

В период пандемии, за 2020 г., специалисты дальневосточной таможенной службы констатируют двукратное сокращение объемов перемещения внешнеторговых грузов через дальневосточные пограничные переходы – с 34,48 до 16,29 млн т [2]. Причиной уменьшения товарооборота являются ограничения, связанные с недопущением распространения коронавирусной инфекции COVID-19. В декабре 2021 г. было приостановлено международное сообщение на автомобильных пунктах пропуска Приморского края Полтавка – Дуннин, Турий Рог – Ми-

шань и Краскино из-за неблагоприятной эпидемиологической обстановки в приграничных городах Китая. Наиболее грузонапряженный многосторонний автомобильный пункт пропуска (МАПП) Забайкальск – Маньчжурия [3] был закрыт с китайской стороны по решению оперативного штаба по борьбе с эпидемией COVID-19 китайского города Маньчжурия. В результате приостановки деятельности основных автомобильных пунктов пропуска скопилось несколько сотен грузовых автомобилей на направлении Пограничный – Суйфэнхэ. При этом таможенные посты со стороны России работают в ожидании, что китайская сторона начнет прием транспорта и грузов. Основные причины скопления большегрузного транспорта на границе двух стран связаны с длительной процедурой тестирования на COVID-19 всех пересекающих границу, недостаточной пропускной способностью погранпереходов и несовершенством технологических процессов. Китайская сторона запрещает перевозчикам находиться на территории страны, поэтому водители оставляют автоприцеп, забирая его на следующий день, как следствие, это дополнительная загроможденность пунктов пропуска. Длительному ожиданию пропуска грузовых автомобилей способствуют также плохие погодные условия и досмотр сотрудниками таможенных органов широкой номенклатуры грузов. Из-за простоев автомобилей на границе в ожидании пропуска сроки доставки грузов из Китая увеличились в среднем на 20 дней и сейчас составляют более месяца.

По территории Дальневосточного округа проходит два международных транспортных коридора (МТК) – «Приморье-1» и «Приморье-2». По транспортным коридорам «Приморье-1» и «Приморье-2» в 2019 г. было перевезено более 6,5 тыс. контейнеров (ДФЭ) общим весом 167,8 тыс. т, что в 1,8 раза больше, чем за аналогичный период 2018 г. [4]. С начала 2020 г. объем транзитных грузоперевозок через МТК «Приморье-2» вырос на 64,8 %, что положительно повлияло на инвестиционное развитие. Пандемия COVID-19 и введенные ограничения внесли серьезные корректировки в функционирование пограничных переходов и транспортных компаний, в результате за 2020 г. в рамках двух международных транспортных коридоров южного Приморья было перевезено 3733 контейнера. При этом по МТК «Приморье-1» к 2030 г. специалисты оценивают потенциальный дополнительный объем перевозок в размере 7 млн т контейнерных грузов и 5 млн т зерновых, по МТК «Приморье-2» грузопоток может достигнуть 23 млн т зерновых (пшеница, соя, рис) и 15 млн т контейнерных грузов [4].

Пограничный переход «Пограничный» является основным элементом международного транспортного коридора «Приморье-1» [5], который через Китайско-Восточную железную дорогу, соединяет города провинции Хэйлунцзян с дальневосточными морскими портами России. МТК «Приморье-1» включает в себя следующее:

автомобильно-дорожную инфраструктуру – МАПП «Пограничный» и двусторонний автомобильный пункт пропуска (ДАПП) «Полтавка», автомобильные дороги, пролегающие от российско-китайской государственной границы до морских портов Владивосток, Находка и Восточный;

железнодорожную инфраструктуру – пограничную станцию Гродеково, железнодорожный пункт пропуска (ЖДПП) «Пограничный», железнодорожные линии Гродеково – Владивосток, Гродеково – Находка и Гродеково – Восточный;

терминально-логистическую инфраструктуру – складские объекты и контейнерные терминалы, расположенные на территории пунктов пропуска и в транспортных узлах, а также пункты пропуска в морских портах.

По данным Дальневосточного таможенного управления проектная пропускная способность пункта пропуска «Пограничный» в сутки составляет 100 транспортных средств в оба направления. Двусторонний автомобильный пункт пропуска «Полтавка» расположен на направлении МТК «Приморье-1» и выполняет функцию вспомогательного, компенсируя недостаточную пропускную способность пассажирского направления МАПП «Пограничный». По данным сайта Дальневосточного таможенного управления проектная пропускная способность данного пункта пропуска в сутки составляет 110 транспортных средств в оба направления (55 из РФ, 55 из КНР).

Пропускная способность ЖДПП «Пограничный» составляет 32 грузовых состава, четыре пассажирских поезда в сутки. В состав многостороннего пункта пропуска входят (рисунок 1) грузовая межгосударственная передаточная внеклассная станция Гродеково, участковая станция 3-го класса Гродеково II, две промежуточные станции 5-го класса Сосновая Падь и Рассыпная Падь [6].



Рисунок 1 – Расположение объектов транспортной инфраструктуры пункта пропуска «Пограничный»

Железнодорожная станция Гродеково по характеру работы является грузовой межгосударственной передаточной и отнесена к категории «внеклассная», расположена на однопутном участке Уссурийск – Гродеково и на однопутном участке совмещенной колеи Гродеково – Суйфэнхэ. Импортные грузы, прибывающие из КНР на станцию Гродеково в вагонах колеи 1435 мм, перегружаются в вагоны колеи 1520 мм и выдаются из вагонов китайской железной дороги (КЖД) на автотранспорт на специализированных по роду груза перегрузочных местах.

Долевое распределение экспортных и импортных грузов за 2021 г. через железнодорожный пункт пропуска «Пограничный» приведено на рисунке 2.

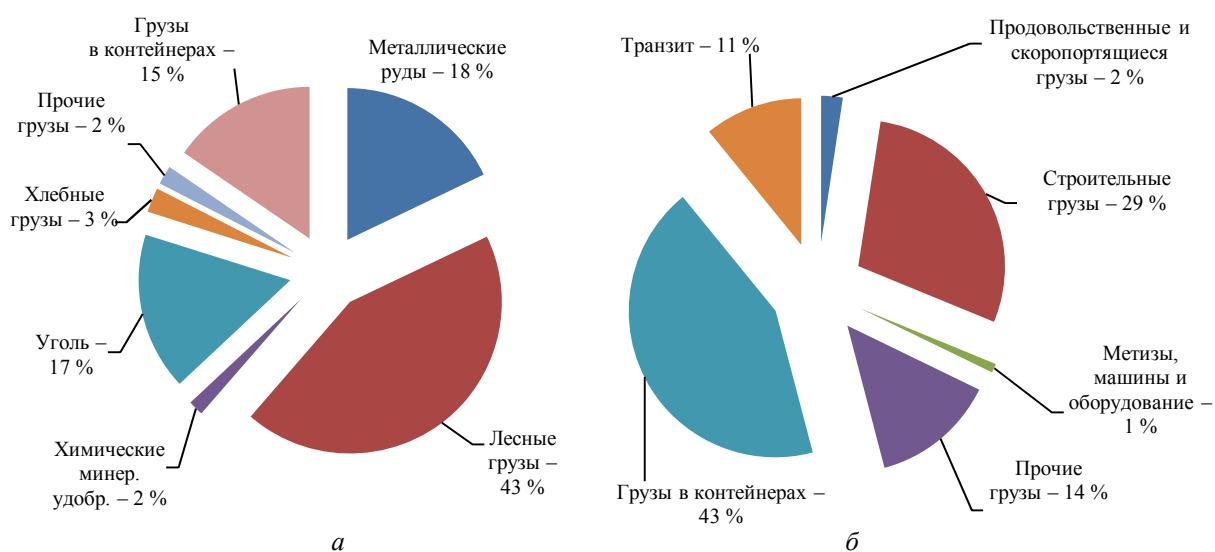


Рисунок 2 – Долевое распределение экспортных (а) и импортных (б) грузов через ЖДПП «Пограничный» за 2021 г.

Согласно долевому распределению внешнеторговых грузов за 2021 г. (см. рисунок 2), наибольший объем экспортных грузов составляют лесные грузы (43 %), уголь (17 %), металлические руды (18 %), наибольший объем импортных грузов составляют грузы в контейнерах (43 %) и строительные грузы (29 %).

За 2021 г. через ЖДПП «Пограничный» в Китай было отправлено порядка 132 тыс. вагонов с экспортными грузами (более 8,07 млн т), что меньше доковидного уровня 2019 г. на 2,24 млн т. Вырос объем экспортных перевозок грузов в контейнерах с 179,6 тыс. т в 2019 г. до 813,9 тыс. т в 2021 г., по остальной номенклатуре грузов произошло снижение объемов экспорта. Из КНР в Россию в 2021 г. через ЖДПП «Пограничный» было ввезено 6076 вагонов с импортными грузами (178266 т), что превышает уровень 2019 г. на 1588 вагонов. Транзит составил 662 вагона, включая 499 вагонов в рамках транспортного коридора «Приморье-1». Вырос объем импортных перевозок строительных материалов (+33270 т) и грузов в контейнерах (+19810 т).

Стратегия социально-экономического развития Приморского края до 2025 г. предполагает модернизацию пограничного перехода Гродеково – Суйфэньхэ, включая комплексное развитие железнодорожной инфраструктуры, увеличение перерабатывающей способности терминально-логистического комплекса до 32 млн т грузов и обеспечение пропуска 3,5 млн пассажиров в год [7].

Положительная динамика развития внешнеторговых отношений между Российской Федерацией и Китайской Народной Республикой является основным фактором развития перегрузочного комплекса на станции Гродеково. Китай в рамках стратегии нового Шелкового пути «Один пояс – один путь» продвигает бесперегрузочные технологии транспортировки товаров с внедрением принципов «бесшовной» логистики, соответственно необходимо перестроить приграничную терминально-логистическую инфраструктуру под новые вызовы и совершенствовать технологические процессы [8].

Сложная обстановка на пограничных переходах, связанная с пропуском автомобильного транспорта через государственную границу, переориентировала грузоотправителей на отправку грузов в контейнерах железнодорожным транспортом, в том числе рассматривается вопрос контрейлерных перевозок [9]. Организация транспортировки грузов с помощью контрейлеров в направлении северо-восточных регионов России является перспективным направлением развития транспортно-логистического сервиса.

Территория Республики Саха (Якутия) имеет сложную пространственную организацию и включает в себя освоенные и слабо освоенные районы с неразвитой транспортной и производственной инфраструктурой. 91,8 % территории республики находится в зоне сезонного транспортного обслуживания. В отдаленные северные и арктические районы республики основной объем груза завозится в короткий навигационный период, в летние месяцы, речным транспортом по реке Лена и далее распределение груза происходит с помощью автомобильного транспорта до населенных пунктов по всей республике. Неритмичное транспортное сообщение, ограниченная пропускная способность и неудовлетворительное состояние автомобильных дорог, слабое развитие придорожной инфраструктуры и тяжелые климатические условия способствуют организации доставки товаров контрейлерными маршрутами для обеспечения бесперебойного снабжения населения республики.

Для грузоотправителей и грузополучателей контрейлерные перевозки дают следующие преимущества [10]:

- ускорение доставки груза за счет исключения части грузовых операций;
- сокращение времени простоя тягача и водителя, исключение переработки водителей;
- снижение расходов по простоям транспорта, сокращение пробега автомобилей и затрат на топливо;
- повышение сохранности грузов и автомобильного подвижного состава;
- стабильность отправок и надежность доставки (железнодорожный транспорт менее зависим от погодных условий, чем автотранспорт);

– контрейлерные перевозки являются альтернативным способом доставки товаров при введении ограничений на движение грузовых автомобилей.

Транспортно-логистическое решение по перевозке грузов контрейлерами позволит клиентам сократить совокупные затраты на транспортировку, снизить нагрузку на автомобильные дороги и минимизировать негативное воздействие на экологию рассматриваемого региона. В развитых западных странах в стратегических документах прописано развитие интермодальных перевозок и специализированной терминально-логистической инфраструктуры с целью более рационального и эффективного использования производственных ресурсов транспорта, привлечения дополнительных грузопотоков и экономического стимулирования организации единой транспортной системы. Начиная с середины прошлого столетия в США были разработаны различные технологии контейнерных и контрейлерных перевозок, включая специализированный подвижной состав, опорные и комплексные терминалы национального значения и пункты консолидации. На европейском рынке транспортно-логистических услуг контрейлерные перевозки реализуют концепцию «зеленая логистика» путем внедрения современных технологий («бегущее колесо», «Modalohr», «Flexiwaggon», «Megaswing», «CargoSpeed» и «Cargo Beamer») и интеграции контрейлерных терминалов в единую сеть [11]. В Китае на национальном уровне происходит активное наращивание производственной мощности транспортной системы страны, особенно в сфере интермодальных перевозок. Транспортная инфраструктура КНР имеет непропорциональное развитие относительно пространственного размещения – в северных провинциях слабее развита инфраструктура, чем в южных провинциях, где размещены основное промышленное производство и крупные городские агломерации. АО «Первый федеральный контрейлерный оператор» планирует запустить контрейлерный маршрут в 2022 г. с погрузкой в Китае и следованием транзитом через пункты пропуска Гродеково и Забайкальск. В настоящее время китайская сторона не готова к осуществлению контрейлерных перевозок, так как не имеет соответствующей терминально-логистической инфраструктуры, технологий и нормативно-правового обеспечения. Транспортные компании КНР при создании необходимых инфраструктурных условий заинтересованы в контрейлерном сервисе и развитии данного сегмента перевозок.

В 2021 г. состоялась первая контрейлерная перевозка на Дальневосточной железной дороге и отправка товаров народного потребления в контрейлерах по направлению станция Угольная – станция Силикатная Московской железной дороги [12]. Дальневосточный центр фирменного транспортного обслуживания (ЦФТО) провел маркетинговое исследование востребованности сервиса контрейлерных перевозок, результаты данного исследования показали, что грузоотправители заинтересованы в перевозке грузов контрейлерами на расстояние свыше 3000 км. Центр продаж услуг Дальневосточного ЦФТО продолжает работу по развитию и внедрению сервиса перевозки сборных грузов с использованием контрейлерных платформ. В качестве перспективных направлений организации контрейлерных перевозок рассматривается доставка запасных частей для грузовых и легковых автомобилей из Китая (Суйфэньхэ – Гродеково) в западные регионы России [13].

Согласно стратегическим предпосылкам развития Якутского транспортно-логистического узла Республики Саха (Якутия) до 2032 г. и заявкам с предложениями от грузоотправителей, направляемых в Центр продаж услуг Дальневосточного ЦФТО, составлен график (рисунок 3), где приведены планируемые объемы ввоза и перспективные значения контрейлернопригодных грузов, поступающих из Китая через пограничный переход Гродеково.

На направлении Гродеково – Суйфэньхэ можно организовать несопровождаемые контрейлерные перевозки в виде перевозки автомобильных полуприцепов на контейнерно-контрейлерных платформах, что позволит в обратном направлении загружать подвижной состав контейнерами, снижая порожний пробег вагонов. Возможна реализация нескольких транспортно-технологических схем организации контрейлерных перевозок на направлении Суйфэньхэ – Гродеково – Нижний Бестях (рисунок 4).

1. Грузные российские автомобили после пересечения государственной границы Российской Федерации и прохождения таможенного досмотра на АПП «Пограничный» и «Турый Рог» следуют до терминально-логистического комплекса (ТЛК), где производится накопление контейнеров на состав с дальнейшей погрузкой на специализированную платформу. Далее контейнерный поезд следует до станции Нижний Бестях, которая обслуживает ТЛК. После выгрузки контейнеров на площадку ТЛК автотранспорт следует до пристани речного порта Нижний Бестях для погрузки на паром и перевозки через реку Лена до пристани речного порта города Якутск с окончанием маршрута на ТЛК. В зимний период движение автомобилей от Нижнего Бестяха до Якутска осуществляется по ледовой переправе через реку Лена.

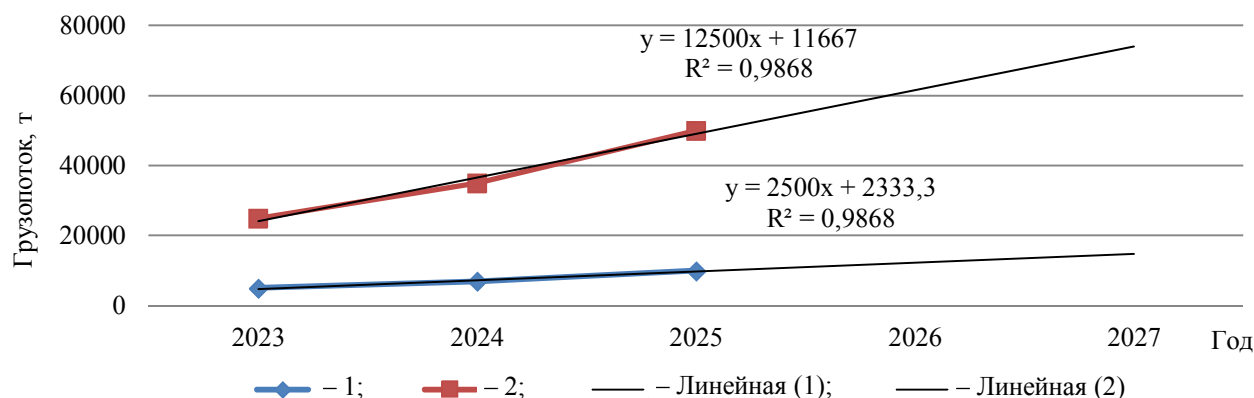


Рисунок 3 – Динамика изменения грузопотоков и прогнозирование:

1 – электрические машины и оборудование; 2 – машины, оборудование, инструменты, комплектующие

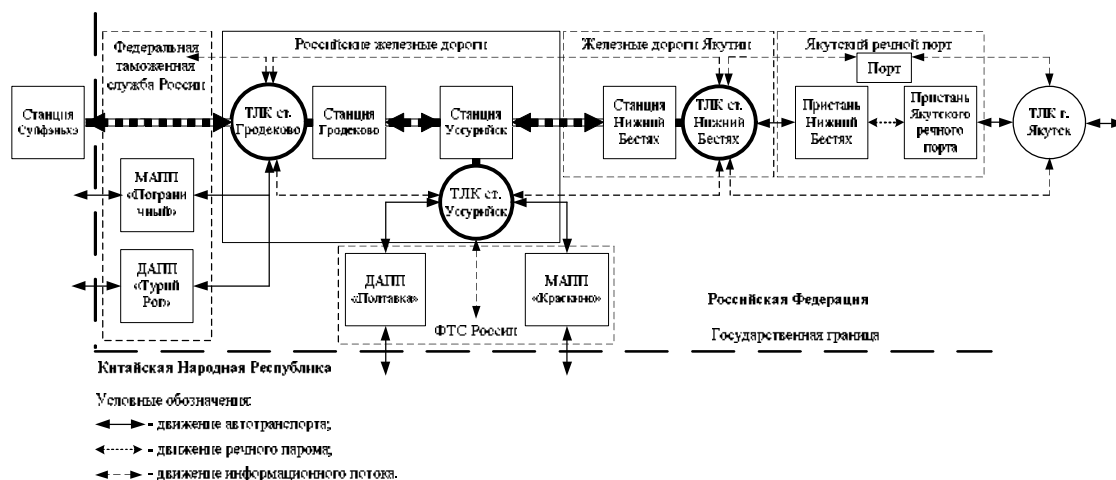


Рисунок 4 – Транспортно-технологические схемы перевозки контейнеров на направлении КНР – Гродеково – Уссурийск – Якутск

2. Железнодорожный подвижной состав с грузными контейнерами следует со станции Суйфэньхэ (КНР) до станции Гродеково, время следования поезда на участке Суйфэньхэ – Гродеково составит 1,5 – 2 ч. В состав поезда могут быть включены платформы с контейнерами. Прибывший поезд предъявляется для таможенного досмотра [6], в случае выявления нарушений таможенного оформления отдельные вагоны с контейнерами переставляются для досмотра на пути ТЛК станции Гродеково. При формировании полносоставного контейнерного маршрута назначением на станцию Нижний Бестях дополнительно включаются вагоны с контейнерами, которые поступили через автомобильные пункты пропуска (АПП) и находились на терминале станции Гродеково. Последовательность дальнейших транспортных операций описана в п. 1.

3. Контрейлерный терминал станции Гродеково может являться спутником терминально-логистического центра станции Уссурийск. Контрейлерный спутник станции Гродеково осуществляет накопление контрейлеров, поступающих автотранспортом и железной дорогой, складскую обработку грузов, таможенное оформление, работу с грузоотправителями КНР и формирование фидерных маршрутов на участке Гродеково – Уссурийск. На территории ТЛК станции Уссурийск происходит накопление контрейлеров, прибывающих с АПП «Полтавка» и «Краскино», для формирования контрейлерного маршрута из вагонов, прибывших в составе фидерного поезда со станции Гродеково и вагонов с контрейлерами, которые были погружены на терминале станции Уссурийск. Сформированный контрейлерный поезд транзитом следует до станции Нижний Бестях, где происходит выгрузка контрейлеров и передача автотранспортной компании для доставки груза до города Якутск.

Разработанные транспортно-технологические схемы доставки контрейлеров основаны на функционировании терминально-логистических комплексов, объединенных единым информационным пространством (см. рисунок 4) [14]. ТЛК станции Гродеково, как современный пограничный терминал, технологически связан со складами временного хранения автомобильных пунктов пропуска и ТЛК станции Нижний Бестях, который является потенциальным узлом распыления грузов по Республике Саха (Якутия), а также с ТЛК станции Уссурийск, как с центром консолидации грузов в направлении международных коридоров «Приморье-1» и «Приморье-2».

Современные мультимодальные терминально-логистические комплексы, организующие и обеспечивающие эффективную транспортировку грузов в контрейлерах, должны отвечать требованиям, представленным на рисунке 5. Внедрение инновационных технологий в области транспортной логистики напрямую связано с уровнем развития цифровых инструментов контроля и поддержки принятия решений при организации транспортировки контрейлеров [15]. Дисбаланс в развитии технологии и имеющейся инфраструктуры приводит к нестабильному функционированию пограничных пунктов пропуска и, как следствие, к возникновению длительного простоя транспортных средств в ожидании таможенных операций и негативному отношению иностранных грузоотправителей к российской транспортной системе. Пропускная способность транспортной инфраструктуры и перерабатывающая способность терминально-логистической инфраструктуры должны иметь пропорциональную степень развития, модернизация и создание новой инфраструктуры должны происходить комплексно с учетом технического оснащения грузовых и пограничных пунктов пропуска, а также при взаимодействии с таможенными органами.

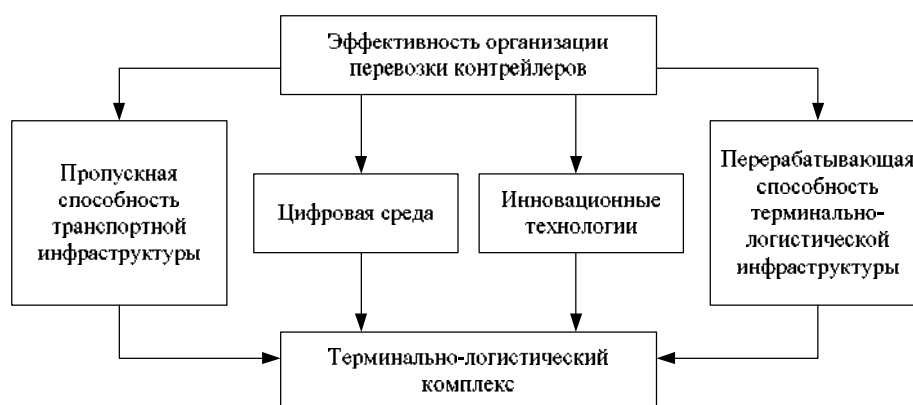


Рисунок 5 – Элементы, влияющие на эффективность организации контейнерных перевозок

Ключевым фактором, влияющим на время выполнения транспортных и грузовых операций и, соответственно, на время доставки контрейлера, является степень развития терминально-логистической инфраструктуры в начальных и конечных пунктах, а также на грузовых объектах пограничных станций при перевозке контрейлеров в международном сообщении.

Перерабатывающая способность терминально-логистической инфраструктуры должна быть достаточной для своевременного приема, отправки и переработки всех поступающих грузов и контейнеров [16].

Терминально-логистические комплексы, обслуживающие контейнерные перевозки, включают в себя, как правило, следующие технологические участки: зону въезда-выезда автотранспорта с площадкой досмотра, зону ожидания и накопления транспортных средств, зону грузовых операций, административно-бытовые здания, контрольно-пропускные пункты с системой видеоконтроля, складские объекты и дорожную инфраструктуру [17].

Для организации железнодорожных контейнерных перевозок площадки терминально-логистических комплексов, на которых выполняются грузовые операции с контейнерами, должны быть открыты по параграфу «К» (прием и выдача грузов, перевозимых контейнерными отправлениями) и должны иметь соответствующее инфраструктурное и техническое оснащение. На Дальневосточной железной дороге данным требованиям соответствуют станции Угольная, Уссурийск и Гайдамак. Грузовые дворы перечисленных станций имеют терминалы, оборудованные контейнерными перегружателями – ричстакерами – со специализированными насадками для выполнения погрузочно-разгрузочных работ с контейнерами.

На территории ТЛК станции Гродеково грузовые операции с контейнерами можно производить на тупиковом пути № 58 перегрузочного места № 9 (рисунок 6). Перегрузочное место № 9 специализируется на перегрузе тяжеловесных грузов, техники, оборудования и контейнеров, погрузке-выгрузке и длительном хранении крупнотоннажных контейнеров, также производится перегрузка груза из вагонов колеи 1520 и 1435 мм на автомобильный транспорт. Рядом с предполагаемым местом размещения контейнерной площадки имеется склад временного хранения, где возможно проведение таможенного контроля с выгрузкой товаров из контейнеров.

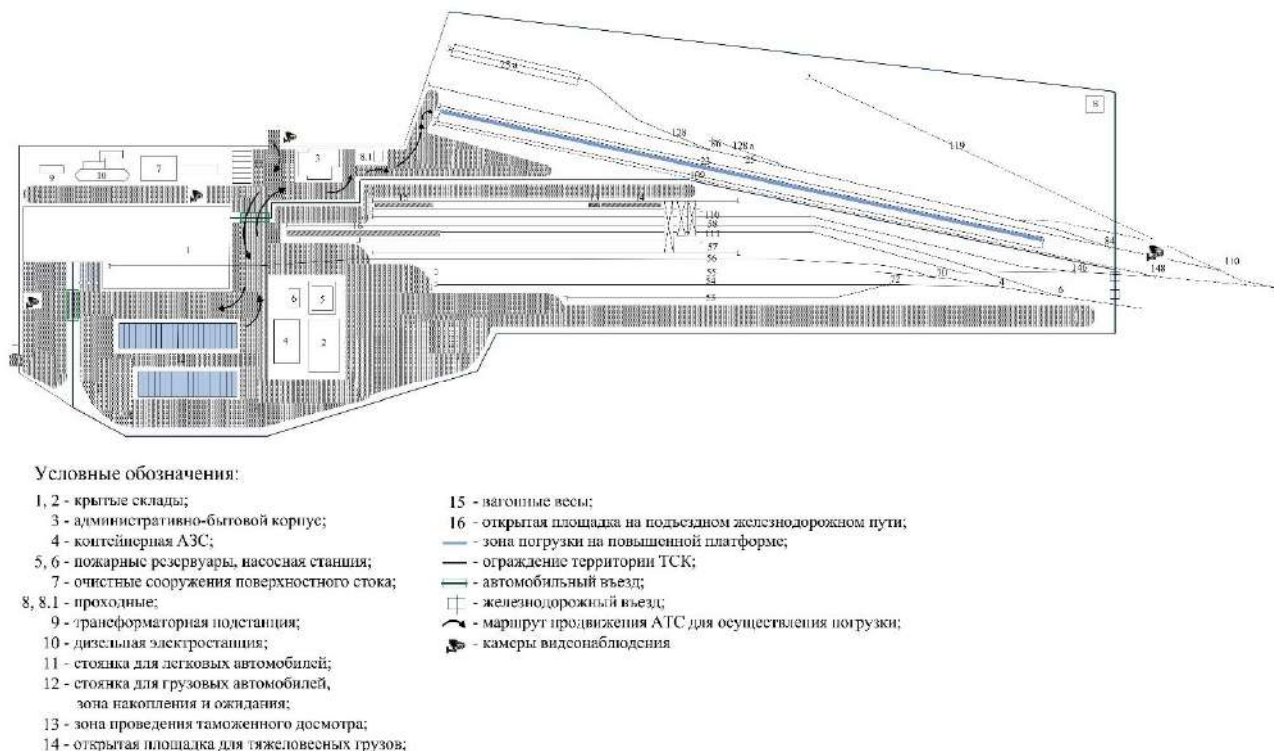


Рисунок 6 – Схема терминально-логистического комплекса станции Гродеково для организации контейнерных перевозок

Для осуществления перевозки контейнеров железнодорожным транспортом на направлении Суйфэньхэ – Гродеково необходимо осуществить следующие мероприятия:

- 1) проверить соблюдение контейнерного габарита на пути следования вагонов с контейнерами, на рассматриваемом участке железной дороги имеется пять тоннелей;
- 2) обеспечить возможность проведения таможенного досмотра с выгрузкой груза из контейнеров на складе временного хранения ТЛК станции Гродеково;
- 3) открыть станцию Гродеково по параграфу «К» для работы с грузами, перевозимыми контейнерными отправлениями;
- 4) произвести реконструкцию погрузочно-выгрузочного пути № 58, установить аппарат для погрузки и выгрузки контейнеров на железнодорожный подвижной состав, приобрести терминальные тягачи.

Актуальным остается вопрос законодательного сопровождения организации международных контейнерных перевозок, заключающийся в отсутствии нормативно-правовой базы по оформлению контейнера с грузом как транспортной единицы, поэтому перемещение контейнера через государственную границу возможно только в статусе груза с соответствующими таможенными процедурами, включая снятие полуприцепа с платформы. В 2020 г. состоялись международные перевозки контейнеров со станции Электроугли до порта Травемюнде и порта Росток в Германии [18], этот маршрут позволил протестировать «Временный порядок совершения таможенных операций и проведения таможенного контроля в отношении товаров и транспортных средств при осуществлении международных контейнерных перевозок», разработанный Федеральной таможенной службой (ФТС) России [12].

В целях увеличения объемов перевозки внешнеторговых грузов и повышения эффективности транспортно-логистических процессов на пограничных железнодорожных станциях Гродеково и Суйфэньхэ реализуются мероприятия по увеличению их пропускной способности. Руководство Китая рассматривает возможность перевода на круглосуточный режим работы близлежащих пунктов пропуска в Суйфэньхэ и Хуньчуне. Правительством РФ совместно с холдингом ОАО «РЖД» разрабатываются мероприятия, направленные на развитие и модернизацию путевого хозяйства на приграничных станциях и прилегающих перегонах, внедрение современных технических средств и инновационных технологий, также рассматривается переход на круглосуточный режим работы пунктов пропуска в Пограничном и Краскино.

Развитие пропускной способности пограничных пунктов пропуска заключается в следующем:

расширение сферы информационного взаимодействия, включая реализацию механизма «единое окно» и предварительное информирование таможенных органов;

использование современных технических средств контроля (инспекционно-досмотровый комплекс);

внедрение инновационных технологических систем дистанционного осмотра, позволяющих исключить нахождение сотрудников таможни в пунктах пропуска.

На пограничных железнодорожных станциях, имеющих различную ширину колеи, для ускорения технологических процессов обработки подвижного состава необходимо создание новой конструкции транспортной инфраструктуры и использование цифровых технологий, что позволит исключить бумажный документооборот и минимизировать продолжительность административных процедур. Организация контейнерных перевозок – это реализация принципов беспилотной транспортировки грузов путем объединения полуприцепов в единый железнодорожный состав. Важным фактором развития контейнерных перевозок является конкурентная стоимость транспортировки полуприцепов относительно доставки грузов в контейнерах [19]. Развитие сегмента транспортных услуг по организации контейнерных перевозок, применение инновационных технологий, привлечение дополнительных объемов грузов и новых клиентов на железнодорожный транспорт возможны при развитии терминально-ло-

гистической инфраструктуры и заинтересованности ведущих участников логистического рынка.

В 2022 г. из-за нестабильной политической и экономической обстановки в Средней Азии, введения новых эпидемиологических ограничений и при этом увеличения объемов потребления сырья и отправки готовой продукции промышленными предприятиями Азиатско-Тихоокеанского региона прогнозируется дополнительный грузопоток через дальневосточные транспортные узлы и пограничные пункты пропуска. Возникает ряд вопросов по рационализации использования существующей инфраструктуры и технических средств пунктов пропуска, их загрузки и резервам пропускной способности, а также взаимодействия видов транспорта при организации международных перевозок [20]. С помощью разработанной программы имитационного моделирования [21] ведется исследование эффективности функционирования существующей терминально-логистической инфраструктуры пограничных пунктов пропуска Дальнего Востока с разработкой соответствующих решений.

Список литературы

1. Кузьмина, В. Отбирают обороты: очереди на пересечение границы с КНР ждут более 2 тыс. фур // iz.ru: Известия. – Текст : электронный. – URL: <https://iz.ru/1278960/vera-kuzmina/otbiraiut-oboroty-ocheredi-na-peresechenie-granitsy-s-kr-zhdut-bolshe-2-tys-fur> (дата обращения: 19.01.2022).
2. Мальцева, Я. «Ковид» больно ударил по экспорту и импорту Дальнего Востока – товарооборот снизился на 22 % // V1.ru: Новости Владивостока. – Текст : электронный. – URL: <https://www.newsv1.ru/economics/2020/10/23/194051/> (дата обращения: 15.01.2022).
3. Евсеева, Ю. В. Реализация приграничного потенциала Забайкальского края за счет контейнерных перевозок / Ю. В. Евсеева, К. А. Кирпичников. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2017. – Т. 1. – С. 144–147.
4. МТК «Приморье-1» и «Приморье-2». Тенденции и развитие // novelco.ru: Блог. – Текст : электронный. – URL: <https://novelco.ru/press-tsentr/mtk-primore-1-i-primore-2-tendentsii-razvitiya/> (дата обращения: 15.01.2022).
5. Формирование транспортных коридоров на направлении Восток – Запад / А. Н. Рахмангулов, Н. А. Осинцев, О. А. Копылова, Д. С. Муравьев. – Текст : непосредственный // Информационные и интеллектуальные технологии на транспорте (ИИТ'2018) : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Липецк : Липецкий гос. техн. ун-т, 2018. – Т. 2. – С. 245–253.
6. Мельникова, В. Н. Совершенствование технологии таможенного досмотра грузов на станции Гродеково / В. Н. Мельникова, Р. Г. Король. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2016. – Т. 1. – С. 183–186.
7. Король, Р. Г. Интеграция российской транспортно-логистической инфраструктуры в реализации нового Шелкового пути «Один пояс – один путь» / Р. Г. Король, А. Е. Демидова. – Текст : непосредственный // Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике и инфокоммуникациях : труды всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Хабаровск : Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 100–105.
8. Чэнь, Цюцзе. Китайский и российский транспортные коридоры и инициатива «Один пояс – один путь»: перспективы китайско-российского сотрудничества / Цюцзе Чэнь. – Текст : непосредственный // R-Economy. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 100–110.
9. Ковалев, Г. А. Развитие контейнерных железнодорожных перевозок из Китая в Европу с использованием транзита / Г. А. Ковалев, О. Н. Числов, Е. Е. Супрун. – Текст : непосредственный // Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 121–125.

10. Пацев, Ю. П. Развитие контейнерных перевозок на рынке транспортных услуг в Российской Федерации / Ю. П. Пацев, А. В. Петров. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту. – 2019. – № 1. – С. 240–242.
11. Скорченко, М. Ю. Зарубежный опыт организации регулярного контейнерного сообщения / М. Ю. Скорченко. – Текст : непосредственный // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 19–42.
12. Волков, С. Первая мультимодальная контейнерная перевозка. Маршрут через три государства и тремя видами транспорта / С. Волков // Gudok.ru: Транспортный портал. – Текст : электронный. – URL: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1581416/> (дата обращения: 20.01.2022).
13. Лахметкина, Н. Ю. Организация контейнерных перевозок на направлении Калининград – Москва / Н. Ю. Лахметкина, А. С. Заворотынский. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2021. – № 8. – С. 43–46.
14. Покровская, О. Д. Моделирование системы организации перевозочного процесса через терминальную сеть / О. Д. Покровская. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 118–130.
15. Методы формирования и принципы интеллектуализации в управлении терминально-складской системой транспортного узла / О. Н. Числов, В. В. Трапенов, В. В. Алабина, М. В. Бакалов. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 104–114.
16. Резер, С. М. Развитие контейнерных и контейнерных перевозок в России и в международных сообщениях на основе терминально-логистических центров / С. М. Резер. – Текст : непосредственный // Интегрированная логистика. – 2016. – № 5. – С. 7–9.
17. Скорченко, М. Ю. Состояние и перспективы контейнерных перевозок в Российской Федерации / М. Ю. Скорченко. – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4 (47). – НЭБ Elibrary.ru. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_32731172_69638955.pdf (дата обращения: 19.01.2022).
18. Рыбин, П. К. Анализ потенциала контейнерных перевозок (на примере Калининградского транспортного узла) / П. К. Рыбин, И. Д. Новикова, Ю. А. Мороз. – Текст : непосредственный // Техник транспорта: образование и практика. – 2021. – Т. 2. – № 1. – С. 78–86.
19. Горбатенко, С. Ф. Перспективы развития контейнерных перевозок в Дальневосточном регионе / С. Ф. Горбатенко. – Текст : непосредственный // Новые технологии и проблемы технических наук : сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Красноярск : Инновационный центр развития образования и науки, 2014. – С. 43–46.
20. Глушак, А. С. Организация приграничных терминально-логистических центров на Дальневосточной железной дороге / А. С. Глушак, Р. Г. Король. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 1. – С. 82–87.
21. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021680586, Российская Федерация. Программа имитационного моделирования работы технологических зон приграничного терминально-логистического центра : заявка № 2021669818 от 30.11.2021 : опубликовано 13.12.2021 / Король Р. Г. – Текст : непосредственный.

References

1. *Otbirajut oboroty: ocheredi na peresechenie granicy s KNR zhduť bolee 2 tys. fur* [Take turns: queues for crossing the border with China are waiting for more than 2 thousand trucks]. Available at: <https://iz.ru/1278960/vera-kuzmina/otbirajut-oboroty-ocheredi-na-peresechenie-granicy-s-knr-zhdut-bolshe-2-tys-fur> / (accessed 19.01.2022).
2. «Kovid» bol'no udaril po jeksportu i importu Dal'nego Vostoka — tovarooborot snizilsja na 22% ["Covid" hurt the exports and imports of the Far East - trade turnover decreased by 22%]. Available at: <https://www.newsvl.ru/economics/2020/10/23/194051> / (accessed 15.01.2022).
3. Evseeva Yu. V., Kirpichnikov K. A. [Realization of the Trans-Baikal Territory's border potential through contrailer transportation]. *Transportnaja infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Irkutsk, 2017, vol. 1, pp. 144-147 (In Russian).
4. MTK «Primor'e-1» i «Primor'e-2». *Tendencii i razvitie* [ITK Primorye-1 and Primorye-2. Trends and development]. Available at: <https://novelco.ru/press-tsentr/mtk-primore-1-i-primore-2-tendentsii-i-razvitie> / (accessed 15.01.2022).
5. Rakhmangulov A. N., Osintsev N. A., Kopylova O. A., Muravyev D. S. [Forming the transport corridors on the east-west direction]. *I mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija «Infokommunikacionnye i intellektual'nye tehnologii na transporte IITT'2018»* [I International scientific and practical conference "Infocommunication and intelligent technologies in transport IITT'2018"]. Lipetsk, 2018, pp. 245-253 (In Russian).
6. Melnikova V. N., Korol R. G. [Perfection of technology of customs clearance of goods at the station Grodekovo]. *Nauchno-tehnicheskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century]. Khabarovsk, 2016, vol. 1, pp. 183-186 (In Russian).
7. Korol R. G., Demidova A. E. [The integration of the Russian transport and logistics infrastructure in the implementation of the New silk road "One belt and One road"]. *Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija uchenyh transportnyh vuzov, inženernyh rabotnikov i predstavitelej akademicheskoi nauki s mezhdunarodnym uchastiem «Novye tendencii razvitija v upravlenii processami perevozok, avtomatike i infokommunikacijah»* [All-Russian Scientific and Practical conference of scientists of transport universities, engineers and representatives of academic science with international participation "New development trends in transportation process management, automation and infocommunications"]. Khabarovsk, 2017, pp. 100-105 (In Russian).
8. Chen Qiujie. Chinese and Russian transport corridors and the belt and road initiative: prospects of Sino-Russian cooperation. *The Journal "R-Economy"*, 2020, vol. 6, no. 2, pp. 100-110.
9. Kovalev G.A., Chislov O.N., Suprun E.E. [Contrailer transportation of goods in the Russian network of shopping malls: questions and prospects]. *IV mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija «Transport i logistika: prostranstvenno-tehnologicheskaja sinergija razvitija»* [IV International Scientific and Practical Conference "Transport and Logistics: Spatial and technological synergy of development"]. Rostov-on-Don, 2020, pp. 121-125 (In Russian).
10. Patsev Yu.P., Petrov A.V. Development of contrailer transportation in the transport services market in the Russian Federation. *The Journal «Science and education for transport»*, 2019, no. 1, pp. 240-242 (In Russian).
11. Skorchenko M. Y. Foreign experience in organizing regular pig-gyback service. *The Journal "Transportation Systems and Technology"*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 19-42 (In Russian).
12. *Pervaja mul'timodal'naja kontrejlnaja perevozka. Marshrut cherez tri gosudarstva i tremja vidami transporta* [The first multimodal contrailer transportation. A route through three states and

three modes of transport]. Available at: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1581416/> (accessed 20.01.2022)

13. Lakhmetkina N. Yu., Zavorotynskiy A. S. Organisation of contrailer transportation on the Kaliningrad – Moscow route. *The Journal Transport: science, technology, management. Scientific information collection*, 2021, no 8, pp. 43-46 (In Russian).

14. Pokrovskaya O. D. A set-theoretic model of terminal network. *Izvestija Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1 (29), pp. 118-130 (In Russian).

15. Chislov O. N., Trapenov V. V., Alabina V. V., Bakalov M. V. Formation methods and principles of intellectualization in the management of the terminal-warehouse system of the transport unit. *The Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport*, 2021, no 1 (81), pp. 104-114 (In Russian).

16. Rezer S.M. Development of container and contrailer transportation in Russia and in international communications based on terminal and logistics centers. *The Journal Integrated logistics*, 2016, no. 5, pp. 7-9 (In Russian).

17. Skorchenko M.Y. The state prospects of piggyback in the Russian Federation. *The Engineering Bulletin of the Don*, 2017, no. 4 (47), p. 91 (In Russian).

18. Rybin P.K., Novikova I.D., Moroz J.A. Analysis of the potential of contrailer transport (on the example of the Kaliningrad transport hub). *The Journal Transport technician: education and practice*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 78-86 (In Russian).

19. Gorbatenko S.F. [Prospects for the development of contrailer transportation in the Far Eastern region]. *Novye tehnologii i problemy tehnicheskikh nauk* [International Scientific and Practical Conference "New technologies and problems of technical sciences"]. Krasnoyarsk, 2014, pp. 43-46 (In Russian).

20. Glushak, A. S., Korol R. G. [Organization of border terminal and logistics centers on the Far Eastern Railway]. *Transportnaja infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Irkutsk, 2018, vol. 1, pp. 82-87 (In Russian).

21. Korol R. G. Certificate of registration of the computer program RU 2021680586, 13.12.2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Король Роман Григорьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Korol Roman Grigorievich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor, head of the department «Technology of Transport Processes and Logistics», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Король, Р. Г. Формирование приграничной терминально-логистической инфраструктуры для организации контейнерных перевозок на направлении Суйфэнхэ (КНР) – Гродеково (РФ) / Р. Г. Король. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 43 – 56.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Korol R.G. Formation of a border terminal and logistics infrastructure for the organization of piggyback transportation on the Suifenhe (China) – Grodekovo (Russia) route. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 1 (49), pp. 43-56 (In Russian).

З. Г. Мухамедова, Г. Р. Ибрагимова

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

К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ ГРУЗОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Аннотация. В статье дана оценка состояния рынка транспортно-грузовых услуг Узбекистана, рассмотрена проблема научного обоснования рационального размещения грузовых объектов страны. Анализ проблем транспортных услуг показал, что грузовые транспортные потоки перераспределились, проявились отрицательные тенденции в виде регулярного роста стоимости топливно-энергетических ресурсов, ужесточения регулятивных требований, роста таможенных пошлин, санкций в виде отмены ранее введенных льгот и др. Однако такие показатели железнодорожных грузоперевозок, как дальность контейнерных перевозок и среднее время в пути, стабильны в железнодорожном сообщении, т. е. диверсификация грузовой базы и тенденции к полной загрузке мощностей имеют место быть. Отдельно следует отметить, что железнодорожные перевозки взаимодействуют с другими транспортными отраслями – автомобильной, авиа, морской, речной и другими видами транспорта – как партнеры, а не как конкуренты – широко развиты мультимодальные грузовые перевозки, действуют специальные логистические агентства по обеспечению организации бесперебойной работы при грузовых перевозках. Железные дороги Узбекистана нуждаются в реформировании, а, возможно, в реструктуризации. По крайней мере уже сейчас привлекаются средства частного капитала в систему частного операторства вагонов. В статье описаны научные методы анализа и синтеза, классификации, математической статистики, используемые при исследовании. Предложена дорожная карта качественных преобразований по реорганизации транспортно-грузовой отрасли, которые принесут положительные результаты для транспортной инфраструктуры в целом. Результаты исследования в дальнейшем позволят выявить возможности терминальных сетей, способных обеспечить в короткие сроки доставку необходимых грузов больших объемов на внутренние и внешние рынки, бесперебойное функционирование необходимой инфраструктуры для размещения грузовых объектов на сети железных дорог. Объектом исследования является состояние транспортной инфраструктуры с решающей ролью в торговле.

Ключевые слова: транспорт, железнодорожный транспорт, грузовой объект, рынок транспортно-грузовых услуг, объем перевозок.

Ziyoda G. Muhamedova, Gulshan R. Ibragimova

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

TO THE QUESTION OF THE FORMATION OF THE CARGO INFRASTRUCTURE OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

Abstract. The article assesses the state of the market of transport and cargo services in Uzbekistan, considers the problem of scientific justification of the rational placement of cargo facilities in the country. Analysis of the problems of transport services has shown that freight traffic flows have spread out, negative trends have manifested themselves in the form of regular growth in the cost of fuel and energy resources, tightening of regulatory requirements, growth of customs duties, sanctions in the form of cancellation of previously introduced benefits, and more. However, such indicators of rail freight transportation as the range of container transportation and average travel time are stable in rail traffic, i. e. the diversification of the cargo base and the tendency to full capacity utilization take place. Separately, it should be noted that rail transportation interacts with other transport industries – automobile, air, sea, river and other modes of transport – as partners, not as competitors – multimodal freight transportation is widely developed, special logistics agencies operate to ensure the organization of uninterrupted work during freight transportation. Uzbekistan's railways need to be reformed, and possibly restructured. At least, private capital funds are already being attracted to the system of private carriage operation. The article describes the scientific methods of analysis and synthesis, classification, mathematical statistics used in the study. A roadmap of qualitative transformations for the reorganization of the transport and cargo industry has been proposed, which will bring positive results for the transport infrastructure as a whole. The results of the study will further reveal the capabilities of terminal networks capable of providing in a short time the delivery of large volumes of necessary cargo to domestic and foreign markets, the uninterrupted functioning of the necessary infrastructure for the placement of cargo facilities on the railway network. The object of the study is the state of transport infrastructure with a decisive role in trade.

Keywords: transport, railway transport, cargo object, market of transport and cargo services, traffic volume.

Проблемой научного обоснования рационального размещения грузовых объектов на сети железных дорог отдельной страны является отсутствие четких методик анализа и достоверного прогнозирования вариантов процесса с учетом уже имеющейся инфраструктуры, необходимости сохранения и развития имеющихся внешнеторговых и внутренних отраслевых связей, их организации с учетом специфики всех заинтересованных контрагентов, включая государственные и общественные интересы.

Экономическое пространство содружеств, союзов, стран, регионов и отдельных отраслей напрямую увязано с состоянием транспортной системы – проблемы доставки материальных ресурсов и благ играют решающую роль в организации любой торговли, без которой, по сути, не будет и производства [1].

Глобальный экономический кризис, политические и экономические изменения, пандемия COVID-19, связанная с этим волатильность топливно-энергетических ресурсов привели к серьезным проблемам на рынке транспортных услуг. Замедление темпов роста экономик большинства стран СНГ сказалось и на рынке грузовых услуг [2]. Однако в 2019 г. проявился рост, чему способствовали существенное увеличение общего розничного товарооборота (особенно интернет-торговли) и связанная с этим реализация ряда масштабных проектов в области инфраструктурного обеспечения транспортных грузоперевозок, включая железнодорожные пути сообщения. В связи с этим существенно выросла средняя дальность перевозок, а сам процесс все больше обеспечивается электронным документооборотом и цифровизацией транспортного контроля.

Грузовые транспортные потоки перераспределились в основном по направлению Европа – Азия. В 2020 – 2021 гг. по сравнению с 2019 г. проявились негативные тенденции в виде регулярного роста стоимости топливно-энергетических ресурсов, ужесточения регулятивных требований, роста таможенных пошлин, санкций в виде отмены ранее введенных льгот и др. В то же время можно отметить общее обновление железнодорожного парка. Развитию транспортной отрасли в целом препятствуют такие факторы, как недобросовестная конкуренция, низкая прозрачность рынка, недостаточное инфраструктурное развитие [3].

Тенденции развития транспортно-грузового рынка рассмотрены на примере железнодорожной сети Пространства 1520 за период до 2021 г. (1520 мм – официальная ширина колеи железных дорог стран СНГ, Балтии, Монголии и Финляндии. Общая протяженность Пространства «широкой колеи» составляет свыше 150 000 км) [4].

Так как транзит между Европой и Азией является одним из самых выгодных сегментов железнодорожных перевозок, интересны динамика и структура товарооборота КНР во внешней торговле ЕС, представленные на рисунке 1.

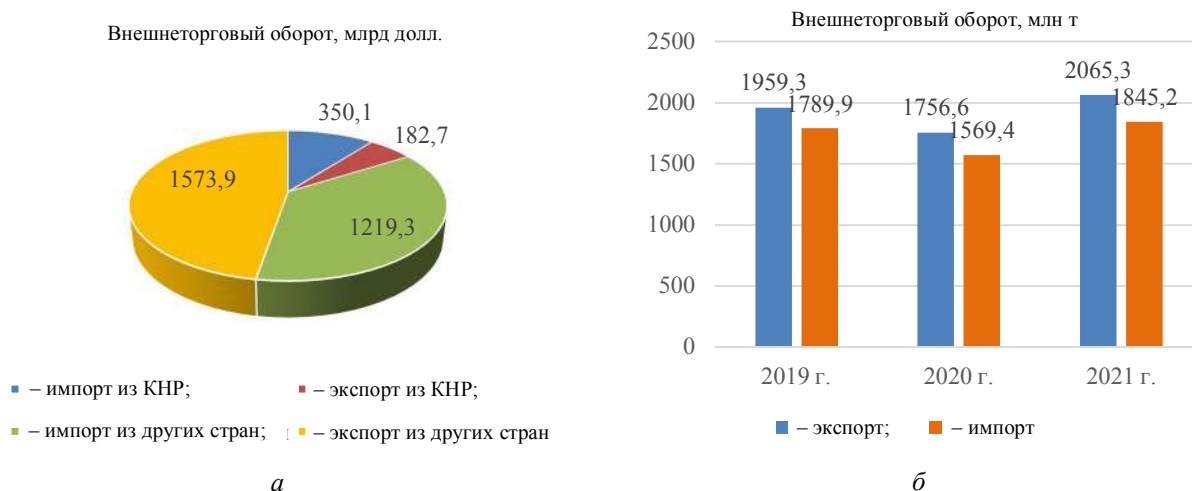


Рисунок 1 – Структура (а) и динамика (б) внешнеторгового оборота ЕС и КНР за 2019 – 2021 гг.

По данным рисунка 1 видно, что объемы импорта и экспорта КНР превышают аналогичные показатели других стран в 2020 г. Что касается динамики, то наблюдается снижение по всем

показателям в 2020 г. по сравнению с 2019 г., а в 2021 г. показатели превысили данные 2019 – 2020 гг., что не могло не сказаться на показателях железнодорожных грузоперевозок [5].

В течение 2020 – 2021 гг. индекс WCI Drewry, отражающий стоимость доставки контейнера морем между Китаем и Европой, превысил железнодорожный индекс ERAI, чем подтвердились преимущества железнодорожных грузоперевозок – скорость, надежность и низкая стоимость доставки. Произошел модальный сдвиг и наметилась тенденция перехода с морских перевозок на железнодорожные при грузовых отправлениях. Отдельно можно отметить стабильность железнодорожных ставок, как показано на рисунке 2.

Практическое отсутствие волатильности ставок повышает привлекательность железнодорожных перевозок в рамках внешнеторговых сделок.

Стабильность железнодорожного сообщения в условиях пандемии – еще один фактор, повышающий конкурентоспособность железнодорожных грузоперевозок и способствующий борьбе с COVID-19 [6].

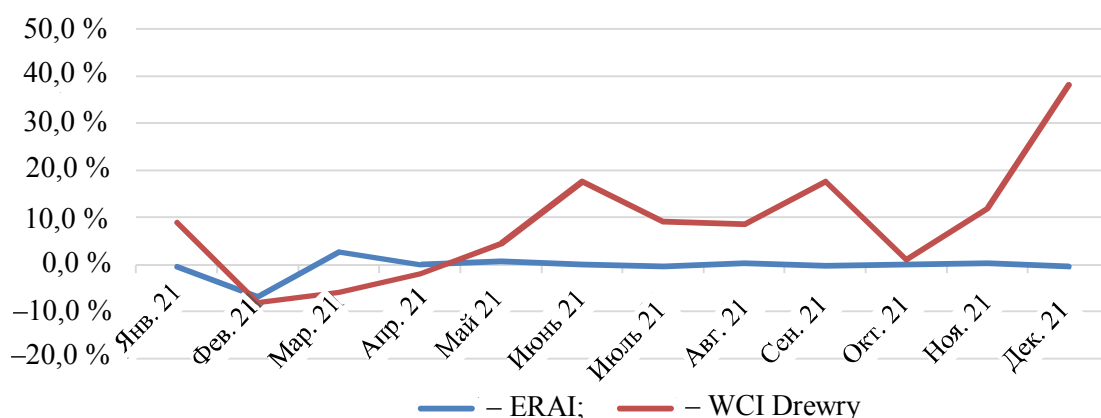


Рисунок 2 – Динамика изменения ставок ERAI и WCI Drewry [5]

Объемы перевозок и динамика загрузки поездов по маршруту показаны на рисунке 3.

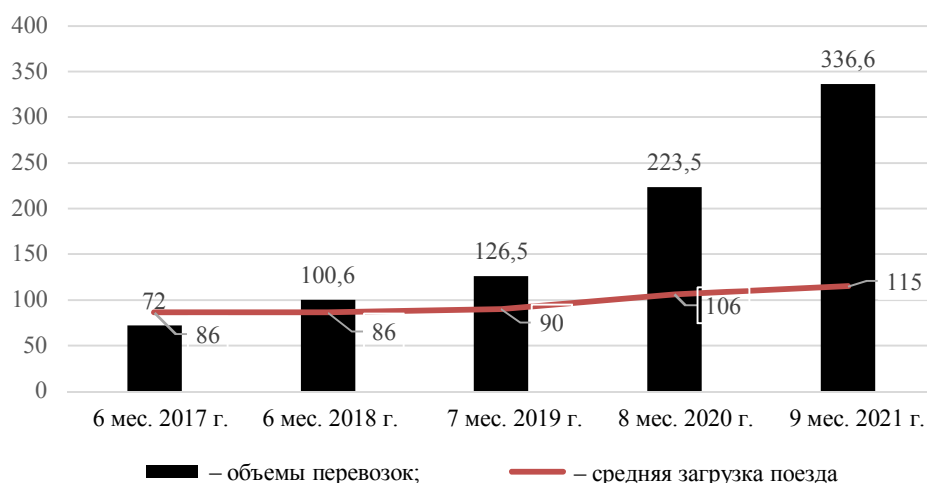


Рисунок 3 – Объемы перевозок и динамика загрузки поездов по евразийскому маршруту за 2017 – 2021 гг., тысяч ДФЭ (двадцатифутовых эквивалентов)

В первом полугодии 2021 г. объем перевезенных грузов по евразийскому маршруту грузов составил 336,6 тыс. ДФЭ, превысив показатели аналогичного периода 2020 г. на 50 % и соста-

вив 61,5 % от показателей перевозки за весь 2020 г. В восточном направлении в первом полугодии 2021 г. проследовало 135,4 тыс. ДФЭ, а в западном направлении – 201,2 тыс. ДФЭ, т. е. 60 % контейнеров шло на запад и 40 % – на восток [7]. Данная тенденция привела к росту числа отправленных контейнеров – на 44 % больше, чем в 2020 г. и на 99 % больше, чем в 2019 г. Среднее количество отправок поездов в сутки выросло почти в 1,5 раза.

Продолжающийся прирост объемов грузовых перевозок на железнодорожном евразийском маршруте существенно увеличил нагрузку на инфраструктуру Пространства 1520, что повлияло на такие показатели, как дальность контейнерных перевозок и среднее время в пути. Их динамика показана на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, средняя дальность перевозок в 2021 г. снизилась, а среднее время в пути увеличилось, что повышает издержки перевозчика и заказчика и сокращает общую эффективность перевозок [8]. Одной из причин этого стала недостаточная пропускная способность в местах смены грузовыми контейнерами колеи, в том числе из-за недостаточной обустроенности инфраструктуры по пути следования и недостатка грузовых объектов [9, 10].

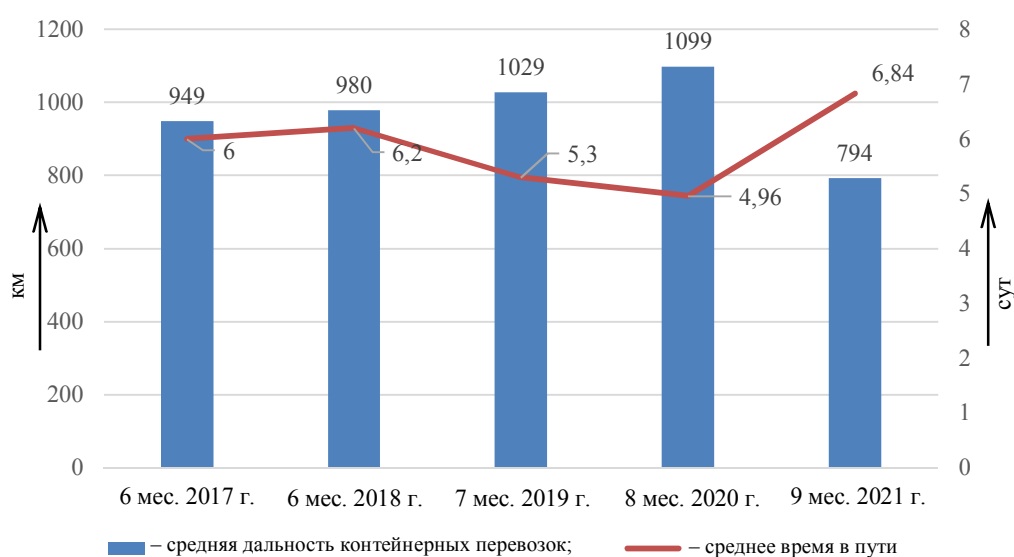


Рисунок 4 – Динамика дальности и времени в пути грузовых железнодорожных отправок по евразийскому маршруту за 2017 – 2021 гг.

В современных реалиях транспортный потенциал и возможности Узбекистана способны обеспечить потребности страны в перемещении грузов по всем направлениям республики, о чем свидетельствует обработка данных по грузообороту, приведенная в таблице 1.

Таблица 1 – Перевозка грузов и грузооборот по видам транспорта Республики Узбекистан

Перевезено грузов транспортом, млн т	Январь – декабрь 2021 г.	В процентном соотношении к январю – декабрю предыдущего года		Январь – декабрь 2021 г.	В процентном соотношении к январю – декабрю предыдущего года	
		2020 г.	2019 г.		2020 г.	2019 г.
Грузооборот транспорта, млн ткм	1 511,9	110,6	103,6	73 585,4	110,0	92,1
Железнодорожным	72	101,9	100,7	24 519,9	103,8	100,8
Автомобильным	1 373,50	110,9	105,1	17 869,0	110,1	102,2
Воздушным	8,3	158,4	50,6	303,6	138,6	184,0
Трубопроводным	66,4	114,7	80,5	30 892,9	115,2	80,8

Из данных таблицы 1 видно, что наблюдается увеличение объемов перевозимых грузов: в январе – декабре 2021 г. объем грузооборота всеми видами транспорта по сравнению с аналогичным периодом 2020 г. увеличился на 6 691,2 млн ткм. В основном это связано с трубопроводным транспортом, грузооборот которого возрос на 4 083,3 млн ткм.

Объем перевозок грузов по всем видам транспорта представлен на рисунке 5. В то же время грузооборот железнодорожного транспорта составил 24 519,9 млн ткм. По сравнению с аналогичным периодом 2020 г., он увеличился на 887,7 млн ткм, или на 3,8 %.

За январь – декабрь 2021 г. объем транспортных услуг Республики Узбекистан был равен 67 418,3 млрд сум, их рост по сравнению с 2020 г. составил 16,0 %. В общем объеме оказанных рыночных услуг доля этого вида услуг остается преобладающей – 23,8 %.

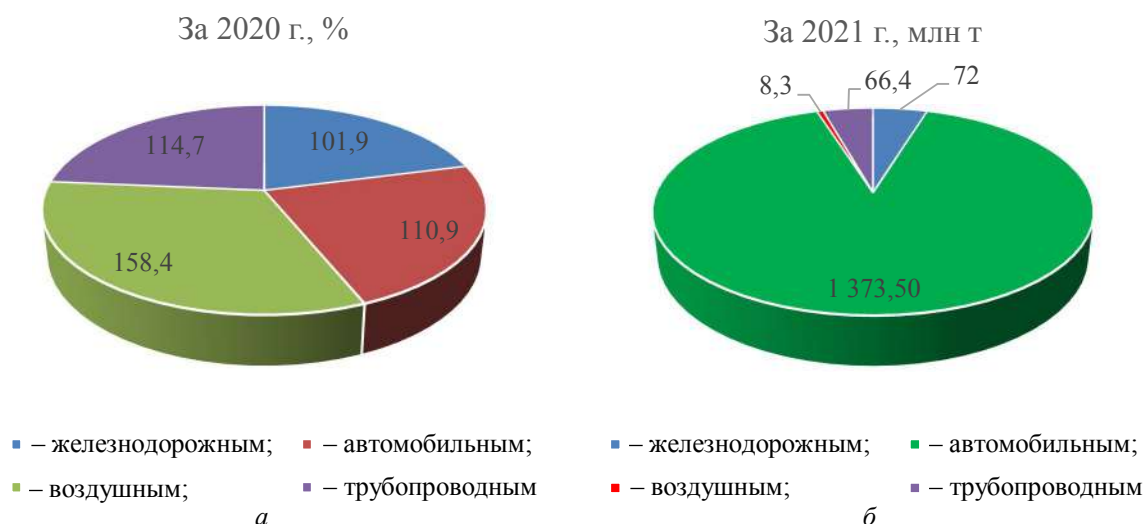


Рисунок 5 – Объем перевозок грузов всеми видами транспорта Республики Узбекистан

Как видно из рисунка 5, железнодорожным транспортом в 2021 г. перевезено 72,0 млн т грузов.

Динамика объемов перевозок грузов железнодорожным транспортом за период 2019 – 2021 гг. по регионально-железнодорожному узлу Ташкент показана на рисунке 6.

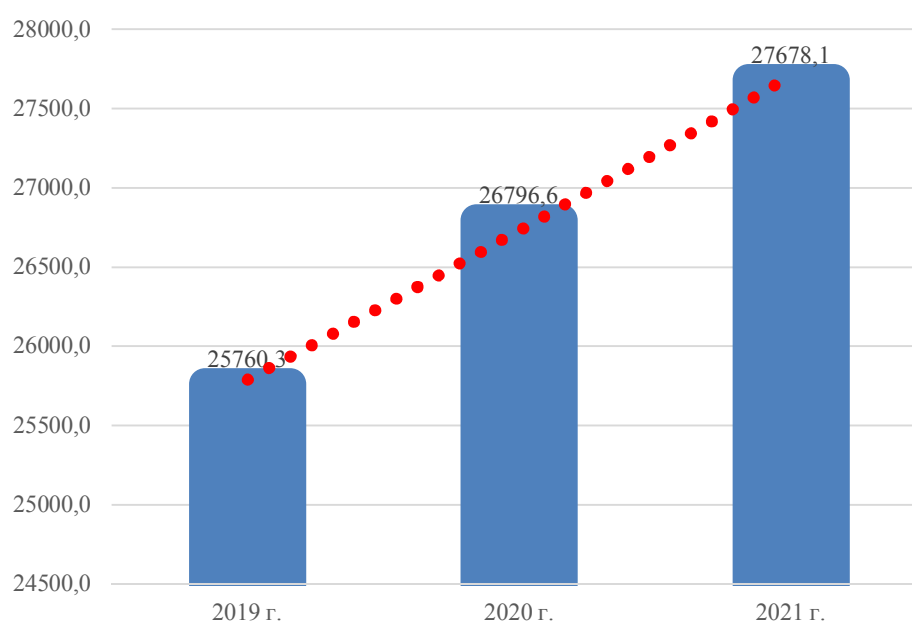


Рисунок 6 – Динамика объемов перевозок грузов за 2019 – 2021 гг. по регионально-железнодорожному узлу Ташкент, тыс. т

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

Анализируя данные рисунка 6, можно судить также об увеличении объемов перевозок в регионально-железнодорожном узле Ташкент несмотря на период пандемии в республике.

Для анализа и определения доли погруженных вагонов по региональному железнодорожному узлу Ташкент была построена диаграмма Парето, представленная на рисунке 7.

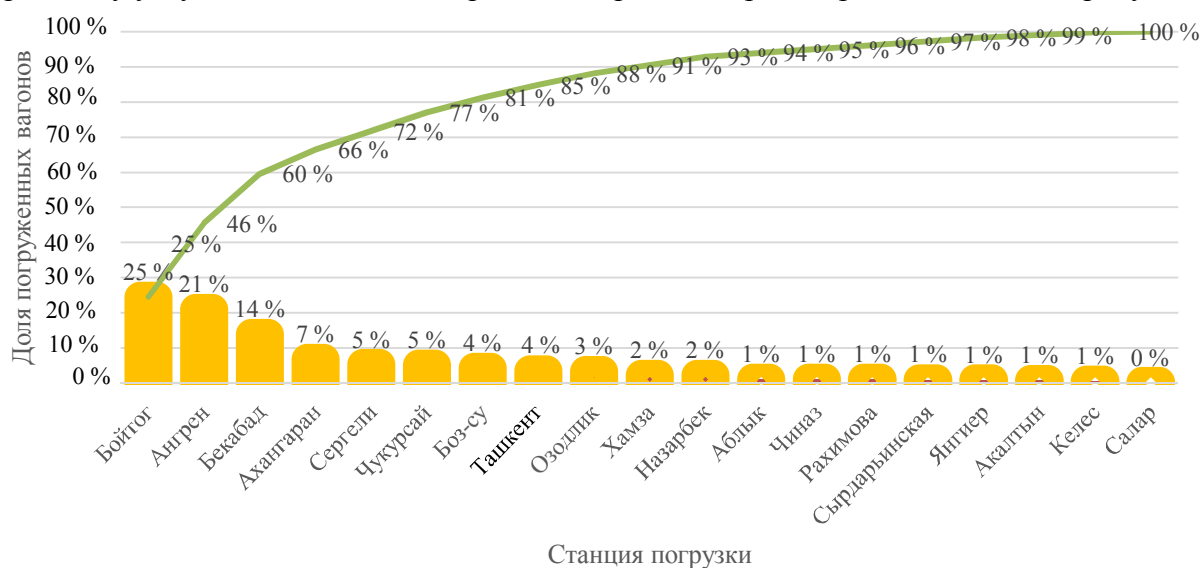


Рисунок 7 – Диаграмма Парето, иллюстрирующая долю погруженных вагонов по станциям регионально-железнодорожного узла Ташкент АО «Узбекистон темир йуллари» за 2021 г.

Как видно из диаграммы, представленной на рисунке 7, рост отгруженных вагонов по станциям РЖУ «Ташкент» носил почти равномерный характер. По станциям Бойтоғ, Ангрен и Бекабад было максимальное количество отгруженных вагонов, а минимальное количество пришлось на станции Салар, Келес и Акалтын. Ниже дан анализ по роду отгруженных грузов.

Более детальный анализ грузов, отправленных по АО «Узбекистон темир йуллари» по установленной номенклатуре за 2021 г., представлен на рисунке 8.

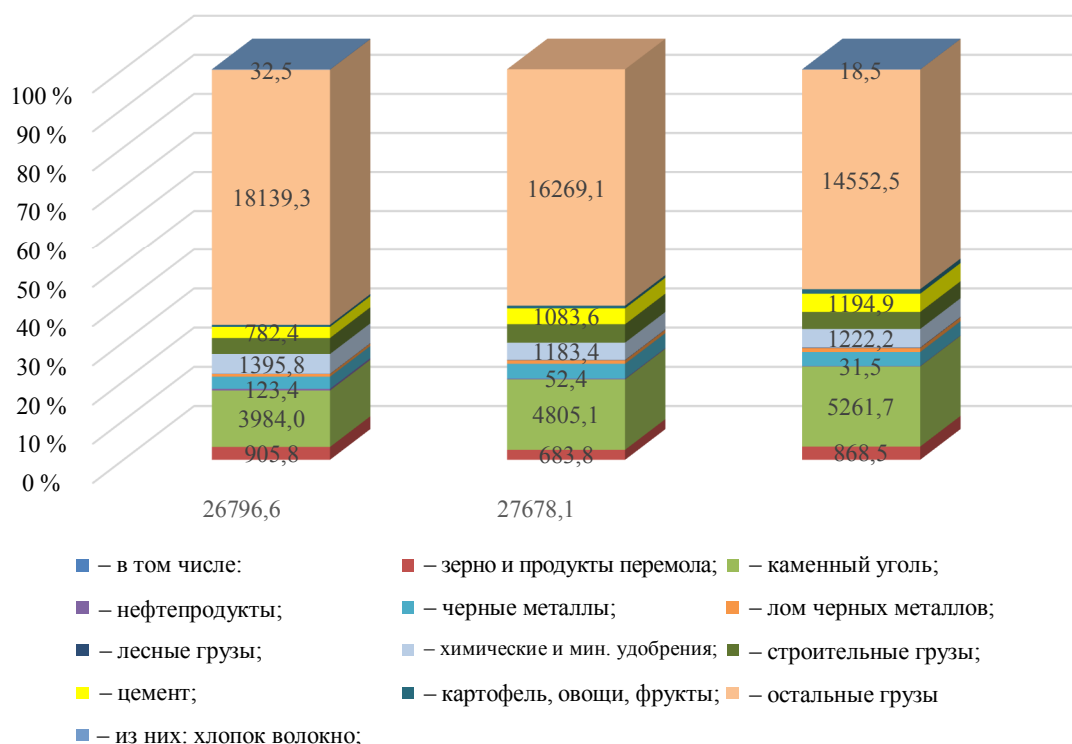


Рисунок 8 – Анализ отправленных грузов АО «Узбекистон темир йуллари» по установленной номенклатуре грузов за 2021 г., тыс. т

Как видно из рисунка 8, объем перевозки каменного угля составляет наибольшую долю из представленной категории отправленных отдельных видов грузов за 2021 г.

В настоящее время можно говорить о диверсификации грузовой базы и тенденции к полной загрузке мощностей.

Главным фактором успеха на всем протяжении 2021 г., который проявился в виде очередного обновления рекордов в объемах перевозимых по евразийскому маршруту грузов, стали конкурентные преимущества железнодорожного транспорта [11, 12], подкрепленные многолетним плодотворным и стабильным функционированием сервисов евразийского маршрута и оптимально выстроенными связями с грузоотправителями и другими партнерами. Это стало итогом не столько конъюнктуры, в том числе в других видах транспорта, сколько результатом многолетних усилий и работы по развитию евразийских железнодорожных транзитных перевозок [13].

Новым фактором повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта и маршрута вполне могут стать предлагаемые улучшения в организации операционной деятельности. Отдельно можно отметить перспективу использования систем интеллектуального пломбирования (электронных средств идентификации – ЭСИ), призванных вывести сохранность грузов и безопасность на высокий уровень за счет внедрения систем оперативного реагирования на проникновение и сократить число краж и взломов. Высокотехнологические решения в сочетании со слаженными действиями контрагентов дадут еще одно конкурентное преимущество как для международных железнодорожных контейнерных грузоперевозок в целом, так и для евразийского маршрута в частности.

Все большую важность и роль приобретает экологичность железнодорожного транспорта. Здесь конкурентоспособность повышается за счет того, что новое регулирование на уровне ЕС, а также перспективы включения всех видов транспорта в систему торговли квотами на выброс увеличат издержки всех транспортно-логистических компаний кроме железнодорожных [14].

В целом можно говорить о наличии большого числа показателей, оценивающих результативность деятельности отрасли грузоперевозок, которые демонстрируют отрицательную динамику, и это говорит об экономическом кризисе стран СНГ, усугубляемом мировой политической обстановкой, приводящем к нарастанию проблем транспортной отрасли. В железнодорожных грузовых перевозках ситуация гораздо лучше, доля порожних контейнеров сократилась с 23 % в 2017 г. до 6 % в 2021 г.

Отдельные риски и негативные факторы влияния на транспортно-грузовой рынок показаны на рисунке 9.

Железнодорожное сообщение стран Центральной Азии включает в себя протяженность путей более чем на 22000 км, из них 66 % принадлежат Казахстану (84 % всех грузовых перевозок), 18 % – Узбекистану (11 % перевозок), 12 % – Туркменистану (4 % от всех перевозок). Серьезным препятствием для развития региональной и глобальной торговли между Востоком и Западом становится метод, при котором одна государственная железнодорожная компания передает другой государственной железнодорожной компании вагоны и систему организации работ по замене колесных пар на пограничных переходах (Китай) с длительными остановками из-за недостаточности грузовой инфраструктуры, поэтому проведение научно-исследовательских работ в области совершенствования грузовой инфраструктуры имеет важное научное значение.

Узбекистан находится на этапе формирования элементов логистического обеспечения торговли и перевозок грузов, в том числе железнодорожным транспортом. Грузовые объекты оказывают услуги по таможенному обслуживанию товаров, их хранению, перевалке, страхованию, транспортно-экспедиторскому обеспечению, дальнейшей дистрибуции, а также способствуют обслуживанию грузовых локомотивов и контейнеров. Все эти действия страна осуществляет в том числе и в рамках взятых на себя международных обязательств.

Основные тенденции развития рынка транспортно-грузовых услуг – рост грузопотока за счет увеличения объемов международной торговли, особенно в железнодорожной отрасли в

связи с более низкими тарифами грузовых перевозок и отличительной особенностью разовой грузоподъемности. Выросли средняя дальность перевозок и загрузка поездов. В качестве проблемы выделяется увеличение срока перевозок за счет снижения средней скорости, в том числе из-за недостаточной готовности грузовой инфраструктуры, недостатка грузовых объектов по пути следования и повышения нагрузки на существующие пункты. Основные проблемы отрасли – высокий уровень износа парка локомотивов, вагонов, грузового, ремонтного и другого оборудования; высокий уровень конкуренции и отсутствие развитой сети мультимодальных систем; недостаточный уровень менеджмента и эффективности предлагаемых государству проектов развития отрасли; отсутствие должной согласованности действий участников рынка; недостаточные инвестиционные возможности.



Рисунок 9 – Риски и негативные факторы транспортно-грузового рынка по степени прогнозирования их влияния (ожидания на 2022 г.)

Перспективы рынка: имеются возможности привлечения частного местного и иностранного капитала; в рамках существующих железнодорожных объединений создание конгломерации с широким перечнем льгот, но с высокими возможностями обеспечения бюджета страны налоговыми поступлениями за счет роста и эффективности деятельности; широкое внедрение мультимодальных систем; большие возможности будущих грузовых объектов генерации прибыли за счет работы с внешними партнерами в области логистики и сопутствующего сервиса; внедрение новых информационных технологий в систему управления и технологических процессов.

Отдельно следует отметить, что железнодорожные перевозки взаимодействуют с другими транспортными отраслями (автомобильный, авиа, морской, речной и другие виды транспорта) как партнеры, а не как конкуренты – широко развиты мультимодальные грузовые перевозки, действуют специальные логистические агентства по обеспечению их бесперебойной работы.

Железные дороги Узбекистана нуждаются в реформировании, возможно, в реструктуризации. По крайней мере уже сейчас привлекаются средства частного капитала в систему частного операторства вагонов. В целом в стране успешно действуют недавно созданные крупные международные логистические центры, решающие вопросы обеспечения внешнего грузооборота железнодорожного транспорта в том числе. Хорошие плоды приносит сотрудничество в рамках Пространства 1520 и других объединений на основе транспортных железнодорожных связей.

Таким образом, в качестве основных положительных тенденций рынка железнодорожных транспортно-грузовых услуг на примере евразийского маршрута можно отметить рост грузопотока, увеличение средней дальности маршрутов, повышение уровня загрузки поездов из-за роста общего объема внешнеторгового товарооборота между ЕС и Китаем, интернет-торговли. Рост конкурентоспособности железнодорожных перевозок по евразийскому маршруту обусловлен стабильностью ставок, надежностью перевозок и лояльным ценообразованием. Из негативных факторов можно отметить сокращение средней скорости передвижения грузовых контейнеров ввиду недостаточной подготовленности грузовой инфраструктуры. Основные риски и угрозы отрасли обусловлены международной обстановкой, санкциями, другими факторами, влияющими на торговлю, производство, объем грузоотправлений.

Список литературы

1. Стринковская, А. С. Проблемы и тенденции развития рынка транспортных услуг в современных условиях / А. С. Стринковская. – Текст : непосредственный // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2016. – № 3 (13). – С. 75–82.
2. Lazich Yu. V., Popova I. N. Trends in the development of the road haulage industry in Russia, *Beneficium*, 2020, no. 4, pp. 19.
3. Бутов, А. М. Влияние коронавируса на российский рынок грузоперевозок / А. М. Бутов. – Текст : электронный // Аналитический бюллетень НИУ ВШЭ об экономических и социальных последствиях коронавируса в России и в мире. – 2020. – № 9. – С. 46. – URL: <https://www.hse.ru/mirror/pubs/share/377993642.pdf> (дата обращения: 04.01.2022).
4. О колее 1520 мм // Бизнес-диалог. – Текст : электронный. – URL: <http://forum1520.ru/2017/ru/about/gauge/> (дата обращения: 09.11.2021).
5. Контейнерные железнодорожные перевозки на Евразийском пространстве в 2020 году : Информационно-аналитический обзор. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.yandex.ru/docs/> (дата обращения: 02.12.2021).
6. Шило, А. Э. Транспортно-логистическое направление / А. Э. Шило. – Текст : электронный // РЖД-Партнер.ру. – 2021. – URL: <https://ar2020.rzd.ru/ru/performance-overview/> (дата обращения: 09.12.2021).
7. Контейнерные железнодорожные перевозки на Евразийском пространстве в первом полугодии 2021 года : Информационно-аналитический обзор. – Текст : электронный. – URL: <https://clck.yandex.ru/redir/ ERAI-July-2021-RU.pdf> (дата обращения: 02.12.2021).
8. Mukhamedova Z.G. Mathematical Model for Calculation of Oscillations in the Main Bearing Frame of Railcar with Changing Stiffness and Physical Parameters, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, vol. 10, no. 5, pp. 682-690.
9. Mukhamedova Z.G. Modeling of fluctuations in the main bearing frame of railcar, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48-53.
10. Контейнеризация как фактор развития организации перевозок грузов / Ш. Р. Абдувахидов, Ф. К. Азимов, Г. Р. Ибрагимова [и др.]. – Текст : непосредственный // Логистические системы в глобальной экономике. – 2020. – № 10. – С. 49–52.
11. Ilesaliev D.I., Azimov F.K., Ibragimova G.R., Svetasheva N.F., Abduvaxitov S.R., Tursunov Z. S. Development of mathematical models of the relationship between the main parameters of a container depot, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, vol. 1151, no. 1, pp. 012026.

12. Сооружения и устройства на станциях для грузовых операций // Железные дороги. – Текст : электронный. – URL: <https://lokomotiv.ru/zheleznodorozhnyy-put/> (дата обращения: 07.12.2021).

13. Худяков, К. А. Конкурентные преимущества железнодорожного транспорта / К. А. Худяков, Д. Е. Смирнова. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 2. – № 12. – С. 392–393.

14. Сулин, А. М. Механизм трансграничного углеродного регулирования (CBAM)/ А. М. Сулин. – Текст : непосредственный // Ernst & Young Global Limited – EY. – 2021. – № 11. – С. 18.

References

1. Strinkovskaya A.S. Problems and trends in the development of the market of transport services in modern conditions. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiia i sovershenstvovaniia – Innovative economy: prospects for development and improvement*, 2018, no. 3, p. 75. (In Russian).

2. Lazich Yu.V., Popova I.N. Trends in the development of the road haulage industry in Russia. *Beneficium*, 2020, no. 4, p. 19.

3. Butov A.M. The impact of coronavirus on the Russian freight market. *Analiticheskii biulleten' NIU VShE ob ekonomicheskikh i sotsial'nykh posledstviakh koronavirusa v Rossii i v mire – HSE Analytical Bulletin on the Economic and Social Consequences of the Coronavirus in Russia and in the World*, 2020, no. 9, p. 46. Available at: <https://www.hse.ru/mirror/pubs/share/377993642.pdf> (accessed 04.01.2022).

4. *O kolee 1520 mm* (About track 1520 mm). Available at: <http://forum1520.ru/2017/ru/about/gauge/> (accessed 11.09.2021).

5. *Konteynerye zheleznodorozhnye perevozki na Evraziiskom prostranstve v 2020 godu : Informatsionno-analiticheskii obzor* (Container rail transportation in the Eurasian space in 2020 : Information and analytical review). Available at: <https://docs.yandex.ru/docs/> (accessed 12.02.2021).

6. Shilo A.E. *Transportno-logisticheskoe napravlenie* (Transport and logistics direction). Available at: <https://ar2020.rzd.ru/ru/performance-overview/> (accessed 12.09.2021).

7. *Konteynerye zheleznodorozhnye perevozki na Evraziiskom prostranstve v pervom polugo-dii 2021 goda : Informatsionno-analiticheskii obzor* (Container rail transportation in the Eurasian space in the first half of 2021 : Information and analytical review). Available at: <https://clck.yandex.ru/redir/ERAJ-July-2021-RU.pdf> (accessed 02.12.2021).

8. Mukhamedova Z.G. Mathematical Model for Calculation of Oscillations in the Main Bearing Frame of Railcar with Changing Stiffness and Physical Parameters, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, vol. 10, no. 5, pp. 682-690.

9. Mukhamedova Z.G. Modeling of fluctuations in the main bearing frame of railcar, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48-53.

10. Abduvakhidov Sh.R., Azimov F.K., Ibragimova G.R., Ilesaliev D.I., Ismatullaev A.F. Containerization as a factor in the development of the organization of cargo transportation. *Logisticheskie sistemy v global'noi ekonomike – Logistic systems in the global economy*, 2020, no. 10, pp. 49-52 (In Russian).

11. Ilesaliev D.I., Azimov F.K., Ibragimova G.R., Svetasheva N.F., Abduvaxitov S.R., Tur-sunov Z. S. Development of mathematical models of the relationship between the main parameters of a container depot, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, vol. 1151, no. 1, pp. 012026.

12. *Sooruzheniia i ustroistva na stantsiiakh dlia gruzovykh operatsii* (Structures and devices at stations for cargo operations). Available at: <https://lokomotiv.ru/zheleznodorozhnyy-put/> (accessed 07.12.2021).

13. Khudyakov K.A., Smirnova D.E. Competitive advantages of railway transport. *Aktualniye problemi aviatsii i kosmonavтики – Actual problems of aviation and cosmonautics*, 2016, vol. 2, no. 12, pp. 392-393 (In Russian).

14. Sulin A.M. Transboundary Carbon Management Mechanism (CBAM). *Ernst & Young Global Limited – EY*, 2021, no. 11, p. 18.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мухамедова Зиёда Гафурджановна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, и. о. профессора кафедры «Транспортно-грузовые системы».

Тел.: +99890329 8300.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Ибрагимова Гульшан Руслановна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Старший преподаватель кафедры «Организация движения на транспорте».

Тел.: +998946518884.

E-mail: ibragimova.gulshana@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мухамедова, З. Г. К вопросу формирования грузовой инфраструктуры Республики Узбекистан / З. Г. Мухамедова, Г. Р. Ибрагимова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 57 – 67.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mukhamedova Ziyoda Gafurdjanovna

Tashkent State Transport University (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

DSc, acting professor of the department of Transport and Cargo Systems.

Phone: +99890329 8300.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Ibragimova Gulshan Ruslanovna

Tashkent State Transport University (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Senior lecturer of the department «Railway operational management».

Phone: +998946518884.

E-mail: ibragimova.gulshana@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mukhamedova Z.G., Ibragimova G.R. To the question of the formation of the cargo infrastructure of the Republic of Uzbekistan. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 1 (49), pp. 57-67 (In Russian).

УДК 656.25

А. И. Давыдов, М. М. Соколов

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Аннотация. В связи с прослеживаемым мировым трендом повышения средних скоростей движения на железнодорожном транспорте все чаще стараются исключить пересечения железных и автомобильных дорог. Однако в Российской Федерации только 40 % железнодорожных переездов находятся вблизи населенных пунктов или на оживленных автомобильных дорогах, строительство двухуровневых развязок на остальных переездах экономически не выгодно, а иногда затруднительно из-за климатических особенностей. Поэтому необходим другой подход к предотвращению инцидентов и дорожно-транспортных происшествий на переездах. При этом следует учитывать необходимость индивидуального построения стратегии обеспечения безопасности для каждого объекта транспортной инфраструктуры.

В настоящее время в существующих информационных системах Министерства транспорта, Министерства внутренних дел, а также у владельцев железнодорожной инфраструктуры накоплен достаточно большой объем статистической информации об инцидентах и дорожно-транспортных происшествиях на железнодорожных переездах. Но чаще всего эти данные используются для справок, содержащих абсолютные значения в каждом из ведомств. При этом взаимосвязи между этими разрозненными источниками информации комплексно не анализируются. Современные технологии создания интеллектуальных информационных систем на основе существующих баз данных большого объема и таких инструментов, как машинное обучение, интеллектуальный поиск, нейронные сети, позволяют построить экспертную систему, основанную на определенном наборе правил, способную проанализировать ситуацию на конкретном переезде, оценить вероятность возникновения внештатных ситуаций и предложить пути их предотвращения. Кроме того, важно анализировать не только инфраструктуру, но и конкретные единицы транспортных средств и показатели безаварийности управляющих ими водителей.

В данной статье рассмотрены предпосылки и технология построения базы знаний интеллектуальной системы, применяемой для анализа уровня безопасности на железнодорожных переездах, которая позволит объединить в себе в настоящее время информацию о факторах, накопленных в различных системах, оказывающих влияние на безопасность движения на переездах, и на основе накопления знаний дать прогноз развития ситуации на каждом конкретном объекте.

Ключевые слова: безопасность, аварийная ситуация, железнодорожный переезд, поезд, автомобиль.

Alexey I. Davydov, Maxim M. Sokolov

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

INTELLIGENT TRAFFIC SAFETY MANAGEMENT AT PUBLIC RAILWAY CROSSINGS

Abstract. In connection with the traceable global trend of increasing average speeds in railway transport, more and more often they are trying to exclude the intersection of railways and roads. However, in the Russian Federation, only 40 % of railway crossings are located near settlements or on busy roads, the construction of two-level interchanges at the remaining crossings is not economically profitable, and sometimes difficult due to climatic conditions. Therefore, a different approach is needed to prevent incidents and accidents at crossings. At the same time, the need for an individual construction of a security strategy for each object of the transport infrastructure should be taken into account.

At present, in the existing information systems of the Ministry of Transport, the Ministry of Internal Affairs, as well as the owners of the railway infrastructure, a fairly large amount of statistical information has been accumulated on incidents and traffic accidents at railway crossings. But most often these data are used for certificates containing absolute values in each of the departments. At the same time, the relationships between these disparate sources of information are not comprehensively analyzed. Modern technologies for creating intelligent information systems based on existing large databases and tools such as machine learning, intelligent search, neural networks make it possible to build an expert system based on a specific set of rules that can analyze the situation at a particular crossing, assess the likelihood of emergency situations and suggest ways to prevent them. In addition, it is important to analyze not only the infrastructure, but also specific units of vehicles and the accident-free performance of the drivers driving them.

This article discusses the prerequisites and technology for building a knowledge base of an intelligent system used to analyze the level of safety at railway crossings, which will allow us to combine currently information about the factors accumulated in various systems that affect traffic safety at crossings and based on the accumulation of knowledge give a forecast of the development of the situation at each specific object.

Keywords: safety, emergency, level crossing, train, car.

Одноуровневые пересечения железных и автомобильных дорог – железнодорожные переезды – являются объектами повышенной опасности и требуют от участников движения неукоснительного соблюдения правил дорожного движения (со стороны водителей автомобилей) и правил технической эксплуатации железных дорог и инструкции по эксплуатации железнодорожных переездов (со стороны работников железнодорожного транспорта). В настоящее время мировым трендом является замена железнодорожных переездов виадуками (над железнодорожным полотном) и путепроводами (под железной дорогой). Чрезвычайно большая протяженность железных и автомобильных дорог, разница климатических условий, в 60 % случаев малые объемы движения автомобилей делают в некоторых случаях построение двухуровневых развязок экономически невыгодным, а иногда и технологически невозможным.

Следует отметить, что наезды подвижного состава на автомобильный транспорт приводят к тяжелым последствиям, которые связаны с человеческими жертвами, а также с разрушением железнодорожной инфраструктуры [1]. Дорожно-транспортные происшествия чаще всего связаны с объездом водителями закрытых автоматических шлагбаумов, а также с выездами на переезд при запрещающем сигнале светофора.

В связи с указанными выше фактами совершенствование инфраструктуры одноуровневых пересечений автомобильных и железных дорог в Российской Федерации остается приоритетной задачей, решаемой как ОАО «Российские железные дороги» [2] и Государственной инспекцией безопасности дорожного движения, так и федеральными, местными и муниципальными властями [3 – 7]. Вопросом повышения безопасности движения на железнодорожных

переездах и поиском новых эффективных технических средств занимаются и зарубежные ученые и инженеры [8 – 12].

В указанной предметной области в настоящее время ведутся исследования по трем направлениям:

- совершенствование нормативной базы;
- разработка новых средств контроля и заграждения на железнодорожных переездах;
- цифровая трансформация процессов учета и анализа ситуаций на железнодорожных переездах, а также выработка мероприятий в области безопасности на одноуровневых пересечениях автомобильных и железных дорог. Важное направление здесь занимает ликвидация человеческого фактора. Все технические объекты должны быть наделены искусственным интеллектом, подвижные единицы должны функционировать в режимах автопилотирования, а в случаях критических (опасных) отказов автомата должна сама блокировать любое движение поезда или автомобиля на переезде.

Цифровая трансформация в области обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах является комплексной задачей, затрагивающей интересы нескольких предприятий, уровней государственной и муниципальной власти, а также частных лиц.

Безопасность дорожного движения зависит от множества факторов, в частности, от таких, как тип покрытия и фактическое состояние рассматриваемого покрытия, скорость и интенсивность движения транспорта и пешеходов, технические средства организации движения, время года и недели, часы суток. Эти факторы можно считать объективными. Состояние водителей и пешеходов, нарушение ими установленных правил относятся уже к субъективным причинам. На автомобильных дорогах образована сложная динамическая система, которая включает в себя ряд таких параметров, как дорога, человек, автомобиль, работающих в определенных внешних условиях.

Министерством транспорта Германии в 2010 – 2011 гг. было проведено исследование зависимости дорожно-транспортных происшествий (ДТП) от различных факторов (рисунок 1). Элементы дорожно-транспортной системы находятся в различных отношениях и связях друг с другом и образуют определенную зависимость. Они создают факторы риска, которые могут привести к ДТП. Таким образом, безопасность дорожного движения зависит как от самих факторов, так и от их различных сочетаний, а именно «человек – дорога – автомобиль»; «автомобиль – человек»; «автомобиль – дорога»; «человек – дорога».

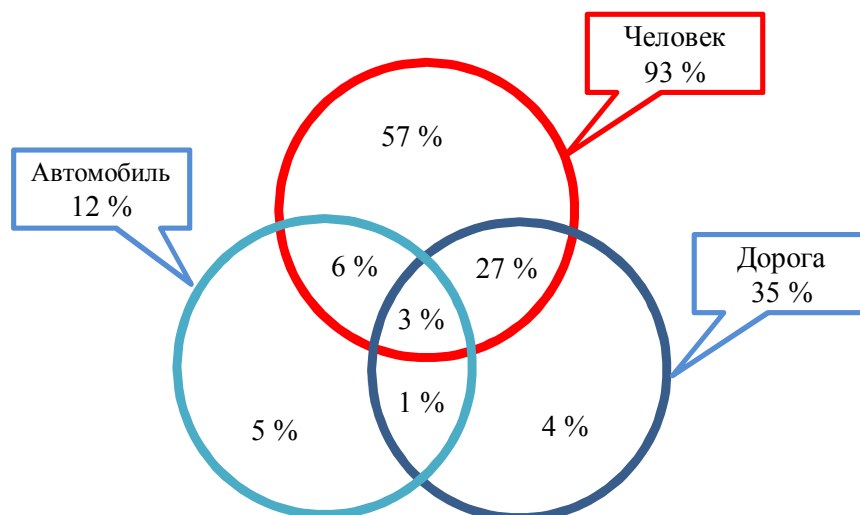


Рисунок 1 – Зависимость ДТП от отдельных факторов и их сочетаний

Таким образом, основная причина ДТП в первую очередь зависит от человеческого фактора. В 57 % случаев это ошибка человека; в 27 % случаев причина ДТП зависит от фактора «дорога – человек», т. е. речь идет о взаимодействии человека и дороги; основной причиной ДТП в 6 % случаев является фактор «человек – автомобиль», т. е. в данном случае это проб-

лема взаимодействия человека и автомобиля; и, наконец, в 3 % случаев причиной ДТП является многофакторная проблема, являющаяся следствием взаимодействия человека, автомобиля и дороги.

Для выбора мероприятий по снижению влияния факторов аварийности прежде всего необходимо провести их подробный анализ. Все разнообразие мер, применяемых для повышения безопасности дорожного движения, можно разделить по главным факторам возникновения ДТП на три группы:

уменьшение количества ДТП, связанное с проведением мероприятий по воспитательной, образовательной, законодательской, политической, общественной деятельности, которая поможет сформировать наиболее оптимальную безопасную модель поведения участников дорожного движения за счет воспитания и корректировки нежелательного поведения участников движения, а также для деятельности дорожных организаций по фактору «человек»;

уменьшение количества ДТП, связанное с проведением мероприятий в рамках деятельности, направленной на повышение надежности и безопасности как самих транспортных средств, так и их эксплуатации – фактор «автомобиль»;

повышение безопасности дорожной инфраструктуры (фактор «дорога») – фактор, предназначенный для проведения необходимых мероприятий в рамках деятельности, связанной с планированием, проектированием, строительством, содержанием и эксплуатацией объектов дорожной инфраструктуры.

Приведенная классификация факторов позволяет определить необходимый набор информации для возможности определения вероятности аварийной ситуации на переезде. На ее основе предложена семантическая модель предметной области, представленная на рисунке 2.

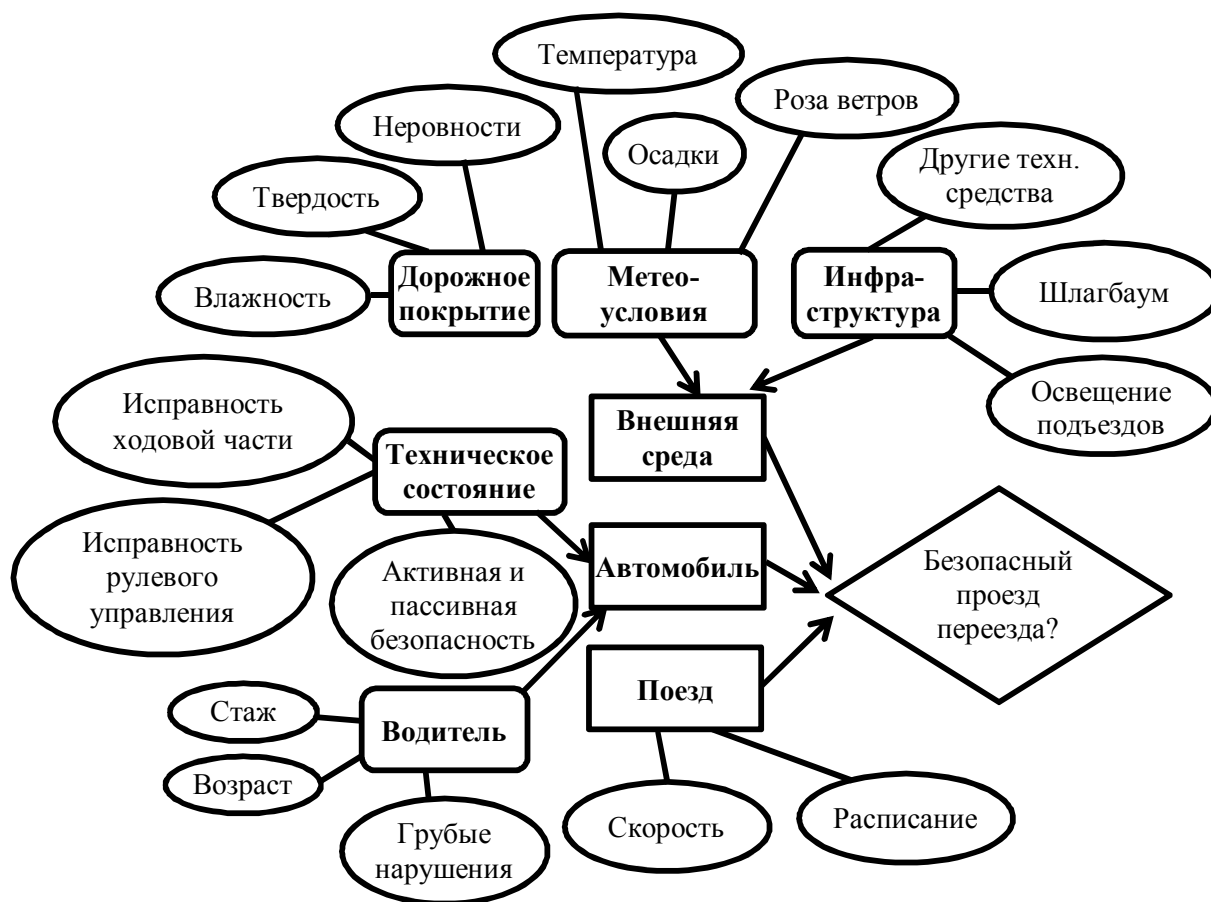


Рисунок 2 – Семантическая модель предметной области

Анализ семантической модели предметной области обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах показывает, что на благоприятное событие «безопасный проезд переезда» оказывает влияние комплекс факторов. Вероятность такого события определяется по формуле:

$$P = 1 - [P_{\text{дп}} \cdot P(\text{ДП}|\text{М})] \cdot P_{\text{М}} \cdot [P_{\text{В}} \cdot P(\text{В}|\text{ТС})] \cdot P_{\text{ТС}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{дп}} \cdot P(\text{ДП}|\text{М})$ – совместная вероятность ДТП от состояния дорожного покрытия в комплексе с метеорологическими условиями;

$P_{\text{М}}$ – вероятность ДТП по причине метеорологических условий;

$P_{\text{В}} \cdot P(\text{В}|\text{ТС})$ – совместная вероятность наступления благоприятного события от состояния дорожного покрытия в комплексе с метеорологическими условиями;

$P_{\text{ТС}}$ – вероятность ДТП по причине исключительно технического состояния автомобиля.

В свою очередь каждая из вероятностей в формуле (1) является функцией нескольких вероятностей, например, для вероятности ДТП

$$P_{\text{ТС}} = P_{\text{Х}} \cdot P_{\text{РУ}} \cdot P_{\text{Б}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{Х}}$ – вероятность ДТП в зависимости от состояния ходовой части автомобиля;

$P_{\text{РУ}}$ – вероятность ДТП в зависимости от состояния рулевого управления автомобиля;

$P_{\text{Б}}$ – вероятность ДТП в зависимости от наличия и работоспособности систем активной и пассивной безопасности автомобиля.

Вероятность возникновения аварийной ситуации по причинам неисправностей ходовой части определяется статистикой также по отдельным узлам ходовой части.

Таким образом, для возможности предсказания неблагоприятного события необходима обширная статистическая база по инцидентам и дорожно-транспортным происшествиям на железнодорожных переездах, позволяющая определить вероятность наступления каждого отдельного события и вычислить благоприятность проезда переезда для каждой конкретной подвижной единицы в текущих условиях эксплуатации.

Для накопления такой базы предлагается создать интеллектуальную систему управления безопасностью на железнодорожных переездах (ИСУБП).

В ее функции будет входить следующее:

накопление статистической информации об участниках движения для последующей возможности создания имитационных моделей;

определение узких мест в безопасности на конкретных железнодорожных переездах;

предложение мероприятий для предупреждения аварийной ситуации на конкретном переезде.

База знаний ИСУБП должна состоять как минимум из шести баз данных (БД):

«Движение поездов» – формируется на основании информации автоматизированной системы управления перевозками и графика исполненного движения, дает информацию о расписании движения поездов, их весовых и скоростных характеристиках;

«Транспортная безопасность» – содержит сведения о совершенных или предотвращенных актах незаконного вмешательства в деятельность перегонов в границах железнодорожных переездов;

«Техосмотр» – формируется на основании данных государственной инспекции безопасности дорожного движения, содержит информацию о техническом состоянии автомобилей;

База данных Российского союза автостраховщиков (РСА) – содержит информацию о водителях и ДТП с их участием;

«Метеофакторы» – содержит сведения о температуре наружного воздуха, влажности, наличии осадков, ветре;

База данных «Инфраструктура» формируется на основе данных о технической оснащённости железнодорожного переезда и подъездов к нему.

Также необходима связь с базой данных ГИБДД для определения уровня доверия водителю из-за наличия/отсутствия штрафов за грубые нарушения правил дорожного движения.

Структура базы знаний ИСУБП приведена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Структура базы знаний интеллектуальной системы управления безопасностью на железнодорожных переездах

На основании расчетного значения вероятности аварийной ситуации или инцидента может быть передано оповещение водителям автомобилей и машинистам поездов, приближающимся к переезду.

Построение интеллектуальной системы управления безопасностью на железнодорожных переездах позволит, во-первых, сберечь жизни водителей и создать очередность переоснащения переездов с определением списка необходимых изменений. Вариант реализации предложенной системы будет рассмотрен в следующих работах.

Список литературы

1. Костаев, А. В. Неохраняемый переезд – зона внедрения современных технологий / А. В. Костаев, Ю. Ю. Штенгель. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту. – 2016. – № 1. – С. 214–216.
2. Стратегия безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018 – 2024 годы. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 января 2018 г. № 1-п // static.government.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://static.government.ru/media/files/g6BXGgDI4fCEiD4xDdJUwlxudPATBC12.pdf> (дата обращения: 05.04.2022).
3. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642) // rzd-expo.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait_WB.pdf (дата обращения: 05.04.2022).
4. Демьянов, В. В. Состояние проблемы и методы обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах / В. В. Демьянов, О. Б. Имарова, М. Э. Скоробогатов. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного университета путей сообщения. – 2018. – Т. 22. – № 4 (135). – С. 215–230.

5. Верёвкина, О. И. Требования, предъявляемые к обеспечению безопасности движения поездов на переездах, мостах и в тоннелях / О. И. Верёвкина, А. С. Боева. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, образование, производство : сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 308–311.
6. Система оповещения о свободности железнодорожных переездов / М. Г. Комогорцев, Е. В. Непомнящих [и др.]. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 26–28.
7. Миненко, Е. Ю. Оценка мероприятий, повышающих безопасность дорожного движения на железнодорожных переездах / Е. Ю. Миненко, Ю. А. Кусморова. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2014. – № 20. – С. 190–193.
8. Лысенко, Н. Н. Схема переезда с интенсивным движением автомашин / Н. Н. Лысенко, А. Н. Державин. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15. – № 3 (70). – С. 188–195.
9. Macioszek E., Kurek A., Kowalski B. 2020 Overview of safety at rail-road crossing in Poland in 2008-2018, *Transport problems*, vol. 15, issue 4, part 1, pp. 57-68, DOI: 10.21307/TP-2020-048.
10. H. Cai et al., Detection of intrusions of foreign objects using millimeter radar at railway crossings 2020, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Toronto, ON, Canada, 2020, pp. 2776-2781, DOI: 10.1109/SMC42975.2020.9282881.
11. Коваленко, В. Н. Современные тенденции автоматизации переездов на железнодорожном транспорте / В. Н. Коваленко, М. Н. Катаев. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2015. – № 3 (17). – С. 54–58.
12. Sheikh S.M., Md. Mahbub H., Khondker J.R., Gazi M.R. A Radio Based Intelligent Railway Grade Crossing System to Avoid Collision. *IJCSI International of Computer Science Issues*, 2010, vol. 7, issue 6. 139 p.

References

1. Kostaev A.V., Shtengel' Yu.Yu. Unguarded crossing – a zone for the introduction of modern technologies. *Nauka i obrazovanie transportu – Science and education for transport*, 2016, no. 1, pp. 214-216 (In Russian).
2. *Strategiia bezopasnosti dorozhnogo dvizheniia v Rossiiskoi Federatsii na 2018 – 2024 gody. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 8 ianvaria 2018 g. № 1-r* (Road Safety Strategy in the Russian Federation for 2018 – 2024. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1-r of January 8, 2018). Available at: <http://static.government.ru/media/files/g6BXGgDI4fCEiD4xDdJUwIxludPATBC12.pdf> (accessed 05.04.2022).
3. *Strategiia nauchno-tehnologicheskogo razvitiia holdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaja kniga)* [Strategy for scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Paper)]. Available at: http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait_WB.pdf (accessed 05.04.2022).
4. Dem'yanov V.V., Imarova O.B., Skorobogatov M.E. State of the problem and methods of ensuring traffic safety at railway crossings. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – Bulletin of the Irkutsk State University of Railway Transport*, 2018, vol. 22, no. 4 (135), pp 215-230 (In Russian).
5. Veryovkina O.I., Boeva A.S. Requirements for ensuring the safety of train traffic at crossings, bridges and in tunnels. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo : sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Transport: science, education, production : proceedings of the International scientific and practical conference). Rostov-on-Don, 2017, pp. 308-311 (In Russian).
6. Komogorcev M.G., Nepomnyashchih E.V., Klochkov Ya.V., Maryuhnenko V.S., Kirpichnikov K.A. Railroad Clearance Warning System. *Put' i putevye hozyajstvo – Railway Track and Facilities*, 2016, no. 6, pp. 26-28 (In Russian).
7. Minenko E.Yu., Kusmorova Yu.A. Evaluation of measures that improve road safety at railway crossings. *Molodoj uchenyj – Young scientist*, 2014, no. 20, pp. 190-193 (In Russian).
8. Lysenko N.N., Derzhavin A.N. Crossing with heavy traffic. *Mir transporta – World of transport and transportation*, 2017. vol. 15, no. 3 (70), pp. 188-195 (In Russian).
9. Macioszek E., Kurek A., Kowalski B. 2020 Overview of safety at rail-road crossing in Poland in 2008-2018, *Transport problems*, vol. 15, issue 4, part 1, pp. 57-68, DOI: 10.21307/TP-2020-048.

10. H. Cai et al., Detection of intrusions of foreign objects using millimeter radar at railway crossings 2020, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Toronto, ON, Canada, 2020, pp. 2776-2781, DOI: 10.1109/SMC42975.2020.9282881.

11. Kovalenko V.N., Kataev M.N. Modern trends in the automation of railway crossings. *Innovacionnyj transport – Innovative transport*, 2015, no. 3 (17), pp. 54-58 (In Russian).

12. Sheikh S.M., Md. Mahbub H., Khondker J.R., Gazi M.R. A Radio Based Intelligent Railway Grade Crossing System to Avoid Collision. *IJCSI International of Computer Science Issues*, 2010, vol. 7, issue 6. 139 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Давыдов Алексей Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и компьютерная графика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: DavydovAI@bk.ru

Соколов Максим Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Давыдов, А. И. Интеллектуальное управление безопасностью движения на железнодорожных переездах общего пользования / А. И. Давыдов, М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 67 – 74.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Davydov Alexey Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Computer science and computer graphics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: DavydovAI@bk.ru

Sokolov Maxim Mihailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Automation and telemechanics», OSTU.

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

E-mail: SokolovMM@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Davydov A.I., Sokolov, M.M. Intelligent traffic safety management at public railway crossings. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 1 (49), pp. 67-74 (In Russian).

УДК 656.216.22

Г. Г. Ахмедзянов¹, А. Д. Галеев¹, М. В. Ключников¹, А. В. Литвинов²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Омская академия Министерства внутренних дел Российской Федерации (ОМА МВД России), г. Омск, Российская Федерация

КОМПЛЕКС ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ НА НЕОХРАНЯЕМЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ

Аннотация. В Российской Федерации на неохранных железнодорожных переездах происходит больше всего железнодорожных аварий. Большинство научных работ и исследований по теме переездов посвящены совершенствованию работы и обслуживания охраняемых железнодорожных переездов. В настоящее время не существует эффективного способа повышения безопасности на неохранных железнодорожных переездах. Предметом исследования являются неохранные железнодорожные переезды. Целью работы является разработка комплекса предупреждения нештатных ситуаций на неохранных железнодорожных переездах.

В статье рассмотрены случаи дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах Западно-Сибирской железной дороги за период времени с 2015 по 2020 г. и исследована схема неохранный железнодорожного переезда. Предложена структурная схема комплекса предупреждения нештатных ситуаций на неохранных железнодорожных переездах. Представлены алгоритмы работы комплекса предупреждения аварий на неохранных железнодорожных переездах и подачи извещения в кабину локомотива о нештатной ситуации на неохранных железнодорожных переездах. Использование существующей схемы кодирования автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа в качестве линии передачи информации о нештатной ситуации на железнодорожном переезде позволило значительно упростить схему разработанного комплекса. В работе рассчитаны также максимально допустимое время занятия неохранный железнодорожного переезда автотранспортом и время изменения кодирования в системе автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа.

Предложенный комплекс предупреждения нештатных ситуаций на неохранных железнодорожных переездах не требует дополнительного оборудования для организации канала связи, прост в эксплуатации и имеет небольшую стоимость. Оснащение данным комплексом неохранных железнодорожных переездов позволит улучшить безопасность движения поездов, сократить число дорожно-транспортных происшествий и повысить эффективность работы железнодорожного транспортного комплекса в целом.

Ключевые слова: железнодорожный переезд, безопасность движения, комплекс предупреждения нештатных ситуаций, автоматическая локомотивная сигнализация, дорожно-транспортное происшествие.

Gayaz G. Akhmedzyanov¹, Albert D. Galeyev¹, Maksim V. Klyuchnikov¹, Artem V. Litvinov²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;

²Omsk Academy of the Ministry of the Interior of Russia, Omsk, the Russian Federation

ACCIDENT PREVENTION COMPLEX AT PASSIVE LEVEL CROSSINGS

Abstract. In the Russian Federation, most railway accidents take place at passive level crossings. The majority of scientific papers on the topic of crossings deal with the improvement of active level crossings operation. At present, there is no effective way to improve safety at passive level crossings. The subject of the study is passive level crossings. The aim of the paper is to develop a set of preventive measures to avoid accidents at passive level crossings.

The article describes the cases of traffic accidents at level crossings of the West Siberian railway, studies the scheme of passive level crossings and offers a schematic diagram of the accident prevention system at passive level crossings. The work algorithm of the accident prevention system at passive level crossings and the algorithm of giving the locomotive a notification of an emergency situation at passive level crossings are presented. Using the existing coding scheme of the train protection system as a transmission line for information about an emergency situation at a level crossing allows simplifying significantly the scheme of the developed system. The paper also calculates the maximum permissible time of occupation of the crossing by motor vehicles and the time of coding change in the automatic locomotive signaling system of continuous type.

The proposed accident prevention system at passive level crossings does not require additional equipment to organize the communication channel and is cost-neutral. Equipping passive level crossings with this system will improve train safety, reduce the number of accidents and increase the efficiency of the railway transport complex in general.

Keywords: level crossing, traffic safety, accident prevention system, train protection system, traffic accident.

Обеспечение безопасности движения поездов является важной задачей ОАО «РЖД». Дорожно-транспортные происшествия (ДТП) на железнодорожных переездах (ЖДП) составляют значительную долю от общего числа аварий на железной дороге. Последствиями таких происшествий являются человеческие жертвы, повреждение подвижного состава и объектов инфраструктуры, нарушение графика движения поездов. Для исключения таких последствий государство и ОАО «РЖД» затрачивают значительные усилия на снижение аварийности на ЖДП, с этой целью проводятся следующие мероприятия: строительство путепроводов, оснащение ЖДП устройствами заграждения переездов (УЗП), воспитательная и агитационная работа среди водителей автотранспорта. Большая часть аварий (81 %) происходит на неохранных железнодорожных переездах, где невозможно обеспечить ограждение зоны переезда от автомобильного транспорта [1 – 4]. К неохранным переездам относятся ЖДП третьей и четвертой категорий. Данные переезды имеют только предупреждение в виде дорожной разметки, предупреждающих знаков и показаний переездного светофора (для переездов третьей категории).

Рассмотрим происшествия на ЖДП, относящиеся к Западно-Сибирской железной дороге. Всего за период времени с 2015 по 2020 г. было зафиксировано 109 дорожно-транспортных происшествий, из них 105 (96 %) на неохраняемых переездах [5]. Можно выделить ДТП на перегоне Урываево – Панкрушиха. Локомотивная бригада грузового поезда при приближении к переезду (за 600 м до переезда) увидела человека, стоящего на обочине и подающего рукой круговые сигналы для остановки поезда. Машинист применил экстренное торможение и увидел стоящий перед переездом автомобиль, находящийся в негабарите первого пути. Из-за малого расстояния предотвратить столкновение не удалось. В результате ДТП повреждены локомотив, железнодорожный переезд и оборудование релейного шкафа. Остановка поезда продлилась 25 мин (1500 с). Очевидно, что в случае заблаговременного предупреждения локомотивной бригады о нештатной ситуации на ЖДП ДТП можно было бы избежать.

Для разработки способа предупреждения машиниста о нештатной ситуации на неохраняемом ЖДП рассмотрим схему такого переезда (рисунок 1).

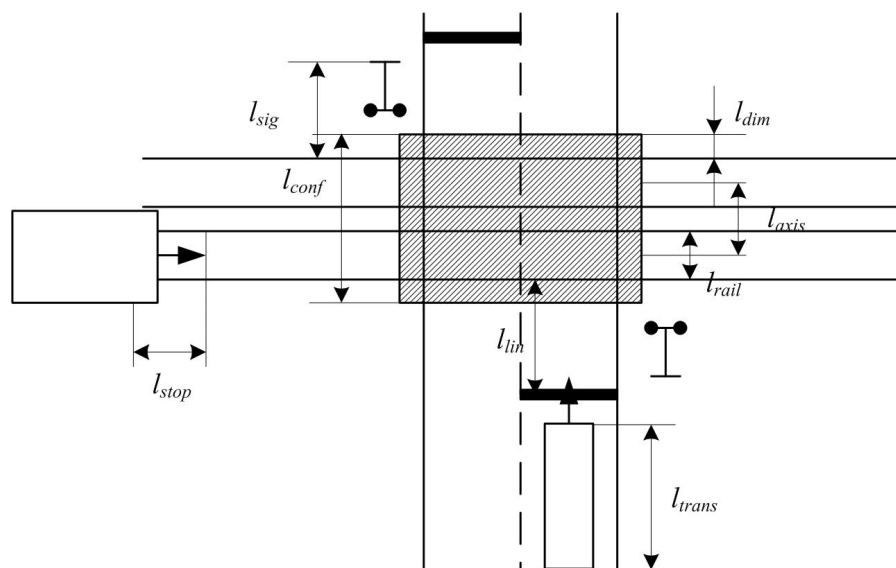


Рисунок 1 – Схема неохраняемого железнодорожного переезда

Перед переездом устанавливаются дорожные знаки и наносится дорожная разметка. В качестве сигнализации на переездах третьей категории используются переездные светофоры, устанавливаемые на расстоянии не менее 6 м от крайнего рельса.

Из схемы видно, что у машиниста нет возможности заранее оценить ситуацию на ЖДП и предотвратить возможное ДТП. Существуют различные способы контроля ситуации на железнодорожных переездах. К основным способам относятся камеры видеонаблюдения, аппаратура ГЛОНАСС, схемы видеотрансляции обстановки на переезде и трансляция информации с переезда по радиоканалу. Общими недостатками этих способов являются значительные финансовые расходы на оснащение всех локомотивов видеомониторами, оснащение переездов и локомотивов аппаратурой связи, оборудование переездов комплексами видеонаблюдения [6, 7]. В случае модернизации неохраняемых переездов эти затраты неоправданны из-за большого числа таких переездов.

Рассмотрим проектирование комплекса предупреждения нештатных ситуаций на неохраняемых железнодорожных переездах. Первая задача, которую необходимо решить, это выбор способа определения нештатной ситуации на ЖДП. Поскольку исследуемый переезд является неохраняемым, то нет специального человека, который мог бы определять нештатную ситуацию. Поэтому необходимо использовать технические датчики. Использование камеры в качестве датчика возможного ДТП позволит транслировать картинку с переезда в кабину машиниста, и он сам будет принимать решения о ситуации на ЖДП. Недостатками видеокамер являются его высокая стоимость; помехи, возникающие при атмосферных явлениях (дождь, туман, метель); необходимость канала связи для трансляции изображения в кабину машиниста.

Оптимальным вариантом датчика является радиолокационный – аналогичный датчику контроля занятости зоны переезда, используемому в УЗП. Главное преимущество радиолокационного датчика заключается в том, что он позволяет контролировать отдельно каждую полосу движения автомобильной дороги.

Второй задачей при проектировании комплекса является выбор способа передачи информации в кабину машиниста. Существуют технические решения, использующие для передачи информации радиоканал (Wi-Fi, Wi-Max, поездная радиосвязь). Эти решения позволяют транслировать большой поток информации, но дальность их действия ограничена, а на качество сигнала воздействуют атмосферные явления. Для использования радиоканала требуется дорогостоящее коммутационное оборудование как на переезде, так и в кабине машиниста. Для проекта выбран вариант использования уже существующей линии связи. Для передачи информации о нештатной ситуации на ЖДП можно использовать линию автоматической локомотивной связи непрерывного типа (АЛСН), передающую числовым кодом показания напольных светофоров в кабину машиниста на локомотивный светофор. Преимущество использования линии АЛСН заключается в том, что можно не только передавать информацию машинисту поезда, но и контролировать его реакцию и осуществлять принудительное торможение поезда.

Структурная схема комплекса предупреждения нештатных ситуаций на неохраняемом ЖДП представлена на рисунке 2.

Комплекс работает следующим образом. Радиолокационные датчики (РЛД) контролируют зону ЖДП и фиксируют занятие полосы автомобильным транспортом. Информация с датчиков передается на измеритель, который измеряет время занятия зоны переезда отдельной автотранспортной единицей. Если значение времени занятия зоны ЖДП выше критического значения, то информация о нештатной ситуации передается на устройство управления. Ко второму входу устройства управления подключена рельсовая цепь, которая фиксирует занятие участка приближения при появлении поезда. Если поезд приближается к переезду, а на ЖДП зафиксирована нештатная ситуация, то устройство управления включает схему кодирования. Схема кодирования переключает кодовую комбинацию в рельсовой цепи с разрешающей на запрещающую. Далее локомотивные устройства воспринимают кодовую комбинацию и запускают процедуру предупреждения машиниста и экстренного торможения поезда.

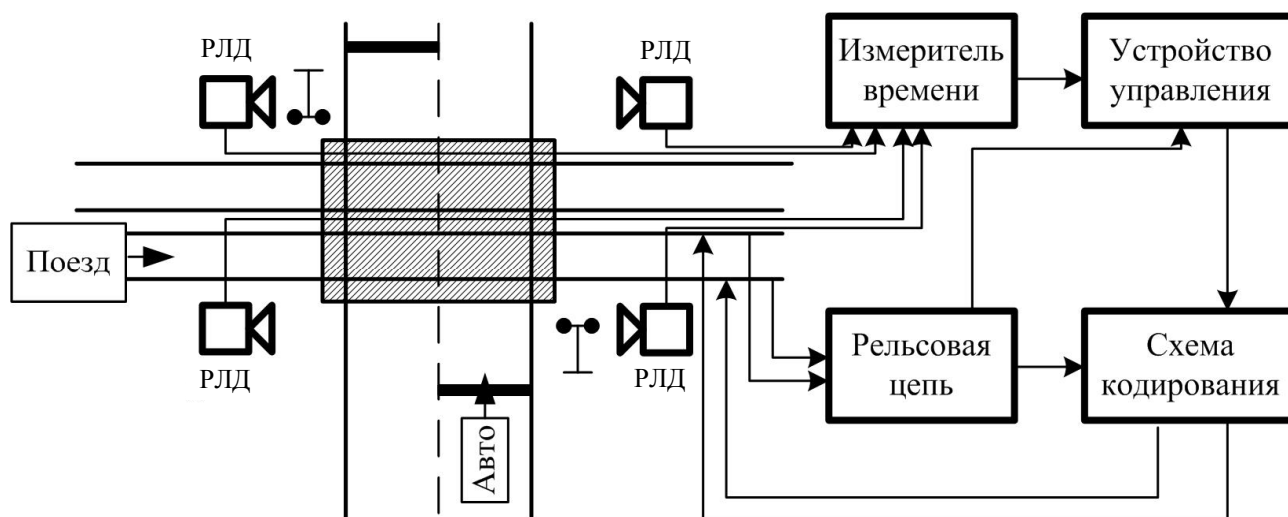


Рисунок 2 – Структурная схема комплекса предупреждения нештатных ситуаций на неохраняемом железнодорожном переезде

Алгоритм работы комплекса представлен на рисунке 3.

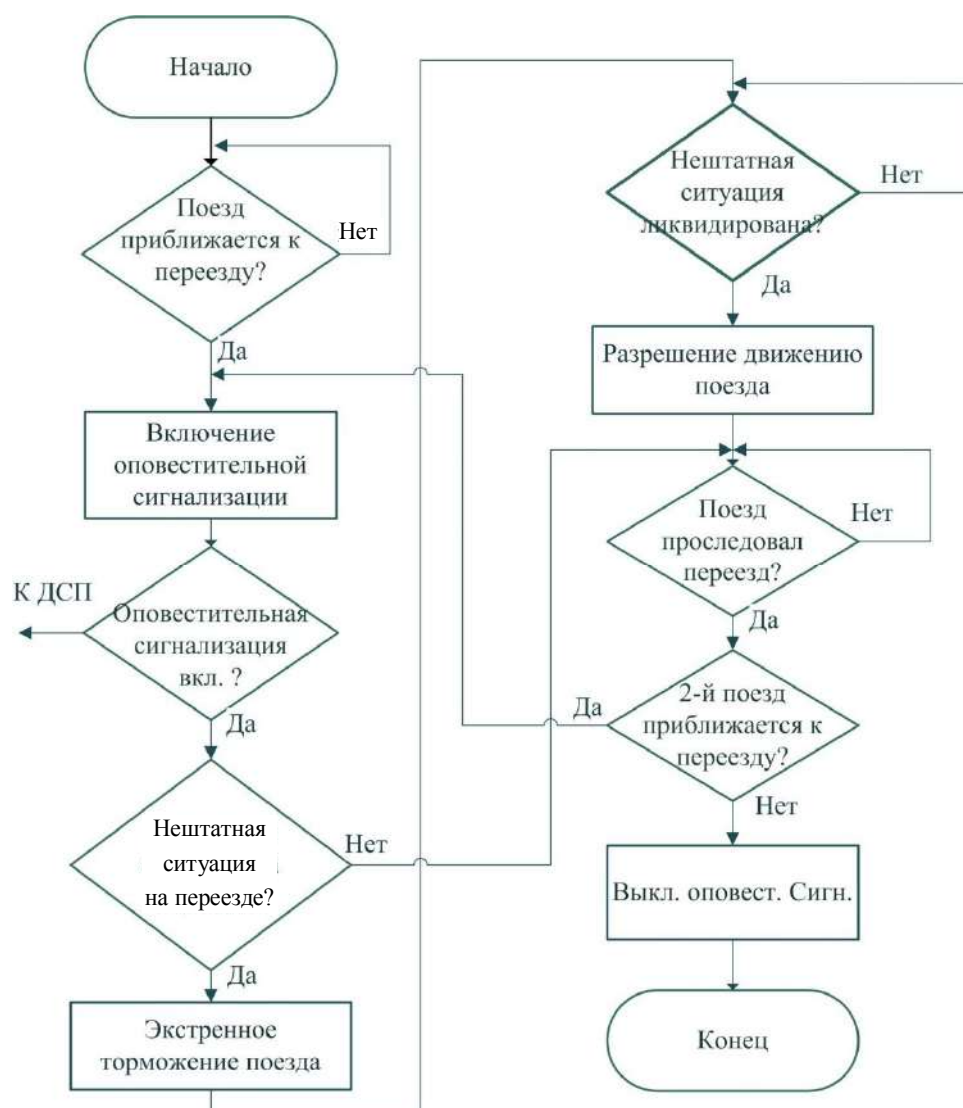


Рисунок 3 – Алгоритм работы комплекса предупреждения нештатных ситуаций на неохраемых железнодорожных переездах

Рассмотрим алгоритм извещения машиниста о нештатной ситуации на ЖДП (рисунок 4).

В случае фиксации комплексом нештатной ситуации на железнодорожном переезде он изменяет сигналы кодирования АЛСН таким образом, чтобы сначала передавался код КЖ (красный/желтый), а затем кодирование прекращалось. В этом случае машинист получает команду на торможение, и если он ее не выполняет, схема управления тормозами срабатывает автоматически [8].

Для предотвращения ДТП на переезде необходимо, чтобы поезд успел остановиться до момента вступления на переезд. Для этого необходимо не только исчезновение кода АЛСН, но и выполнение алгоритма (см. рисунок 4). Поэтому необходимо рассчитать время изменения кодирования в системе АЛСН. Период передачи кода (t_{cod}) для кодового путевого трансмиттера КРТШ-5 составляет 1,6 с, а для КРТШ-7 – 1,86 с. Смена показаний локомотивного светофора происходит после повторения трех циклов передачи [9, 10]. Тогда время начала торможения (t_{stop}) поезда будет определяться так:

$$t_{stop} = t_{r-y} + t_0 = 3 \cdot t_{cod} + 3 \cdot t_{cod} = 6 \cdot t_{cod}. \quad (1)$$

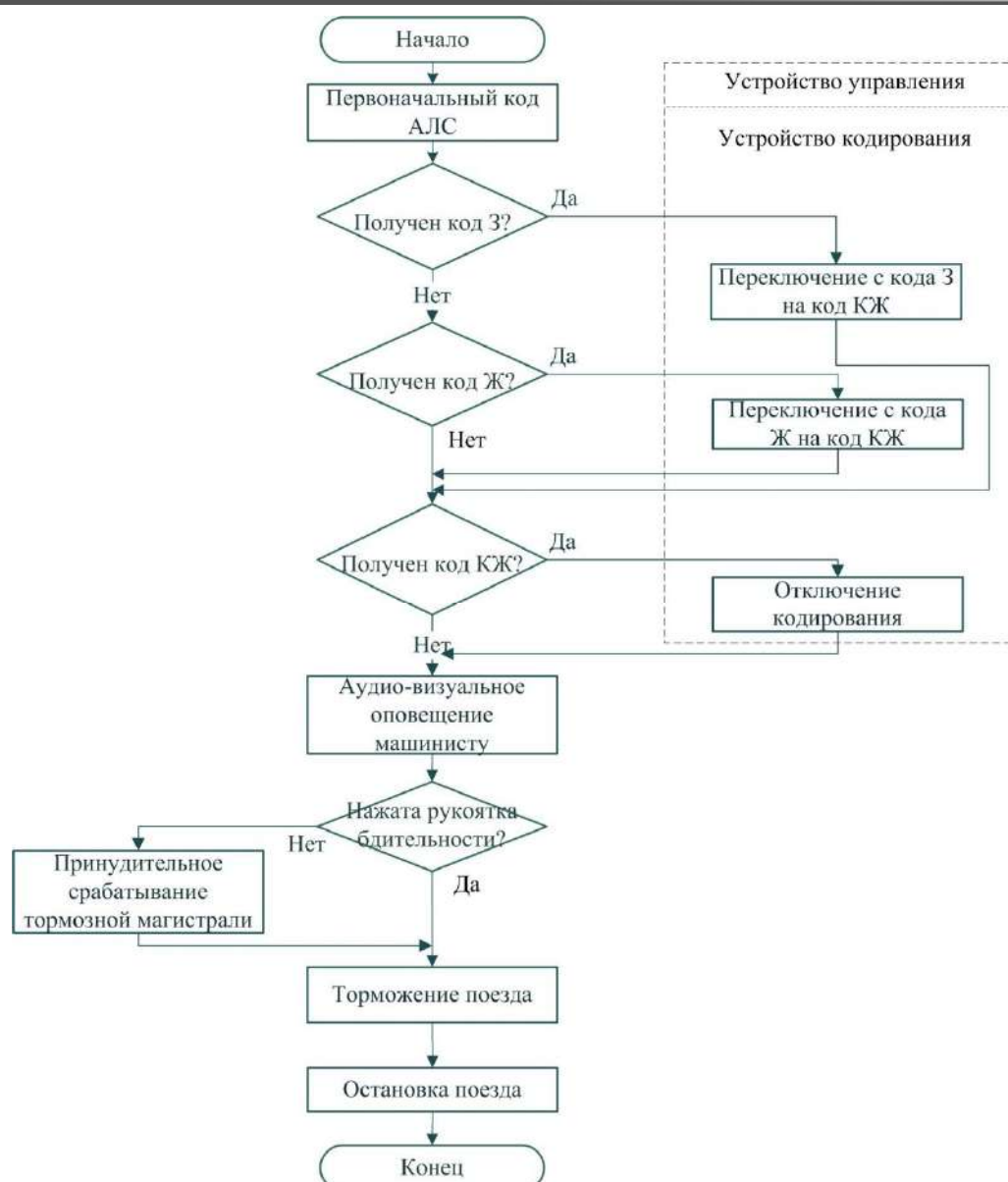


Рисунок 4 – Алгоритм подачи извещения на локомотив о нештатной ситуации на неохраняемом железнодорожном переезде

Время начала торможения для КППШ-5 равняется 9,6 с, а для КППШ-7 – 11,16 с. Поезд, движущийся со скоростью 80 км/ч, за это время пройдет 215 и 250 м соответственно. Следовательно, времени на торможение и предотвращение ДТП достаточно.

Для точной оценки возникновения нештатной ситуации необходимо рассчитать максимально допустимое время занятия переезда автотранспортом. При превышении этого времени комплекс будет принимать решение о возникновении нештатной ситуации на переезде и начнет передавать эту информацию машинисту. Расчет проведем на основании схемы переезда (см. рисунок 1). Рассмотрим случай с наихудшими условиями: минимальная скорость автотранспорта $v_{trans} = 8$ км/ч, максимальная длина автотранспорта $l_{trans} = 24$ м, самый распространенный тип переезда – двухполосный, пересекающий двухпутную железную дорогу.

Максимальное время нахождения автотранспорта в конфликтной зоне

$$t_{\max} = t_{\text{cross}} + t_{\text{trans}} + t_{\text{res}}. \quad (2)$$

Подставляя известные расстояния и скорость движения автомобиля получим:

$$t_{\max} = \frac{l_{\text{cros}} + l_{\text{trans}}}{0,28 \cdot V_{\text{trans}}} + t_{\text{res}}. \quad (3)$$

Длина двухпутного переезда (l_{cros}) состоит из расстояния от стоп-линии до рельса ($l_{\text{lin}} = 10$ м), ширины колеи ($l_{\text{rail}} = 1,5$ м), расстояния между осями пути ($l_{\text{axis}} = 4,1$ м) и расстояния габарита ($l_{\text{dim}} = 2,5$ м). Гарантированное время запаса ($t_{\text{res}} = 10$ с) [11]. Тогда

$$t_{\max} = \frac{l_{\text{lin}} + l_{\text{rail}} + l_{\text{axis}} + l_{\text{dim}} + l_{\text{trans}}}{0,28 \cdot V_{\text{trans}}} + t_{\text{res}}. \quad (4)$$

Подставим расчетные значение и получим:

$$t_{\max} = \frac{10 + 1,5 + 4,1 + 2,5 + 24}{0,28 \cdot 8} + 10 = 28,8 \approx 30 \text{ с.}$$

Таким образом, при превышении значения времени 30 с, зафиксированном датчиком контроля занятости (КЗ), принимается решение о нештатной ситуации и начинает работу алгоритм извещения машиниста приближающегося поезда об этой ситуации.

Полученный комплекс предупреждения нештатных ситуаций на неохраемых железнодорожных переездах позволяет машинисту получать информацию о нештатной ситуации на неохраемых переездах. Комплекс имеет небольшую стоимость и не требует дополнительного оборудования для организации канала связи. Для оценки эксплуатационных характеристик и надежности работы комплекса необходимо выполнить опытный образец и оснастить им пилотный полигон железной дороги. Совершенствование организации движения на неохраемых железнодорожных переездах позволит повысить безопасность движения поездов и сократить число ДТП. Уменьшение простоя поездов из-за ДТП на ЖДП и нарушения графика движения повысит эффективность работы железнодорожного транспортного комплекса.

Список литературы

1. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Вл. В. Сапожников, И. М. Кокурин, В. А. Кононов [и др.]; под ред. Вл. В. Сапожникова. – Москва : Маршрут, 2006. – 247 с. – Текст : непосредственный.
2. Комплексный учет параметров объектов инфраструктуры железной дороги, железнодорожного подвижного состава и автомобильного транспорта для обеспечения безопасности движения на переездах / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, Д. Г. Плотников, В. В. Хорошев. – Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 2 (4). – С. 167–194.
3. Повышение безопасности работы железнодорожных станций на основе совершенствования и развития станционной техники : учебное пособие / под ред. В. А. Кобзева. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 175 с. – Текст : непосредственный.
4. Барский, И. В. Комплексы «Кордон-М» КР. Новый уровень автоматической фиксации нарушений ПДД на пересечениях дорог / И. В. Барский. – Текст : непосредственный // Вестник НЦБЖД. – 2016. – № 1 (27). – С. 11–15.
5. Ахмедзянов, Г. Г. Исследование факторов, влияющих на работу железнодорожного переезда / Г. Г. Ахмедзянов, В. В. Дремин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 130–138.
6. Баранов, А. М. Повышение безопасности дорожного движения на нерегулируемых железнодорожных переездах / А. М. Баранов, А. В. Литвинов, А. Н. Зубарев. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии. – 2018. – № 6 (21). – С. 120–125.

7. Хорошев, В. В. Концепция полносвязного мониторинга инфраструктуры переездов / В. В. Хорошев, Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 1 (74). – С. 47–52.
8. Системы управления движением поездов на перегонах / В. М. Лисенков, П. Ф. Бестемьянов, В. Б. Леушин [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009. – Ч. 1. – 160 с. – Текст : непосредственный.
9. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира : учебное пособие / Г. Теег, С. В. Власенко, Э. Андерс [и др.]; под ред. Г. Теэга. – Москва : Интекст, 2010. – 496 с. – Текст : непосредственный.
10. Сороко, В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справочник : в 3 кн. / В. И. Сороко, В. М. Кайнов. – Москва : Планета, 2003. – Кн. 3. – 1120 с. – Текст : непосредственный.
11. Устройства железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Д. В. Шалягин, Н. А. Цыбуля, С. С. Косенко [и др.]. – Москва : Маршрут, 2006. – Ч. 1. – 587 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Sapozhnikov V.I., Kokurin I.M., Kononov V.A. and others *Ekspluatatsionnyye osnovy avtomatiki i telemekhaniki* [Basics of Railway Signaling & Interlocking]. Moscow: Rail route Publ., 2006, 247 p (In Russian).
2. Efanov D.V., Osadchiy G.V., Plotnikov D.G., Khoroshev V.V. Comprehensive accounting of the parameters of railway infrastructure facilities, railway rolling stock and road transport to ensure traffic safety at level crossings]. *Avtomatika na transporte – Transport automation*, 2018, no. 2 (4), pp. 167-194 (In Russian).
3. Kobzev V.A. *Povysheniye bezopasnosti raboty zheleznodorozhnykh stantsiy na osnove sovershenstvovaniya i razvitiya stantsionnoy tekhniki* [Improving the safety of railway stations on the basis of improving and developing station technology]. Moscow: Training and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2016, 175 p. (In Russian).
4. Barskiy I.V. Complexes «Kordon-M» KR. A new level of automatic fixation of traffic violations at road intersections. *Vestnik NTsBZhD – Bulletin of the NCFR*, 2016, no. 1 (27), pp. 11-15 (In Russian).
5. Akhmedzyanov G.G., Dremin V.V. Analysis of the factors affecting the operation of a level crossing. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 3 (47), pp. 130-138 (In Russian).
6. Baranov A.M., Litvinov A.V., Zubarev A.N. Improving the road safety at unregulated level crossings. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii – Modern materials, equipment and technologies*, 2018, no. 6 (21), pp. 120-125 (In Russian).
7. Khoroshev V.V., Efanov D.V., Osadchiy G.V. The concept of fully connected monitoring of level crossings. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2018, no. 1 (47), pp. 47-52 (In Russian).
8. Lisenkov V.M., Bestemyanov P.F., Leushin V.B. and others. *Sistemy upravleniya dvizheniyem poyezdov na peregonakh* [Control systems for the railway interlocking]. Moscow: Training and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2009, vol. 1, 160 p. (In Russian).
9. Teeg G., Vlasenko S.V., Anders E. and others *Sistemy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznykh dorogakh mira: uchebnoye posobiye dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Railway Signaling & Interlocking]. Moscow: Intext Publ., 2010, 496 p. (In Russian).
10. Soroko V.I., Kaynov V.M. *Apparatura zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki : spravochnik : v 3 knigakh. Kn.3* [Equipment for railway Signaling & Interlocking: in 3 volumes. Vol. 3]. Moscow: Planet Publ., 2003, 1120 p. (In Russian).

11. Shalyagin D.V., Tsybulya N.A., Kosenko S.S. and others. *Ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi* [Railway signaling, interlocking & communication devices]. Moscow: Rail route Publ., 2006, vol. 1, 587 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахмедзянов Гаяз Гумарович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: 1zzzz1omsk@gmail.com

Галеев Альберт Дамирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: hakkicrew@gmail.com

Ключников Максим Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Инженер кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: max.6855@yandex.ru

Литвинов Артем Валерьевич

Омская академия Министерства внутренних дел России (ОМА МВД России).

Комарова пр., д. 7, г. Омск, 644092, Российская Федерация.

Доцент кафедры деятельности органов внутренних дел в особых условиях ОМА МВД России.

Тел.: +7 (3812) 31-06-22.

E-mail: artyom_hawk@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Комплекс предупреждения нештатных ситуаций на неохраемых железнодорожных переездах / Г. Г. Ахмедзянов, А. Д. Галеев, М. В. Ключников, А. В. Литвинов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 74 – 82.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akhmedzyanov Gayaz Gumarovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Automation and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: 1zzzz1omsk@gmail.com

Galeyev Albert Damirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Senior lecturer of the department «Automation and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: hakkicrew@gmail.com

Klyuchnikov Maksim Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Engineer of the department «Automation and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: max.6855@yandex.ru

Litvinov Artem Valerievich

Omsk Academy of the Ministry of the Interior of Russia.

7, Komarova av., Omsk, 644092, the Russian Federation.

Associate professor of the department of Internal Affairs.

Phone: +7 (3812) 31-06-22.

E-mail: artyom_hawk@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Akhmedzyanov G.G., Galeyev A.D., Klyuchnikov M.V., Litvinov A.V. Accident prevention complex at passive level crossings. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 1 (49), pp. 74-82 (In Russian).

УДК 631.311: 631.331

Н. В. Буякова¹, А. В. Крюков^{2,3}, Д. А. Середкин³, И. А. Фесак³

¹ Ангарский государственный технический университет (АнгГТУ), г. Ангарск, Российская Федерация;

² Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрНИТУ), г. Иркутск, Российская Федерация;

³ Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. Цель представленных в статье исследований состояла в разработке компьютерных моделей для определения электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых трехфазными системами тягового электро-снабжения (СТЭ) напряжением 25 кВ. В отличие от традиционных однофазных СТЭ трехфазные системы отличаются электромагнитной сбалансированностью, обеспечивают симметричные нагрузки подстанций, повышение напряжений на токоприемниках подвижного состава, снижение несимметрии и несинусоидальности в питающих сетях 110 – 220 кВ. Однако вопросы количественной оценки условий электромагнитной безопасности в трехфазных тяговых сетях остаются неизученными. Для реализации сформулированной цели использовались методы моделирования режимов и ЭМП, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения, отличительная особенность которых состоит в применении фазных координат; при этом модели элементов СТЭ формируются на базе решетчатых схем замещения. Моделирование проведено для схем трехфазных СТЭ различной сложности, при этом сложная тяговая сеть была реализована путем модификации модели реальной СТЭ одной из магистральных железных дорог Восточной Сибири. Рассматриваемый участок включал в себя 33 тяговые подстанции и 32 межподстанционные зоны. Осуществлялся пропуск 93 поездов в каждом направлении с интервалом 12 минут, масса поездов нечетного направления составляла 3200 т, четного – 6000 т. Результаты моделирования показали, что по сравнению с типовой СТЭ напряжением 25 кВ в трехфазной системе максимум напряженности электрического поля увеличивается на 2,5 %. Максимальное значение напряженности магнитного поля снижается на 26 %. Аналогичные показатели для средних значений составляют 2,6 и 19 %. Разработанные цифровые модели позволили получить новые научные результаты, характеризующие пространственную структуру электромагнитных полей и условия электромагнитной безопасности в перспективных тяговых сетях трехфазной конструкции. Предложенная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться при проектировании перспективных СТЭ трехфазной конструкции. В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики применение этой методики позволит научно обоснованно подходить к анализу условий электромагнитной безопасности в тяговых сетях и разрабатывать мероприятия по ее улучшению.

Ключевые слова: трехфазная система тягового электроснабжения, электромагнитные поля, моделирование.

Natalia V. Buyakova¹, Andrei V. Kryukov^{2,3}, Dmitriy A. Seredkin³, Il'ya A. Fesak³

¹ Angarsk State Technical University (ASTU), Angarsk, the Russian Federation;

² Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, the Russian Federation;

³ Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF A THREE-PHASE TRACTION NETWORK

Abstract. The aim of the research presented in the article was to develop computer models for determining the electromagnetic fields (EMF) generated by three-phase 25 kV traction power supply systems (TPSS). In contrast to traditional single-phase TPSS, three-phase systems are electromagnetically balanced, provide symmetric loads of substations, increase voltages at current collectors of rolling stock, reduce asymmetry and non-sinusoidality in 110 – 220 kV supply networks. However, the issues of quantitative assessment of electromagnetic safety conditions in three-phase traction networks remain unstudied. To implement the formulated goal, we used the methods of modes and EMF simulation developed at the Irkutsk State University of Railway Transport, the distinctive feature of which is the use of phase coordinates; in this case, the models of TPSS elements are formed on the basis of lacelike equivalent networks. The simulation was carried out for three-phase TPSS schemes of different complexity, in which case the complex traction network was

implemented by modifying the model of a real TPSS of one of the main railroads of Eastern Siberia. Simulation results indicated that compared to the typical TPSS 25 kV, the maximum electric field strength increases by 2.5 % in the three-phase system. The maximum value of the magnetic field strength decreases by 26 %. Similar indicators for average values are 2.6 and 19 %. The proposed methodology and the developed computer models can be used in the design of promising three-phase TPSS. In the conditions of power engineering digitization, the application of this technique in practice will allow to apply a scientifically validated approach to the analysis of electromagnetic safety conditions traction networks and to develop its improvement.

Keywords: three-phase traction power supply system, electromagnetic fields, modeling.

Система тягового электроснабжения, оснащенная контактной сетью трехфазной конструкции, описана в монографии [1]. Применение такой системы обеспечивает симметричные нагрузки тяговых подстанций, повышение напряжений на токоприемниках подвижного состава, снижение несимметрии и несинусоидальности в питающих сетях 110 – 220 кВ [2]. Поэтому трехфазная СТЭ (рисунок 1) может составить конкуренцию системе тяги переменного тока напряжением 25 кВ.

Для практического использования трехфазных СТЭ необходима разработка адекватных цифровых моделей, обеспечивающих комплексное моделирование режимов таких систем и электромагнитных полей, создаваемых трехфазными тяговыми сетями (ТС). Задачам определения электромагнитных полей ТС и анализу условий электромагнитной безопасности (ЭМБ) посвящено значительное число работ. Так, например, вопросы обеспечения ЭМБ на объектах железных дорог переменного тока рассматриваются в монографиях [3, 4]. Результаты исследования ЭМП, воздействующих на персонал при работе на контактной сети, представлены в статье [5]. Анализ электромагнитной совместимости и ЭМБ в системах тягового электроснабжения приведен в работах [6, 7]. Электромагнитные поля, возникающие на высокоскоростных транспортных системах, рассматриваются в статье [8]. Методы решения задач анализа и моделирования электромагнитной совместимости СТЭ предложены в работе [9]. Результаты исследований электромагнитной обстановки на объектах железнодорожного транспорта приведены в статьях [10, 11].

Однако задача определения ЭМП трехфазных ТС в перечисленных работах не рассматривается. Для ее решения могут эффективно использоваться методы моделирования режимов и ЭМП, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения [12 – 14], отличительная особенность которых состоит в применении фазных координат; при этом модели элементов СТЭ формируются на базе решетчатых схем замещения [14].

Ниже приведены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей для определения ЭМП, создаваемых трехфазными системами тягового электроснабжения 25 кВ.

Методика моделирования и результаты моделирования. Методика моделирования электромагнитных полей ТС описана в работе [12]. Ее отличают следующие особенности: системность, универсальность, адекватность внешней среде и комплексность. Первая особенность заключается в расчете ЭМП на основе определения режимов сложной электроэнергетической системы, включающей в свой состав СТЭ, в фазных координатах. Универсальность достигается возможностью моделирования линий электропередачи и тяговых сетей различных конструкций. Адекватность внешней среде обеспечивается корректным учетом профиля подстилающей поверхности, подземных коммуникаций, а также протяженных металлических сооружений, расположенных вблизи моделируемой ЛЭП. Комплексность состоит в совмещении расчетов режимов сложной сети и определения напряженностей ЭМП. Достоверность методики подтверждена сопоставлением с результатами измерений на реальных объектах,

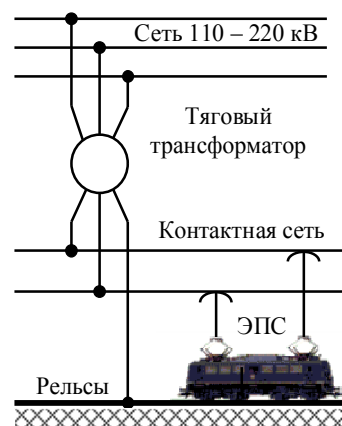


Рисунок 1 – Схема трехфазной СТЭ напряжением 25 кВ

в частности, для однопутного участка ТС расхождение между экспериментальными и расчетными данными не превосходило 2 % [12].

На первом этапе исследований на базе программного комплекса Fazonord [14] выполнено моделирование режима двухпутного участка трехфазной ТС протяженностью 2 км. Рассматривалась консольная схема питания. В конце консоли были приложены суммарные нагрузки $8 + j8$ МВ·А по контактной подвеске каждого пути. Для сравнения проведено моделирование типовых СТЭ 25 и 2×25 кВ при таких же тяговых нагрузках. На рисунке 2 показано расположение токоведущих частей анализируемых ТС. Результаты определения напряжений и токов сведены в таблицы 1 – 3.

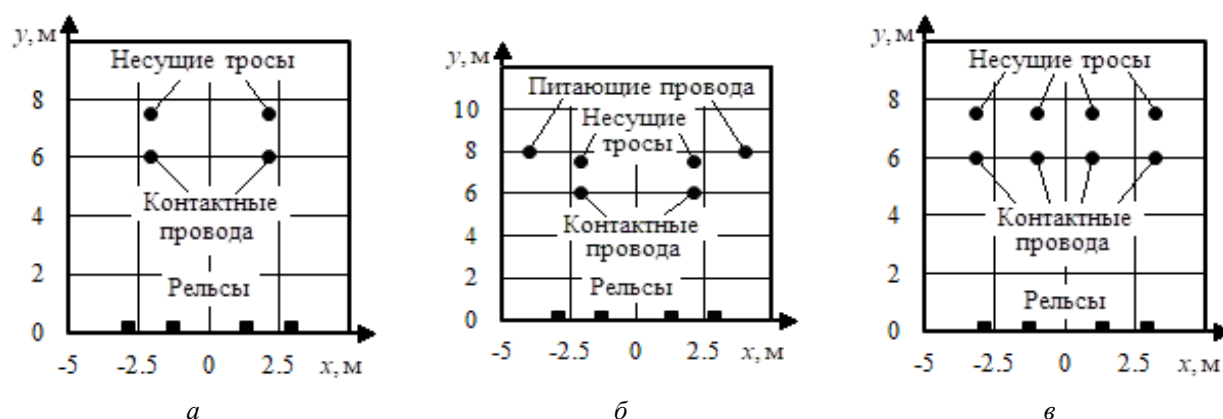


Рисунок 2 – Расположение токоведущих частей СТЭ: а – 25 кВ; б – 2×25 кВ; в – трехфазная

Таблица 1 – Результаты расчета режима СТЭ 25 кВ

СТЭ 25 кВ				
путь	U , кВ	φ_U , град	I , А	φ_I , град
1	25,3	–6	450,8	129
2	25,3	–6	450,8	129

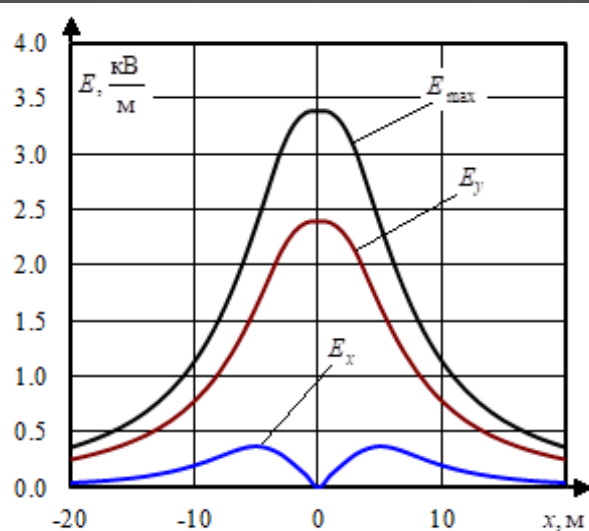
Таблица 2 – Результаты расчета режима СТЭ 2×25 кВ

СТЭ 2×25 кВ								
путь	контактная подвеска				питающий провод			
	U , кВ	φ_U , град	I , А	φ_I , град	U , кВ	φ_U , град	I , А	φ_I , град
1	25,9	26,2	246,4	159	26,1	–153	199	–15,8
2	25,9	26,2	245,4	159	26,1	–153	199	–15,8

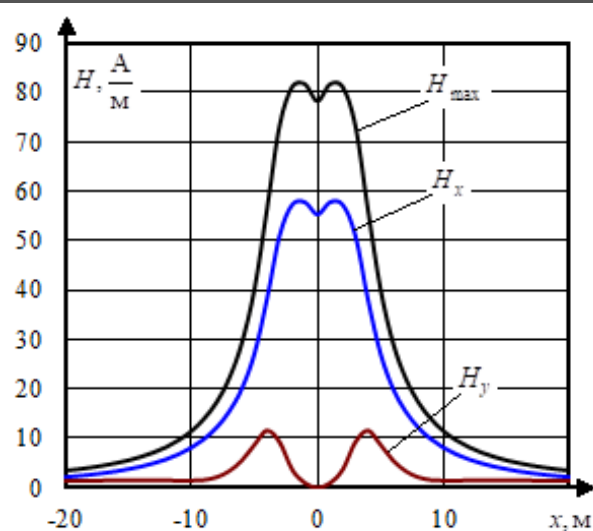
Таблица 3 – Результаты расчета режима трехфазной СТЭ

Путь	Контактная подвеска	U , кВ	φ_U , град	I , А	φ_I , град
1	Правая	27,3	–2,8	240	–162
	Левая	27,2	–63	240	–42
2	Правая	27,3	–2,8	240	–162
	Левая	27,3	–63	240	–42

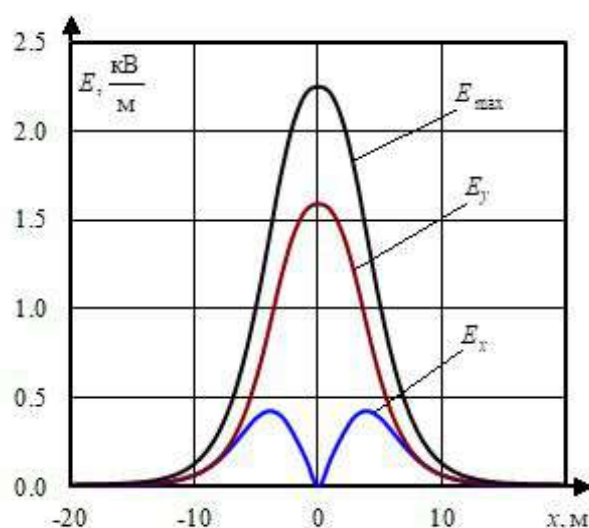
Зависимости напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 м от значения координаты x оси, направленной перпендикулярно трассе дороги, для рассматриваемых СТЭ показаны на рисунке 3. Сравнение амплитуд напряженности ЭМП приведено на рисунке 4. Максимальные амплитудные значения напряженностей сведены в таблицу 4.



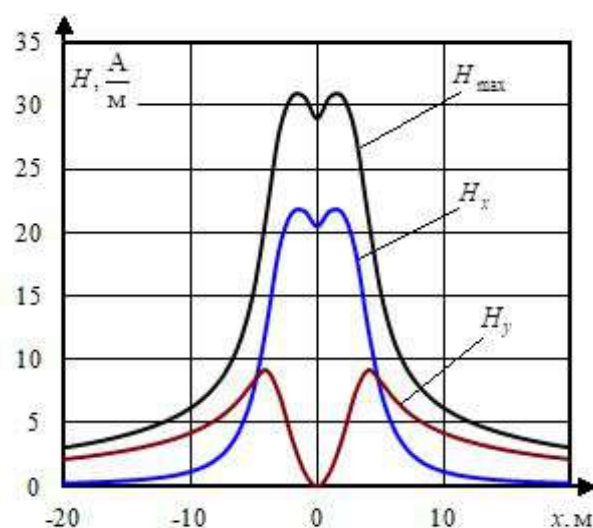
а



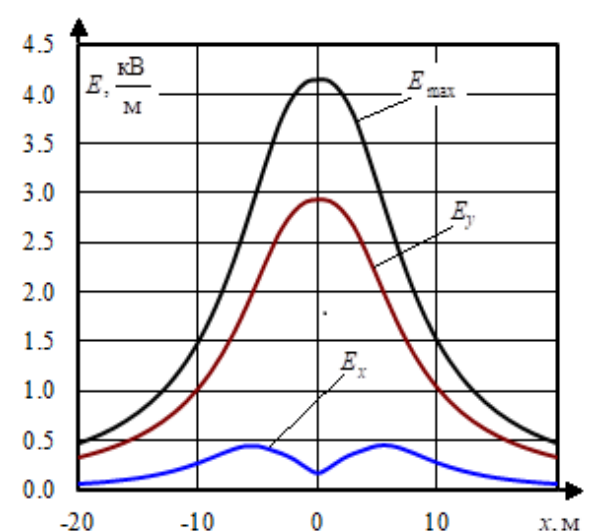
б



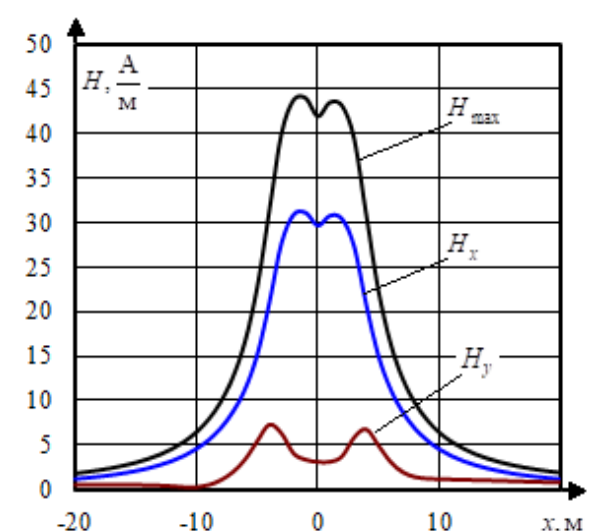
в



г



д



е

Рисунок 3 – Составляющие напряженностей электрического (а, в, д) и магнитного (б, г, е) полей тяговых сетей:
а, б – 25 кВ; в, г – 2×25 кВ; д, е – трехфазная

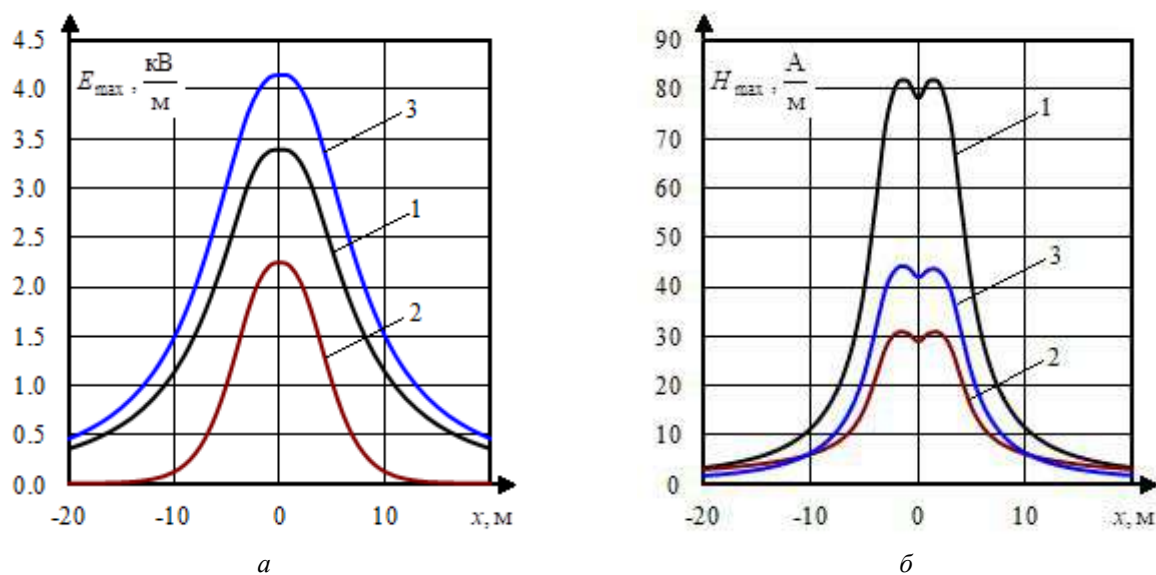


Рисунок 4 – Сравнение амплитудных значений напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей: 1 – 25 кВ; 2 – 2×25 кВ; 3 – трехфазная

Таблица 4 – Максимальные значения амплитуд напряженностей ЭМП

Параметр	25 кВ	2×25 кВ	Трехфазная	Различие, %	
				между столбцами 2 и 4	между столбцами 3 и 4
E_{max} , кВ/м	3,4	2,3	4,2	-23,5	-82,6
H_{max} , А/м	81,7	30,7	44,0	46,1	-43,3

По результатам моделирования, представленным в таблице 4 и на рисунке 4, можно сформулировать следующие выводы.

1. Максимум амплитуды напряженности электрического поля трехфазной СТЭ превышает аналогичные показатели для СТЭ 25 и 2×25 кВ на 24 и 83 % соответственно.

2. Электромагнитно уравновешенная трехфазная тяговая сеть характеризуется пониженными напряженностями магнитного поля (МП). Максимум амплитуды напряженности МП трехфазной ТС ниже аналогичного показателя для СТЭ 25 на 46 %; однако по сравнению с СТЭ 2×25 кВ имеет место превышение на 43 %.

На втором этапе исследований выполнено моделирование ЭМП при движении поездов. Рассматривались двухпутные участки тяговых сетей с двухсторонним питанием, протяженность которых была принята равной 50 км. На рисунке 5 показан график движения поездов с массой 6150 т. Токовые профили поездов приведены на рисунке 6. Моделирование проводилось для двух типов СТЭ: трехфазной и типовой 25 кВ.

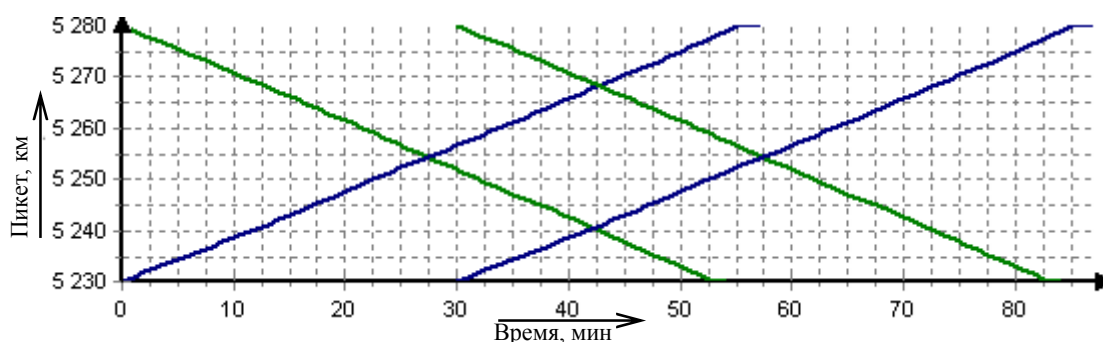


Рисунок 5 – График движения поездов

На рисунке 7 показаны временные зависимости напряжений и токов контактных подвесок нечетного пути для трехфазной и типовой СТЭ 25 кВ. Значения показателей для контактных

подвесок, отвечающих фазам А и В трехфазной ТС, отличаются незначительно, поэтому они представлены на графиках совпадающими линиями.

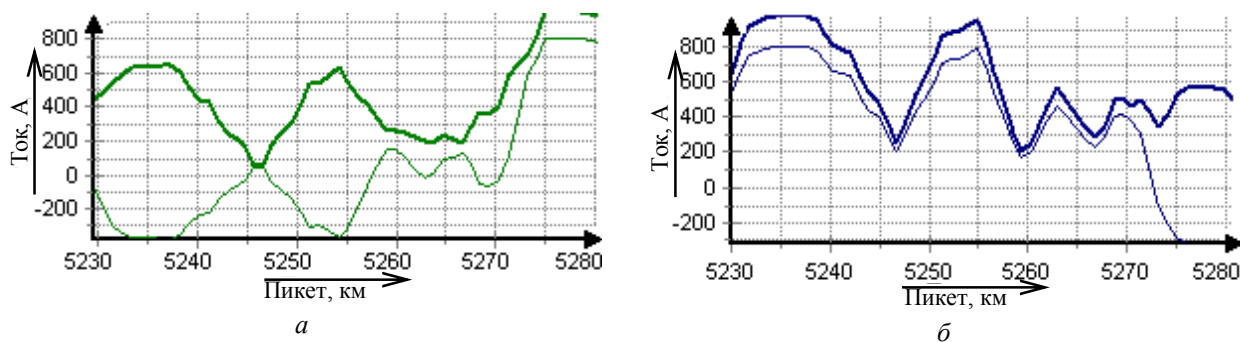


Рисунок 6 – Токовые профили: *а* – нечетное направление; *б* – четное направление

На рисунках 8 и 9 представлены зависимости максимальных и средних значений амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей от координаты x . Экстремумы данных зависимостей для электрического поля обеих из рассмотренных СТЭ наблюдаются в точке с нулевой координатой, а для магнитного поля – в точке, отвечающей $x = -2$ м для СТЭ 25 кВ и в точке $x = 2$ м для трехфазной ТС.

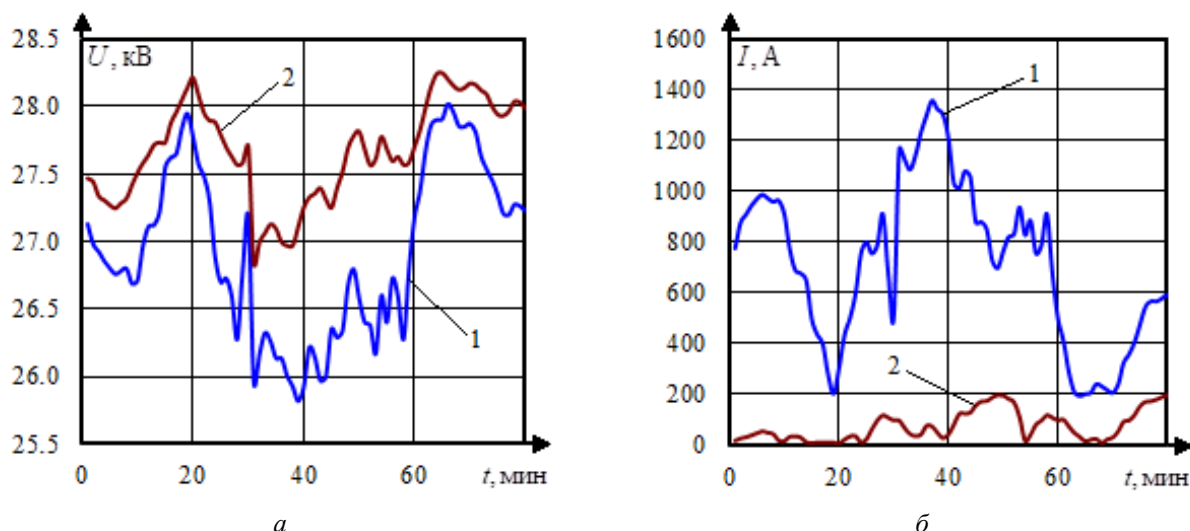


Рисунок 7 – Динамика изменений напряжения (*а*) и тока (*б*) нечетного пути: 1 – СТЭ 25 кВ; 2 – трехфазная СТЭ

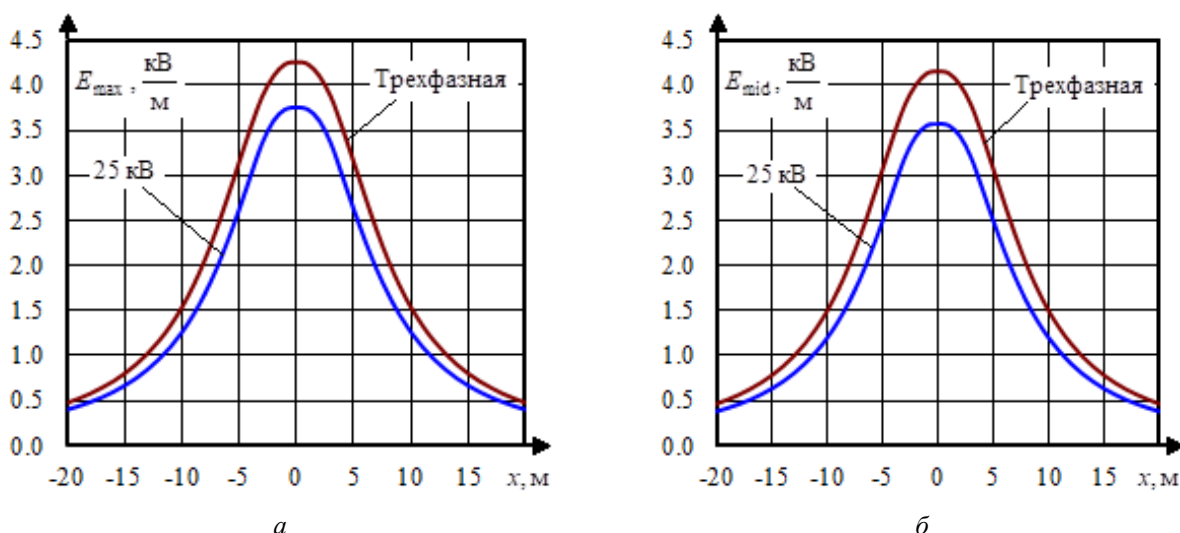


Рисунок 8 – Зависимости максимальных (*а*) и средних (*б*) амплитудных значений напряженности электрического поля на высоте 1,8 м от координаты x

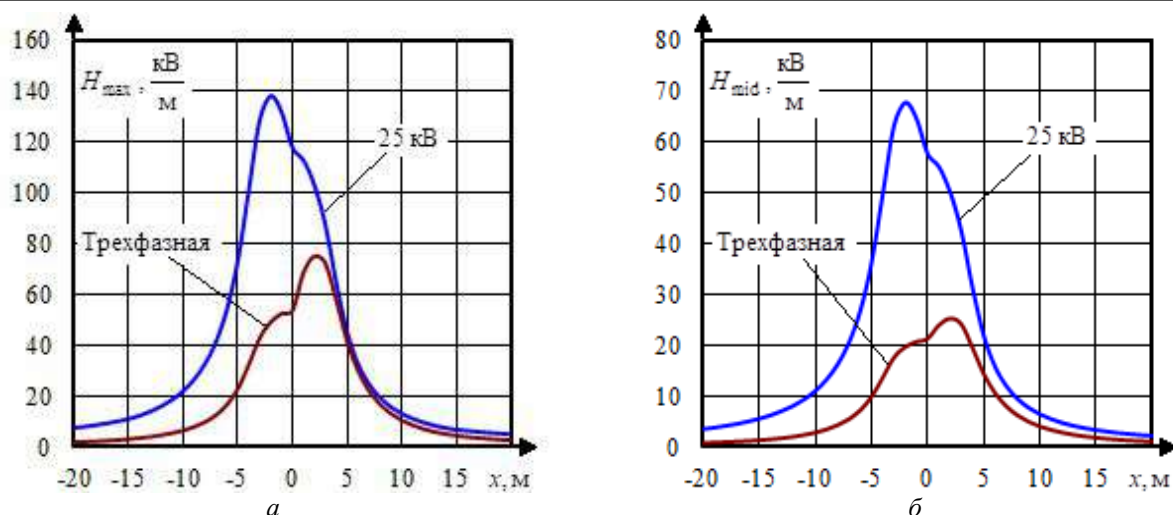


Рисунок 9 – Зависимости максимальных (а) и средних (б) амплитудных значений напряженности магнитного поля на высоте 1,8 м от координаты x

Зависимости амплитуд напряженностей от времени показаны на рисунке 10. Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей ЭМП

Параметр	СТЭ 25 кВ		Трехфазная СТЭ		Сравнение, %	
	максимальное	среднее	максимальное	среднее	между столбцами 2 и 4	между столбцами 3 и 5
$E_{\max}$, кВ/м	3,75	3,57	4,26	4,15	-13,6	-16,3
$H_{\max}$, А/м	137,9	67,7	75,0	25,3	45,6	62,6

На основе результатов моделирования ЭМП при движении поездов можно сделать следующие выводы.

1. Напряженность электрического поля рассмотренных СТЭ не превышает допустимых значений для электротехнического персонала, в трехфазной СТЭ имеет место повышение максимума амплитуды на 14 % по сравнению с типовой СТЭ 25 кВ.

2. Ряд значений напряженности магнитного поля СТЭ 25 кВ превышает нормируемую по действующему значению величину в 80 А/м, однако суммарная длительность превышений за время моделирования 87 мин составила около 5 мин. Трехфазная СТЭ позволяет уменьшить максимум амплитуды напряженности магнитного поля на 46 %, а среднее значение – на 63 %.

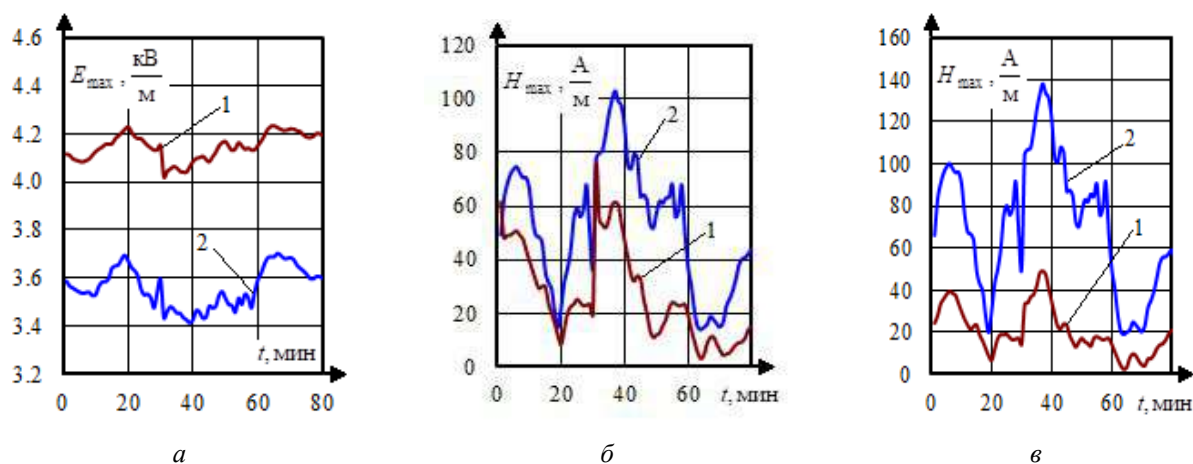


Рисунок 10 – Зависимость напряженности электрического (а) и магнитного (б, в) полей от времени в точках: $a - x = 0$ м; $b - x = 2$ м; $v - x = -2$ м; 1 – трехфазная СТЭ; 2 – СТЭ 25 кВ

На третьем этапе исследований было проведено моделирование участка одной из магистральных железных дорог Восточной Сибири с учетом системы внешнего электроснабжения. Участок включал в себя 33 тяговые подстанции и 32 межподстанционных зоны (МПЗ). Осуществлялся пропуск 93 поездов в каждом направлении с интервалом 12 мин, масса поездов нечетного направления составляла 3200 т, четного – 6000 т. На рисунке 11 показаны их токовые профили. Временные зависимости напряжений и токов нечетного пути для одной из МПЗ показаны на рисунке 12.

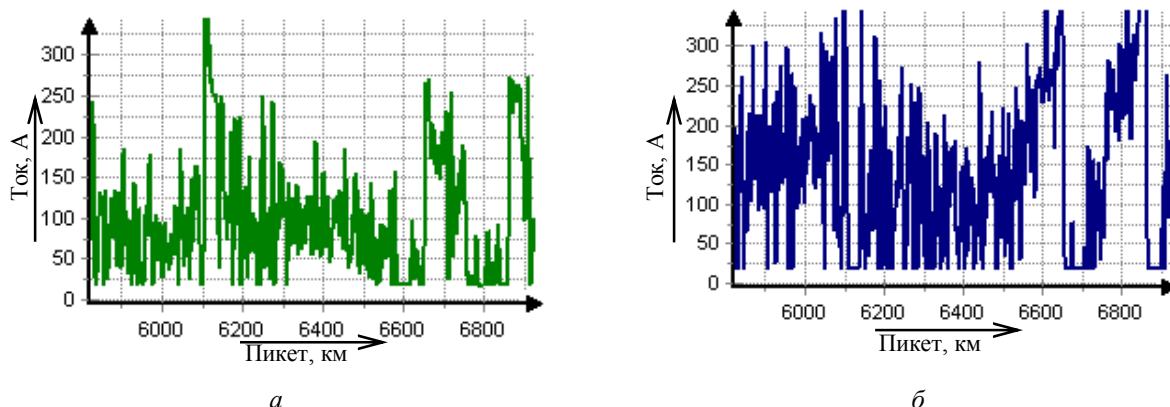


Рисунок 11 – Токовые профили: *а* – нечетное направление; *б* – четное направление

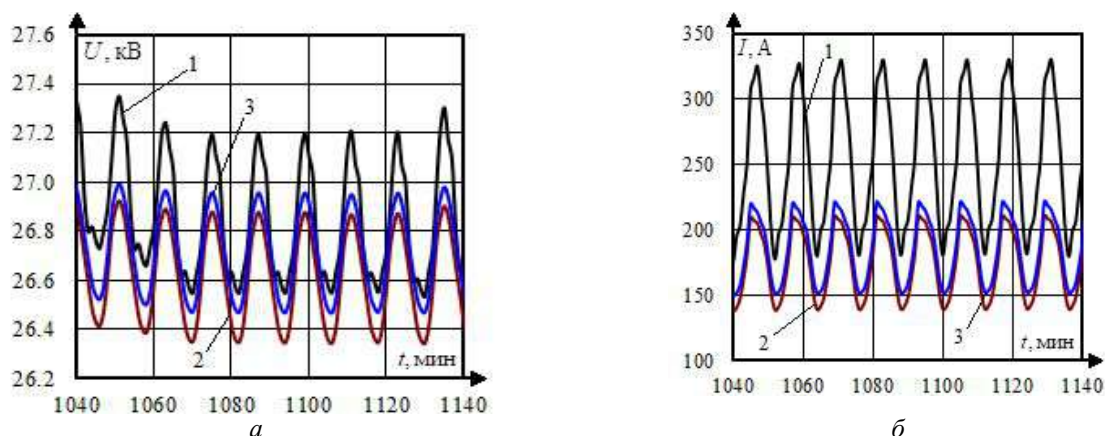


Рисунок 12 – Динамика изменения напряжений (*а*) и токов (*б*) в контактной подвеске нечетного пути:
1 – СТЭ 25 кВ; 2 – трехфазная СТЭ фаза А; 3 – трехфазная СТЭ фаза В

Зависимости амплитуд напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м от координаты x показаны на рисунке 13. Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей ЭМП

Параметр	СТЭ 25 кВ		Трехфазная СТЭ		Сравнение, %	
	максимальное	среднее	максимальное	среднее	между столбцами 2 и 4	между столбцами 3 и 5
$E_{\max}$, кВ/м	4,0	3,9	4,1	4,0	-2,5	-2,6
$H_{\max}$, А/м	69,1	52,6	51,1	42,5	26,1	19,2

Экстремумы данных зависимостей для электрического поля наблюдаются в следующих точках: $x = -1$ м для СТЭ 25 кВ; $x = 0$ для трехфазной СТЭ.

Для магнитного поля аналогичная координата x равна 2 м для обеих СТЭ. Динамика напряженностей показана на рисунке 14.

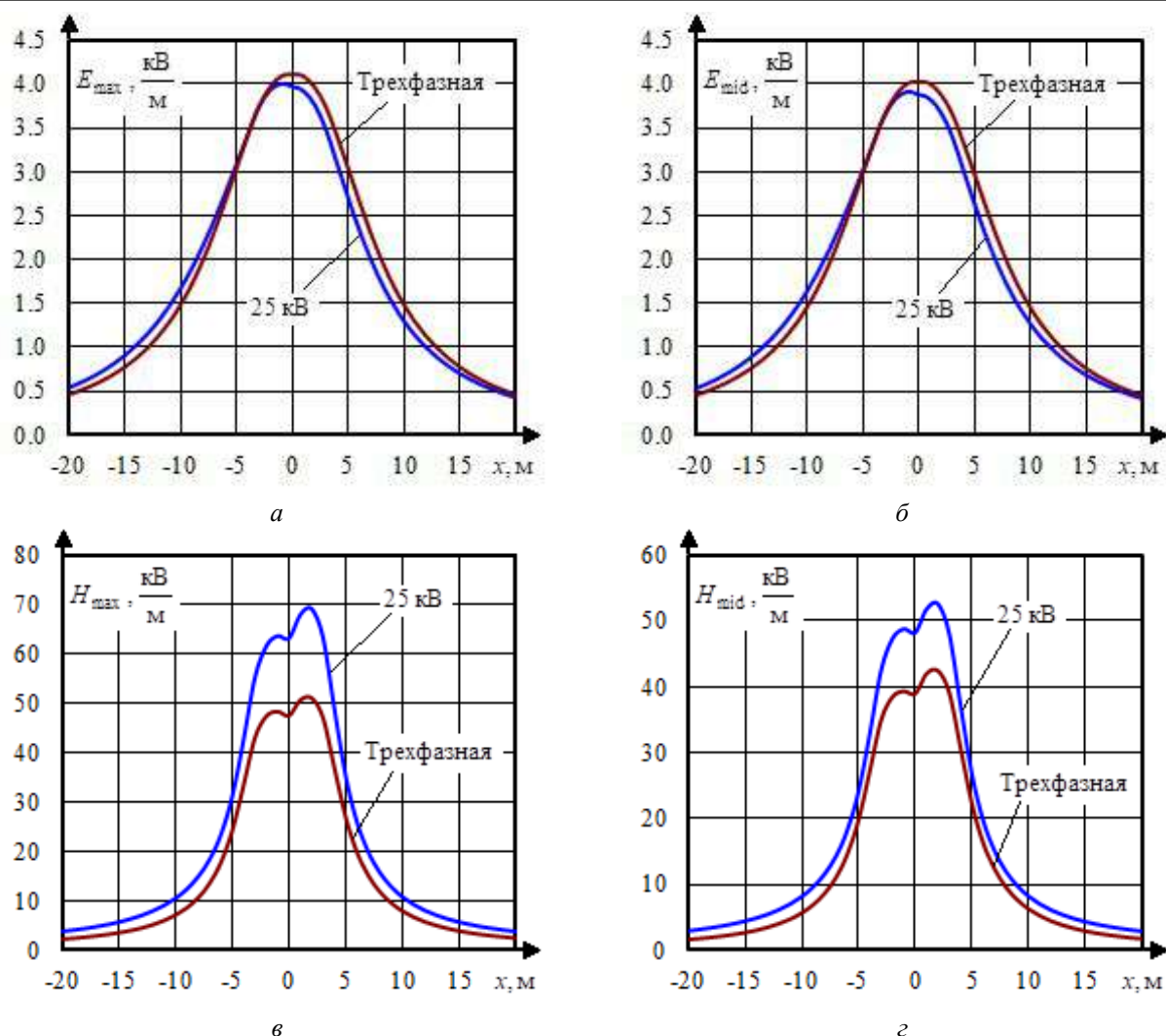


Рисунок 13 – Зависимости максимальных (а, в) и средних (б, г) амплитудных значений напряженности электрического (а, б) и магнитного (в, г) полей на высоте 1,8 м от координаты x

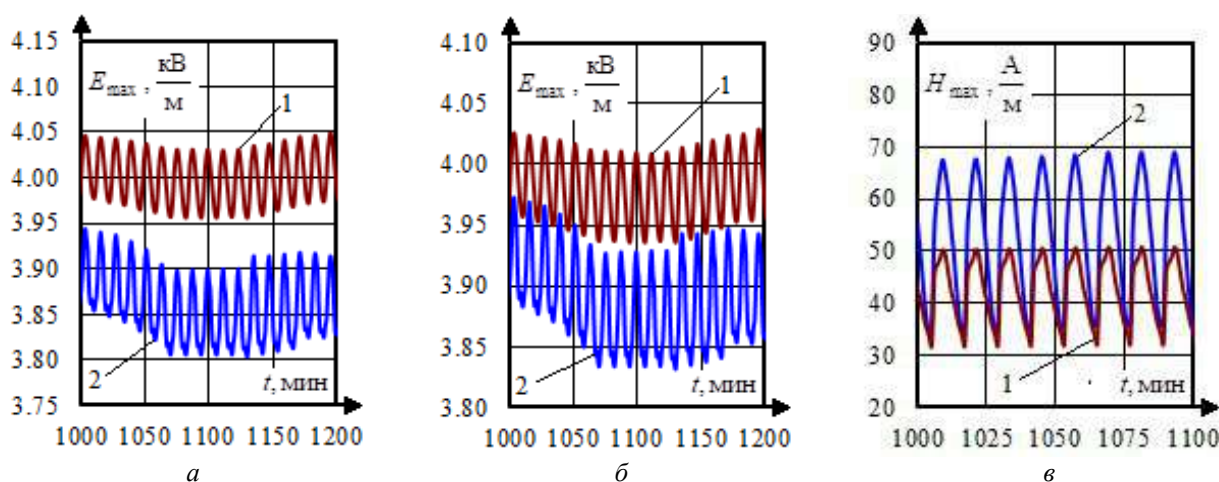


Рисунок 14 – Зависимости амплитуд напряженностей электрического (а, б) и магнитного (в) полей от времени в точках: а – $x = 0$ м; б – $x = -1$ м; в – $x = 2$ м; 1 – трехфазная СТЭ; 2 – СТЭ 25 кВ

На основе результатов третьего этапа моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Увеличение максимумов и средних величин напряженностей электрического поля трехфазной СТЭ по сравнению с типовой СТЭ 25 кВ не превышает 3 %.
2. Переход к трехфазной ТС позволяет уменьшить максимумы напряженностей магнитного поля на 26 %, а средних значений – на 19 %.

Разработанные цифровые модели позволили получить новые научные результаты, характеризующие пространственную структуру ЭМП и условия электромагнитной безопасности в перспективных тяговых сетях трехфазной конструкции.

Предложенная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться при проектировании трехфазных СТЭ. В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики применение этой методики позволит научно обоснованно подходить к анализу условий электромагнитной безопасности в тяговых сетях и разрабатывать мероприятия по ее улучшению.

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащенных устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат», проект № АААА-А20-12011690029-4 от 16.11.2020.

Список литературы

1. Аржанников, Б. А. Трехфазная система электрической тяги переменного тока / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – 90 с. – Текст : непосредственный.
2. Крюков, А. В. Моделирование режимов трехфазных систем тягового электроснабжения / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск, 2021. – С. 136–142.
3. Аполлонский, С. М. Проблемы электромагнитной безопасности на электрифицированной железной дороге. Т. II. Электромагнитная безопасность на железной дороге с переменным током в тяговой сети / С. М. Аполлонский. – Москва : Русайнс, 2017. – 414 с. – Текст : непосредственный.
4. Косарев, А. Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев. – Москва : Интекст, 2008. – 480 с. – Текст : непосредственный.
5. Закирова, А. Р. Исследования электромагнитных полей на рабочих местах персонала, обслуживающего контактную сеть / А. Р. Закирова, Ж. М. Буканов. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 2 (30). – С. 73–83.
6. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2013, 568 p.
7. Luan Xiaotian, Zhu Haijing, Qiu Bo, Han Bochong. EMC in Rail Transportation, *CUE2016-Applied Energy Symposium and Forum 2016: Low carbon cities & urban energy systems*, 2016, vol. 104, pp. 526 – 531. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216316472> (accessed 05.03.2022).
8. Kircher R., Klühspies J., Palka R., et al. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems, *Transportation Systems and Technology*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 152-166.
9. Baranowski S., Ouaddi H., Kone L. and Idir N. EMC Analysis of Railway Power Substation Modeling and Measurements Aspects, *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/34794> (accessed 05.03.2022).
10. Constantin Daniel Oancea, Florin Calin, Valentin Golea. On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations. *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8905871> (accessed 05.03.2022).
11. Lu Zhang, Yun Zhu, Song Chen, Dan Zhang. Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network. *2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9560338> (accessed 05.03.2022).

12. Буякова, Н. В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление / Н. В. Буякова, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Ангарск : Ангарский гос. техн. ун-т, 2018. – 382 с. – Текст : непосредственный.

13. Buyakova N. V., Kryukov A. V., Seredkin D. A., Le Van Thao Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety, *Rudenko International Conference "Methodological problems in reliability study of large energy systems" (RSES 2020)*, Kazan, 2020, vol. 216, pp. 01062.

14. Закарюкин, В. П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск : Иркутский гос. ун-т, 2005. – 273 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Arzhannikov B.A. *Trefaznaya sistema e'lektricheskoy tyagi peremennogo toka* [Three-phase AC electric traction system]. Ekaterinburg: Ural State University of Railway Transport Publ., 2019, 90 p. (In Russian).

2. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. [Modeling of modes of three-phase traction power supply systems]. *Povy'shenie e'ffektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya e'nergii v usloviyakh sibiri* [Improving the efficiency of energy production and use in Siberia]. Irkutsk, 2021, pp. 136-142 (In Russian).

3. Apollonsky S.M. *Problemy e'lektromagnitnoy bezopasnosti na e'lektroficirovannoy zheleznoj doroge. T. II. E'lektromagnitnaya bezopasnost' na zheleznoj doroge s peremennym tokom v tyagovoy seti* [Problems of electromagnetic safety on an electrified railway. Vol. II. Electromagnetic safety on an alternating current railway in a traction network]. Moscow: Rusajns Publ., 2017, 414 p. (In Russian).

4. Kosarev A.B. *Osnovy e'lektromagnitnoy bezopasnosti sistem e'lektrosnabzheniya ZhD transporta* [Fundamentals of electromagnetic safety of Railway transport power supply systems]. Moscow: Intext Publ., 2008, 480 p. (In Russian).

5. Zakirova A.R., Bukanov Zh.M. Issledovaniya e'lektromagnitny'x polej na rabochix mestax personala, obsluzhivayushhego kontaktnuyu set'. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya*. – *Bulletin of the Ural State University of Railways*, 2016, no. 2 (30), pp. 73-83 (In Russian).

6. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 568 p.

7. Luan Xiaotian, Zhu Haijing, Qiu Bo, Han Bocong. EMC in Rail Transportation, *CUE2016-Applied Energy Symposium and Forum 2016: Low carbon cities & urban energy systems*, 2016, vol. 104, pp. 526-531. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216316472> (accessed 05.03.2022).

8. Kircher R., Klühspies J., Palka R., et al. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems, *Transportation Systems and Technology*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 152-166.

9. Baranowski S., Ouaddi H., Kone L. and Idir N. EMC Analysis of Railway Power Substation Modeling and Measurements Aspects, *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/34794> (accessed 05.03.2022).

10. Constantin Daniel Oancea, Florin Calin, Valentin Golea. On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations. *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8905871> (accessed 05.03.2022).

11. Lu Zhang, Yun Zhu, Song Chen, Dan Zhang. Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network. *2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9560338> (accessed 05.03.2022).

12. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *E'lektromagnitnaya bezopasnost' v sistemax e'lektrosnabzheniya zhelezny'x dorog: modelirovanie i upravlenie* [Electromagnetic safety in railway power supply systems: modeling and management]. Angarsk: Angarsk State Technical University Publ., 2018, 382 p. (In Russian).

13. Buyakova N. V., Kryukov A. V., Seredkin D. A., Le Van Thao Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety, *Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems» (RSES 2020)*, Kazan, 2020, vol. 216, pp. 01062.

14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhnonnesimmetrichny`e rezhimy` e`lektricheskix system* (Complex-symmetric modes of electrical systems). Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 2005, 273 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буякова Наталья Васильевна

Ангарский государственный технический университет (АнГТУ).

Чайковского ул., д. 60, г. Ангарск, 665835, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», АнГТУ.

Тел.: +7 (902) 514-81-21.

E-mail: bn_900@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрННТУ).

Лермонтова ул., д. 104, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС, профессор кафедры «Электроснабжения и электротехники», ИрННТУ.

Тел.: +7 (902) 513-87-23.

E-mail: and_kryukov@mail.ru

Середкин Дмитрий Александрович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Тел.: +7 (904) 114-98-74.

E-mail: dmitriy987@mail.ru

Фесак Илья Анатольевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Тел.: +7 (950) 067-32-11.

E-mail: fesakilya@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Моделирование электромагнитных полей трехфазной системы тягового электроснабжения / Н. В. Буякова, А. В. Крюков, Д. А. Середкин, И. А. Фесак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 83 – 94.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Buyakova Natalia Vasilyevna

Angarsk State Technical University (ASTU).

60, Tchaikovsky st., Angarsk, 665835, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Power supply of industrial enterprises», ASTU.

Phone: +7 (902) 514-81-21.

E-mail: bn_900@mail.ru

Kryukov Andrey Vasilievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

Irkutsk National Research Technical University (INRTU).

104, Lermontov st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Electric power industry of transport», ISTU, professor of the department «Power supply and electrical engineering», INRTU.

Phone: +7 (902) 513-87-23.

E-mail: and_kryukov@mail.ru

Seredkin Dmitriy Aleksandrovich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS).

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

Postgraduate student of the department «Electric power industry of transport», ISTU.

Phone: +7 (904) 114-98-74.

E-mail: dmitriy987@mail.ru

Fesak Il'ya Anatol'evich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS).

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

Postgraduate student of the department «Electric power industry of transport», ISTU.

Тел.: +7 (950) 067-32-11.

E-mail: fesakilya@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Buyakova N.V., Kryukov A.V., Seredkin D.A., Fesak I.A. Modeling of electromagnetic fields of a three-phase traction network. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 1 (49), pp. 83-94 (In Russian).

А. М. Парамонов¹, Е. М. Резанов², В. Л. Юша¹

¹Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация;

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

О ПОВЫШЕНИИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В КУЗНЕЧНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХАХ

Аннотация. Рассматривается проблема повышения энергосбережения при использовании топлива в нагревательных печных агрегатах кузнечных и термических цехов для тепловой обработки металла под давлением (ковку и штамповку) и термообработку (закалку, отпуск, цементацию и нитроцементацию). Исследовались способы улучшения энергосбережения в промышленных печах и вопросы снижения расхода топлива в теплотехнологических процессах. Задача рационализации регенерации низкопотенциальной теплоты уходящих газов решалась не достаточно полно, так как не в полной мере учитывались экономические факторы и влияние определяющих параметров на температурный и тепловой режимы теплоутилизационных установок. Таким образом, актуальным является решение вопроса о целесообразной степени рекуперации теплового потенциала уходящих из нагревательной печи газов, нахождения наиболее выгодных параметров теплоутилизационных установок. Предложен критерий оценки эффективного уровня степени использования теплоты отработанных газов на выходе из нагревательных печей. Предлагается оценивать эффективность работы теплоутилизационной установки и определять оптимальную степень рекуперации теплоты уходящих из нагревательной печи дымовых газов исходя из разности изменяющихся затрат на сооружение и эксплуатацию теплоутилизационной установки. Разработаны метод и алгоритм определения технически и экономически целесообразной степени утилизации низкопотенциальной теплоты продуктов сгорания топлива после печных агрегатов в теплоутилизационной установке. Разработанный алгоритм обеспечил необходимые условия оптимальности, проверялся на достаточность путем проведения исследований на существование экстремума в испытываемой точке и положительность последующих производных. Получены зависимости экономически целесообразной температуры продуктов сгорания топлива после теплоутилизационной установки от определяющих факторов, основных величин, ценовых показателей и исходных данных, позволяющих в случае реконструкции и модернизации печного хозяйства кузнечных и термических цехов минимизировать затраты на реконструкцию, и повысить эффективность его использования. Обоснована практическая значимость применения предложенных разработок для практического использования при проектировании, реконструкции и модернизации печного хозяйства кузнечных и термических цехов.

Ключевые слова: нагревательная печь, рекуперация, теплоутилизационная установка, оптимизация, эффективность, энергосбережение.

Alexander M. Paramonov¹, Evgeniy M. Rezanov², Vladimir L. Yusha¹

¹Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation;

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

ON INCREASING ENERGY SAVING IN FORGE AND HEAT WORKS

Abstract. The problem of increasing energy saving when using fuel in heating furnaces of forging and thermal shops for heat treatment of metal under pressure treatment (forging and stamping) and heat treatment (quenching, tempering, carburizing and nitrocarburizing) is considered. Ways to improve energy saving in industrial furnaces and issues of reducing fuel consumption in thermal processes were studied. The problem of rationalizing the regeneration of low-grade heat of flue gases was not solved fully enough, since economic factors and the influence of the determining parameters on the temperature and thermal regimes of heat recovery plants were not fully taken into account. Thus, it is relevant to address the issue of the appropriate degree of recovery of the thermal potential of the gases leaving the heating furnace, finding the most favorable parameters of heat recovery plants. A criterion is proposed for assessing the effective level of the degree of utilization of the heat of exhaust gases at the outlet from the heating furnaces. It is proposed to evaluate the efficiency of the heat recovery plant and determine the optimal degree of heat recovery from flue gases leaving the heating furnace based on the difference in the changing costs for the construction and operation of the heat recovery plant. A method and an algorithm for determining the technically and economically feasible degree of utilization of low-potential heat of fuel combustion products after furnace units in a heat recovery unit have been developed. The developed algorithm provided the necessary optimality conditions, was checked for sufficiency by conducting studies on the existence of an extremum at the test point and the positivity of subsequent derivatives. The dependences of the economically viable temperature of the fuel combustion products after the heat recovery plant on the determining factors, basic values, price

indicators and initial data are obtained, which, in the case of reconstruction and modernization of the furnace facilities of forge and thermal shops, minimize the costs of reconstruction and increase the efficiency of its use. The practical significance of the application of the proposed developments for practical use in the design, reconstruction and modernization of the furnace facilities of forging and thermal shops has been substantiated.

Keywords: heating furnace, recuperation, heat recovery unit, optimization, efficiency, energy saving.

Как показывают результаты энергетических обследований печных хозяйств кузнечных и термических цехов промышленных предприятий, основная часть работающих в них нагревательных печей характеризуется достаточно низким значением коэффициента полезного использования топлива. Основная причина этого – значительная доля в уравнении теплового баланса печей (больше 60 %) потерь тепла топлива с дымовыми газами в окружающую среду [1, 5]. Вследствие этого актуальным является изыскание и исследование методов энергосбережения, рациональных тепловых схем печных агрегатов, позволяющих технико-экономически эффективно утилизировать тепло топлива, подведенного в нагревательную печь.

Возможность совершенствования тепловой работы печных агрегатов может осуществляться по следующим направлениям. Первое направление предусматривает снижение тепловых потерь в окружающую среду. Второе направление предусматривает возврат в рабочее пространство нагревательных печей какой-то доли тепловой энергии отработавших дымовых газов посредством передачи ее в регенераторе воздуху, подаваемому на горение топлива. В случае нецелесообразности по технико-экономическим соображениям полной утилизации теплоты уходящих газов для использования в рабочем пространстве нагревательной печи реализуется третье направление. При этом уходящие газы рассматриваются как вторичные энергетические ресурсы, а их энергетический уровень считается достаточно низким. Тепловая энергия данных газов может быть использована для производства внешней энергетической или технологической продукции в других установках. Следовательно, возникает задача выбора способа использования этой теплоты и типа установок для ее утилизации. Эта проблема рассматривалась в работах [2 – 9]. Авторами работ исследовались способы улучшения энергосбережения в промышленных печах и вопросы снижения расхода топлива в теплотехнологических процессах. Задача рационализации регенерации низкопотенциальной теплоты уходящих газов решалась не достаточно полно, так как не в полной мере учитывались экономические факторы и влияние определяющих параметров на температурный и тепловой режимы теплоутилизационных установок. Таким образом, актуальным является решение вопроса о целесообразности степени рекуперации теплового потенциала уходящих из нагревательной печи газов, нахождения наиболее выгодных параметров теплоутилизационных установок. Необходимо выполнить расчет оптимальных значений температуры дымовых газов после теплоутилизационной установки, одновременно принимая во внимание тот факт, что при этом происходит уменьшение температурного напора между теплопередающим и тепловоспринимающим теплоносителями в ней. Как следствие увеличивается поверхность теплообмена теплоутилизационной установки и повышаются капитальные затраты и эксплуатационные расходы на ее обслуживание.

В данном исследовании предлагается оценивать эффективность работы теплоутилизационной установки и определять оптимальную степень рекуперации теплоты уходящих из нагревательной печи дымовых газов исходя из разности изменяющихся затрат на сооружение и эксплуатацию теплоутилизационной установки:

$$\delta Z_{\text{тепл}} = C_1 + AK - C_2 B_T; \quad (1)$$

$$C_1 = HK; \quad (2)$$

$$K = P_n F_n; \quad (3)$$

$$C_2 = \Psi t_3; \quad (4)$$

$$B_{\tau} = bQ, \quad (5)$$

где C_1 – отчисления на амортизацию от первоначальной стоимости теплоутилизационной установки, руб./год; H, A – ставка отчисления на амортизацию и норма дисконтирования инвестиций, 1/год; K – единовременные капитальные вложения; P_n – стоимость единицы площади теплопередающей поверхности теплоутилизационной установки, руб./м²; F_n – площадь рекуперативной поверхности передачи теплоты от уходящих газов к нагреваемому теплоносителю, м²; B_{τ} – количество топлива, затрачиваемого на производство тепловой энергии в замещающей котельной установке, кг/с; C_2 – приведенные затраты на топливо, расходуемое на производство теплоэнергии в замещающей котельной установке, руб./кг(м³) (с/год); Q – количество произведенной в теплоутилизационной установке тепловой энергии, Вт; Π – цена топлива, руб./кг (м³); t_3 – время работы замещающей котельной установки, с/год; b – удельный расход топлива на производство тепловой энергии в замещающей котельной установке, кг(м³)/Дж.

При выборе типа и тепловой мощности теплоутилизационной установки прежде всего должно быть выполнено техническое и экономическое обоснование необходимости ее установки за печным агрегатом исходя из существующего на промышленном предприятии энергетического баланса и достоверной информации о технических характеристиках замещающей теплоэнергетической установки и технико-экономических показателях ее работы.

Стоимость единицы количества топлива Π в выражении (4) определяется так:

$$\Pi = P_{\kappa} + P_{\tau. \tau}, \quad (6)$$

где P_{κ} – покупная стоимость топлива; $P_{\tau. \tau}$ – расходы на доставку топлива.

Количество полученной в теплоутилизационной установке тепловой энергии рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{G_x(h_x'' - h_x')}{l_{\text{под}}}, \quad (7)$$

где G_x – количество теплоносителя, нагреваемого в теплоутилизационной установке, кг/с; h_x', h_x'' – энтальпия нагреваемого теплоносителя на входе и выходе из теплоутилизационной установки, Дж/кг; $l_{\text{под}}$ – коэффициент полезного действия теплоутилизационной установки.

Количество топлива в замещающей котельной установке на производство тепловой энергии определяется по выражению:

$$B_{\tau} = \frac{G_x(h_x'' - h_x')}{l_{\text{под}}} b. \quad (8)$$

Значение площади поверхности теплообмена F_n устройства для регенерации теплоты уходящих из рекуператора нагревательной печи продуктов сгорания топлива определяется по уравнению:

$$F_n = \frac{Q}{K_n \delta t \varepsilon} = \frac{B_n v_d (C_d' t_d' - C_d'' t_d'')}{K_n \delta t \varepsilon}, \quad (9)$$

где B_n – количество топлива, расходуемого на обеспечение заданного теплового режима нагревательной печи, кг(м³)/с; v_d – объем продуктов сгорания единицы количества топлива, м³/кг(м³); t_d', t_d'' – температура продуктов сгорания топлива на входе и выходе из теплоутилизационной установки, °C; C_d', C_d'' – объемные изобарные теплоемкости продуктов сгорания топлива перед теплоутилизационной установкой и за ней, Дж/(м³ · °C); K_n – коэффициент теп-

лопередачи в теплоутилизационной установке, Вт/(м²·°C); δt – температурный напор в теплоутилизационной установке, °C; ε – коэффициент учета влияния на теплопередачу перекрестного движения горячего и холодного теплоносителей.

Температурный напор в теплоутилизационной установке определяется по формуле [10]:

$$\delta t = a' \Delta t_6 + b' \Delta t_m = a' (t_d' - t_x'') + b' (t_d'' - t_x') = [a' (t_d' - t_x'') + b' t_x'] + b' t_d'', \quad (10)$$

где a' , b' – коэффициенты теплоносителя, подаваемого в теплоутилизационную установку и выдаваемого из нее; Δt_6 , Δt_m – больший на входе и меньший на выходе из теплоутилизационной установки температурные напоры между теплопередающим и тепловоспринимающим теплоносителями, °C; t_x' , t_x'' – температура холодного (тепловоспринимающего) теплоносителя перед теплоутилизационной установкой и за ней, °C.

Преобразуем выражение (10) в следующий вид:

$$\delta t = d_x + b' t_d'', \quad (11)$$

где $d_x = a' (t_d' - t_x'') - b' t_x'$.

Подставляя выражение (11) в (9), получим формулу для определения площади поверхности теплообмена теплоутилизационной установки:

$$F_n = \frac{B_n v_d (C_d' t_d' - C_d'' t_d'')}{K_n (d_x + b' t_d'') \varepsilon}. \quad (12)$$

Количество нагреваемого в теплоутилизационной установке холодного теплоносителя определяется по уравнению ее теплового баланса:

$$Q = V_d (C_d' t_d' - C_d'' t_d'') = G_x (h_x'' - h_x'); \quad (13)$$

$$G_x = \frac{V_d (C_d' t_d' - C_d'' t_d'')}{h_x'' - h_x'} = \frac{B_n v_d (C_d' t_d' - C_d'' t_d'')}{K_n \delta t \varepsilon}. \quad (14)$$

Выражение для расчета количества топлива в замещающей теплоэнергетической установке, расходуемого на получение такого количества теплоэнергии, которое равно количеству регенерируемой в теплоутилизационной установке теплоты уходящих из печного агрегата продуктов сгорания топлива, получено после подстановки уравнения (14) в выражение (8):

$$B_T = \frac{B_n v_d (C_d' t_d' - C_d'' t_d'') b}{l_{\text{под}}}. \quad (15)$$

С учетом зависимостей (2), (3), (12), (15) выражение (1) примет вид:

$$\delta Z_{\text{тепл}} = (H + A) K - C_2 B_T = (H + A) P_n F_n - \Pi t_3 B_T; \quad (16)$$

$$\delta Z_{\text{тепл}} = (H + A) P_n \frac{B_n v_d (C_d' t_d' - C_d'' t_d'')}{K_n (d_x + b' t_d'') \varepsilon} - \Pi t_3 b \frac{B_n v_d (C_d' t_d' - C_d'' t_d'')}{l_{\text{под}}}; \quad (17)$$

$$\delta Z_{\text{тепл}} = B_n v_d (C_d' t_d' - C_d'' t_d'') \left[\frac{(H + A) P_n}{K_n (d_x + b' t_d'') \varepsilon} - \frac{\Pi t_3 b}{l_{\text{под}}} \right]; \quad (18)$$

$$\delta Z_{\text{тепл}} = \frac{B_n v_d (C_d' t_d' - C_d'' t_d'') \left[(H + A) P_n l_{\text{под}} - \Pi t_3 K_n (d_x + b' t_d'') \varepsilon \right]}{K_n (d_x + b' t_d'') \varepsilon l_{\text{под}}}. \quad (19)$$

Расчет оптимальной температуры продуктов сгорания топлива при их выходе из устройства для регенерации их низкопотенциальной теплоты основан на использовании классического метода решения задач оптимизации.

Получив первую производную выражения (19) по t_d'' и приравняв ее к нулю, получим уравнение для расчета технически и экономически целесообразной температуры продуктов сгорания топлива после теплоутилизационной установки:

$$c(t_d'')^2 + e(t_d'') + q = 0, \quad (20)$$

где

$$c = C_d'' (b')^2 \zeta t_3 b K_n \varepsilon; \quad (21)$$

$$e = 2 C_d'' d_x \zeta t_3 b K_n \varepsilon; \quad (22)$$

$$q = C_d'' (d_x)^2 \zeta t_3 b K_n \varepsilon (H + A) P_n l_{\text{под}} (C_d'' d_x + C_d' t_d') b'. \quad (23)$$

Выражение для определения оптимальной температуры продуктов сгорания топлива, выдаваемых из устройства для регенерации их теплоты, $t_{d \text{ опт}}''$, полученное при решении уравнения (20), имеет вид:

$$t_{d \text{ опт}}'' = \frac{-e + \sqrt{e^2 - 4cq}}{2c}. \quad (24)$$

Если брать перед корнем правой части выражения (24) знак не плюс, а знак минус, то в этом случае значение $t_{d \text{ опт}}''$ будет ниже температуры холодного теплоносителя перед теплоутилизационной установкой, что противоречит теплотехническому смыслу.

В ряде случаев при формировании исходных данных для расчета $t_{d \text{ опт}}''$ необходимо учитывать то, что ее значение может быть меньше температуры точки росы и, следовательно, при этом снижается надежность работы установки (срок ее службы). Учет этого фактора предусматривается прежде всего в затратах на теплоутилизационную установку.

При выводе искоемых выражений принимались следующие допущения:

- производительность печного агрегата неизменна;
- температура в рабочем пространстве нагревательной печи постоянна.

Разработаны алгоритм и программа определения технически и экономически целесообразной температуры продуктов сгорания топлива после теплоутилизационной установки $t_{d \text{ опт}}''$. Уравнение (20) обеспечивает необходимые условия оптимальности, поэтому оно проверялось на достаточность путем проведения исследований на существование экстремума в испытываемой точке и проверялась положительность второй производной выражения (19). Проведенные расчеты подтвердили, что значения $t_{d \text{ опт}}''$, определенные по уравнению (20), отвечают минимуму целевой функции, т. е. его решение при выполнении условия $\delta Z / \delta t_d''$ существует и единственно.

С целью определения зависимости технически и экономически целесообразной температуры продуктов сгорания топлива после теплоутилизационной установки проведены исследования влияния определяющих факторов, основных величин, ценовых показателей и исходных данных на значение $t_{d \text{ опт}}''$.

Результаты проведенных исследований показали, что повышение ставки отчисления на амортизацию H и нормы дисконтирования инвестиций A , стоимости единицы площади теплопередающей поверхности рекуперативной теплоутилизационной установки P_n , температуры тепловоспринимающего теплоносителя за ней t_x'' технически и экономически целесообразная температура продуктов сгорания топлива после теплоутилизационной установки $t_{d \text{ опт}}''$ повышается (рисунки 1 и 2);

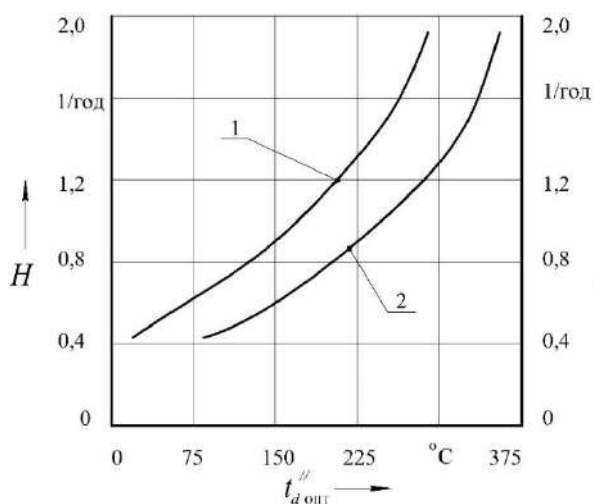


Рисунок 1 – Зависимости $t''_{d опт}$ от H и A :
 1 – $t''_{d опт} = f(H)$; 2 – $t''_{d опт} = f(A)$

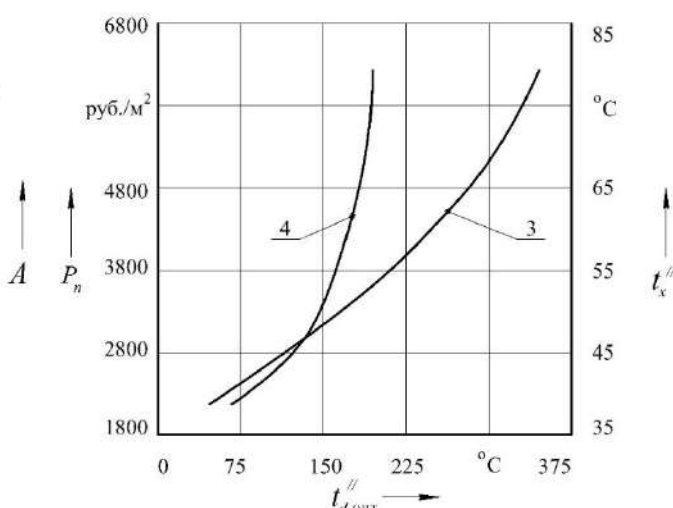


Рисунок 2 – Зависимости $t''_{d опт}$ от P_n и t''_x :
 3 – $t''_{d опт} = f(P_n)$; 4 – $t''_{d опт} = f(t''_x)$

повышение температуры продуктов сгорания топлива до рекуперативной теплоутилизационной установки t'_d , коэффициента теплопередачи от уходящих газов к нагреваемому теплоносителю в ней K_n , стоимости топлива Π , идущего на получение тепловой энергии в замещаемой теплоэнергетической установке, годовой продолжительности ее работы t_3 технически и экономически целесообразная температура продуктов сгорания топлива после теплоутилизационной установки $t''_{d опт}$ уменьшается (рисунки 3 и 4).

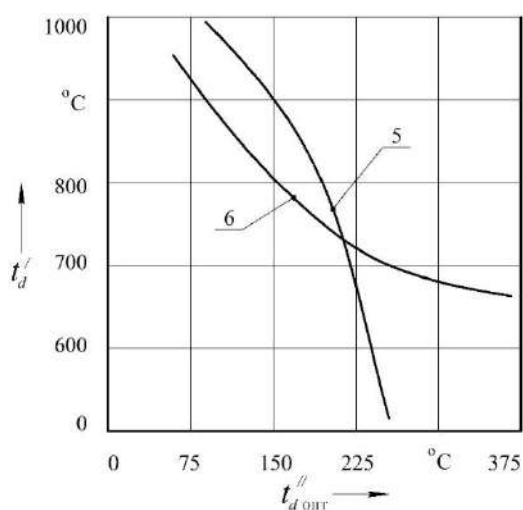


Рисунок 3 – Зависимости $t''_{d опт}$ от t'_d и K_n :
 5 – $t''_{d опт} = f(t'_d)$; 6 – $t''_{d опт} = f(K_n)$

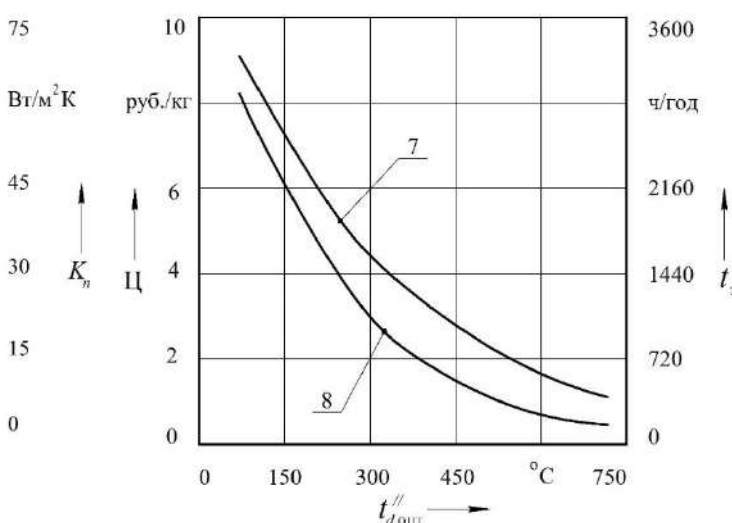


Рисунок 4 – Зависимости $t''_{d опт}$ от Π и t_3 :
 7 – $t''_{d опт} = f(\Pi)$; 8 – $t''_{d опт} = f(t_3)$

Разработанный алгоритм был реализован при следующих исходных данных: температура уходящих газов перед теплоутилизационной установкой – 710 °C; температура холодного теплоносителя перед теплоутилизационной установкой и за ней – 10 и 65 °C; время работы этой установки – 2000 ч/год; стоимость ее теплопередающей поверхности – 3400 руб./м²; стоимость расходуемого топлива в замещаемой установке – 5,6 руб./кг. В результате расчета значение $t''_{d опт}$ составило 187 °C.

Таким образом, подтверждается целесообразность использования предложенного алгоритма при реконструкции и модернизации печного хозяйства кузнечных и термических цехов.

Список литературы

1. Колотов, Е. А. Развитие конструкций нагревательных печей – требование рынка / Е. А. Колотов. – Текст : непосредственный // Черная металлургия. – 2013. – № 12. – С. 43–45.
2. Grip Niklas, Grip Carl-Erik, Nilsson Leif. Wavelet study of dynamic variations in steel and ironmaking rest gases. Potential effect on external use, *Apply Energy*, 2013, vol. 112, pp. 1032-1040.
3. Lu Bing, Fang Changrong, Wang Zhoufu. Naihuo cailiao, *Refractories*, 2007, vol. 4, no. 2, pp. 132-136.
4. Irretier Olaf. Resource savings and energy efficiency in heat treatment shops. *Heat Process*, 2014, vol. 12, no. 1, pp. 47-52.
5. Stumpp Hermann. Energy and global natural resources – from the point of the Furnace Industry, *Heat Process*, 2013, vol. 11, no. 1, pp. 92-93.
6. Krail Jurgen, Buchner Klaus, Altena Herwig. Assessment and optimization of energy in heat treatment plans, *Heat Process*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 51-60.
7. Parsunkin B., Andreev S., Logunova O., Akhmetov T. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Heat Process*, 2015, vol. 77, no. 5, pp. 1-7.
8. Tsai Hsun-Heng, Chang Shiuh-Ming Improvement of fueiconsumption and maintenance of heating furnaces using a modified heating pattern. *J Univ. Sci. and Technol*, Beijing, 2007, vol. 14, no. 1, pp. 27-32.
9. Yang Z., Luo X. Optimal set values of zone modeling in the simulation of a walking beam type reheating furnace on the steady-state operating regime, *Applied Thermal Engineering. Heat Process*, 2016, vol. 101, pp. 191-201.
10. Соломенцев, С. Л. Определение оптимальной температуры подогрева воздуха в рекуператорах металлургических печей, работающих на природном газе / С. Л. Соломенцев, А. В. Змачинский. – Текст : непосредственный // Труды Саратовского института ГипроНИИгаз «Использование газа в народном хозяйстве». – Вып. VI. – Саратов : Коммунист, 1967. – С. 316–324.

References

1. Kolotov E.A. The development of heating furnace designs is a market requirement. *Chernaja metallurgija – Ferrous metallurgy*, 2013, no. 12, pp. 43-45 (In Russian).
2. Grip Niklas, Grip Carl-Erik, Nilsson Leif. Wavelet study of dynamic variations in steel and ironmaking rest gases. Potential effect on external use, *Apply Energy*, 2013, vol. 112, pp. 1032-1040.
3. Lu Bing, Fang Changrong, Wang Zhoufu. Naihuo cailiao, *Refractories*, 2007, vol. 4, no. 2, pp. 132-136.
4. Irretier Olaf. Resource savings and energy efficiency in heat treatment shops. *Heat Process*, 2014, vol. 12, no. 1, pp. 47-52.
5. Stumpp Hermann. Energy and global natural resources – from the point of the Furnace Industry, *Heat Process*, 2013, vol. 11, no. 1, pp. 92-93.
6. Krail Jurgen, Buchner Klaus, Altena Herwig. Assessment and optimization of energy in heat treatment plans, *Heat Process*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 51-60.
7. Parsunkin B., Andreev S., Logunova O., Akhmetov T. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Heat Process*, 2015, vol. 77, no. 5, pp. 1-7.
8. Tsai Hsun-Heng, Chang Shiuh-Ming Improvement of fueiconsumption and maintenance of heating furnaces using a modified heating pattern. *J Univ. Sci. and Technol*, Beijing, 2007, vol. 14, no. 1, pp. 27-32.

9. Yang Z., Luo X. Optimal set values of zone modeling in the simulation of a walking beam type reheating furnace on the steady-state operating regime, *Applied Thermal Engineering. Heat Process*, 2016, vol. 101, pp. 191-201.

10. Solomencev S.L., Zmachinskij A.V. Determination of the optimal air heating temperature in the recuperators of metallurgical furnaces running on natural gas. *Trudy Saratovskogo instituta Gipronigaz «Ispol'zovanie gaza v narodnom hozjajstve» – Proceedings of the Saratov Institute of Gipronigaz «Use of gas in the national economy»*, issue VI, Saratov: Kommunist Publ., 1967, pp. 316-324 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Парамонов Александр Михайлович

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГТУ.

Тел.: +7 (3812) 65-31-84.

E-mail: amparamonov@mai.ru

Резанов Евгений Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: rezanov1@mail.ru

Юша Владимир Леонидович

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология», ОмГТУ.

Тел.: +7 (3812) 65-36-69.

E-mail: yusha@omgtu.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Парамонов, А. М. О повышении энергосбережения в кузнечных и термических цехах / А. М. Парамонов, Е. М. Резанов, В. Л. Юша. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 95 – 102.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Paramonov Alexander Mikhailovich

Omsk State Technical University (OmSTU).

Mira av., 11, Omsk, 644050, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Power system», OmSTU.

Phone: +7 (3812) 65-31-84.

E-mail: : amparamonov@mai.ru

Rezanov Evgeniy Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, assistant professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: rezanov1@mail.ru

Yusha Vladimir Leonidovich

Omsk State Technical University (OmSTU).

Mira av., 11, Omsk, 644050, Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Refrigeration and compressor equipment and technology», OmSTU.

Тел.: +7 (3812) 65-36-69.

E-mail: yusha@omgtu.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Paramonov A.M., Rezanov E.M., Yusha V.L. On increasing energy saving in forge and heat works. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 1 (49), pp. 95-102 (In Russian).

УДК 697.3:621.577.001

А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова

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

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА И ТЕПЛОВОГО НАСОСА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы совместного использования низкотемпературного солнечного коллектора и теплового насоса в системе солнечного теплоснабжения, комбинация которых позволяет обеспечить высокую энергоэффективность и устойчивую работу системы за весь период года. Изучение и развитие инновационных технологий в альтернативной энергетике является актуальным вопросом сегодняшнего дня. На основе фактических статистических климатических данных г. Омска произведен тепловой расчет солнечного коллектора и воздушного теплового насоса в системе теплоснабжения здания. Приведены значения солнечной инсоляции и угла наклона для города Омска по месяцам, определенные в зависимости от широты, построена зависимость изменения солнечной инсоляции города Омска от периода года. Представлена схема работы комбинированной системы солнечного коллектора и воздушного теплового насоса в системе отопления здания. Предложенная схема позволяет создать высокую энергоэффективность и устойчивую работу системы в период летних и переходных месяцев года. Приведена методика расчета выработки тепловой энергии с использованием комбинированной системы. Вычислено необходимое количество трубок солнечного вакуумного трубчатого коллектора СВК-20А. Предложена работа воздушного теплового насоса и солнечного коллектора по бивалентной схеме, а также рассмотрен график тепловой нагрузки системы отопления. Изучены теплофизические свойства рабочего вещества солнечной системы и воздушного теплового насоса при изменении температуры окружающей среды, исследована зависимость температуры замерзания водных растворов этиленгликоля и пропиленгликоля от массовой концентрации гликоля. Произведен технический расчет коэффициента преобразования теплового насоса (COP) для одного из учебных корпусов ОмГУПСа. Предложен эффективный вариант использования данной системы это системы отопления «теплый пол», «теплые стены» или «теплый потолок».

Ключевые слова: тепловой насос, солнечный коллектор, альтернативные источники энергии, система «низкопотенциальное тепло», энергосбережение, коэффициент преобразования.

Aleksandra Y. Finichenko, Anastasia P. Polozkova

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

COMBINED METHOD OF APPLICATION OF SOLAR COLLECTOR AND HEAT PUMP UNDER LOW TEMPERATURE CONDITIONS

Abstract. The article deals with the issues of joint use of a low-temperature solar collector and a heat pump in a solar heating system, the combination of which allows for high energy efficiency and stable operation of the system for the entire period of the year. The study and development of innovative technologies in alternative energy is a topical issue of today. Based on the actual statistical climatic data of the city of Omsk, a thermal calculation of the solar collector and the air heat pump in the heat supply system of the building was made. The values of solar insolation and the angle of inclination for the city of Omsk by months determined depending on latitude are given, the dependence of the change in solar insolation of the city of Omsk on the period of the year is plotted. The proposed scheme allows creating high energy efficiency and stable operation of the system during the summer and transitional months of the year. A method for calculating the generation of thermal energy using a combined system is given. The required number of tubes of solar vacuum tubular collector SVK-20A has been calculated. The work of an air heat pump and a solar collector according to a bivalent scheme is proposed, and a graph of the heat load of the heating system is also considered. The thermophysical properties of the working substance of a solar collector and an air heat pump are studied with a change in ambient temperature, the dependence of the freezing point of aqueous solutions of ethylene glycol and propylene glycol on the mass concentration of glycol is studied. A technical calculation of the COP coefficient for one of the educational buildings of OSTU was made. An effective option for using this system is proposed – heating systems «warm floor», «warm walls» or «warm ceiling».

Keywords: heat pump, solar collector, alternative energy sources, low-grade heat system, energy saving, conversion factor.

Климатические особенности Сибирского региона характеризуются высокими затратами на энергоресурсы и большими термодинамическими потерями. Расходы, которые рассчитаны на эксплуатацию тепловых сетей и котельных, с каждым годом увеличиваются. Названные объекты довольно часто являются причиной аварий, а это, в свою очередь, требует как экономического решения проблем, так и технического. В настоящее время актуальны разработка и внедрение технологий использования возобновляемой энергетики. Один из экономичных и экологичных альтернативных источников энергии – это теплонаносная установка (ТНУ), использование которой сокращает выбросы углекислого газа и уменьшает парниковый эффект планеты. Данная установка характеризуется нулевым выбросом вредных веществ в атмосферу, а средний КПД ТНУ составляет 67 %.

На сегодняшний день актуальны комбинированные системы на базе альтернативных источников тепловой энергии, которые состоят из нескольких источников тепловой энергии. Интеграция работы тепловых насосов и солнечных коллекторов является эффективным и экономически обоснованным решением.

Комбинированная тепловая система солнечного коллектора и воздушного теплового насоса, включенная в систему отопления, представлена на рисунке 1.

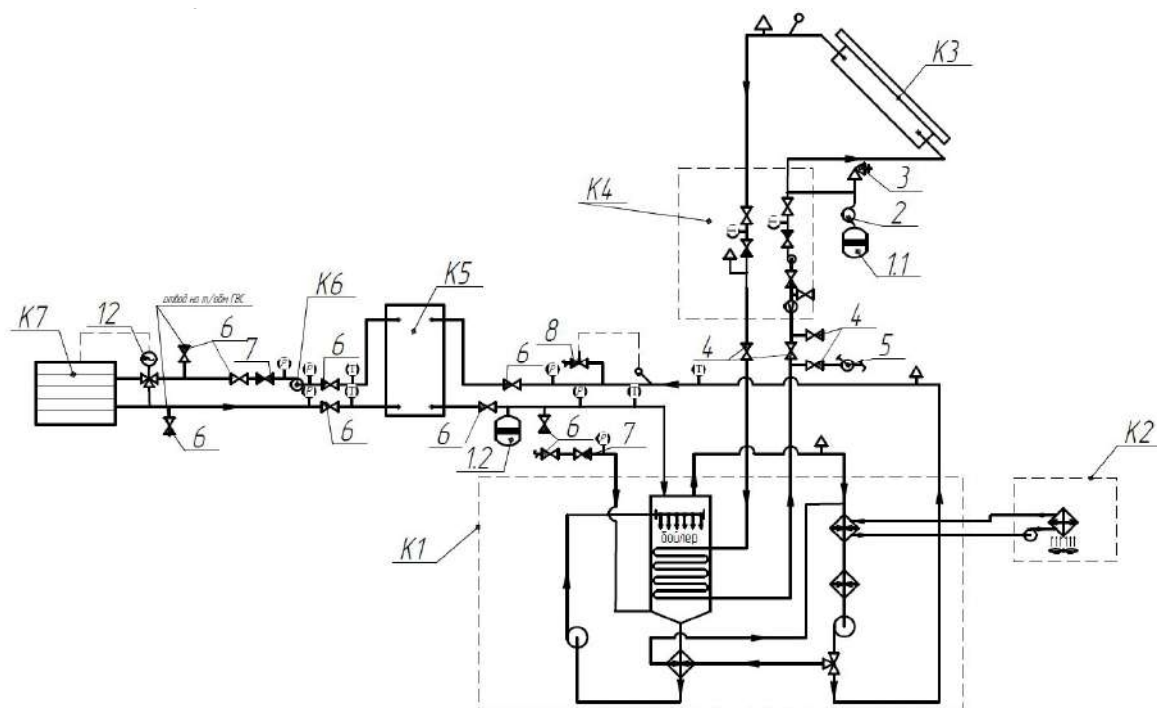


Рисунок 1 – Принципиальная схема комбинированной системы солнечного коллектора и воздушного теплового насоса в системе отопления

Комбинированная система совместной работы солнечного коллектора и воздушного теплового насоса представлена в корпусе № 2 ОмГУПС. Наименование и характеристики оборудования данной схемы: К-1 – бак-аккумулятор, К-2 – внешний модуль теплового насоса, К-3 – вакуумный коллектор, К-4 – насосная станция, К-5 – емкость буферная, К-6 – насос циркуляционный, К-7 – фанкойл, 1.1, 1.2 – бак мембранный расширительный, 2 – трубка прямая петлевая, 3 – предохранительный клапан, 4 – кран шаровый, 5 – насос ручной, 6 – кран шаровый, 7 – клапан обратный, 8 – клапан термической разгрузки, 9 – воздухоотводчик автоматизированный, 10 – манометр показывающий, 11 – термометр показывающий, 12 – клапан смесительный трехходовой с электроприводом.

В вакуумном солнечном коллекторе – К-3 за счет солнечного излучения производится нагрев рабочего вещества, которое за счет насосной станции – К-4 поступает в бак-аккумулятор – К-1, где в свою очередь отдает потенциальную тепловую энергию холодной воде. Параллельно внешний модуль (испаритель) воздушного теплового насоса передает энергию окружающей среды конденсатору, который находится в системе К-1 – бака-аккумулятора. Затем нагретая вода при помощи насоса прокачивается в накопительный бак К-5, где происходит разбор горячей воды и за счет циркуляционного насоса подается на систему отопления К-7 и потребителю горячего водоснабжения (ГВС). Для регулирования температуры воды в накопительном баке предусмотрен клапан термической разгрузки 8.

Применение рассмотренной схемы гелиосистемы позволяет решить следующие задачи проектирования: обеспечение максимального КПД по использованию солнечной энергии, так как гелиосистема является первой ступенью нагрева холодной (сетевой) воды; независимый от существующей системы управления системы отопления и ГВС контур автоматического регулирования; возможность использования гелиосистемы в зимний (отопительный) период в качестве предварительного нагрева холодной воды, что приведет к дополнительной экономии на нагреве от тепловой сети.

Для обеспечения теплоснабжения и системы горячего водоснабжения в корпусе ОмГУПС рассмотрен солнечный вакуумный трубчатый коллектор СВК-20 А.

Для определения поглощающей площади одной стеклянной трубки вакуумного коллектора СВК-20 А, который состоит из 20 трубок, необходимо площадь всего коллектора разделить на количество трубок: $1,66 / 20 = 0,083 \text{ м}^2$.

Определение необходимого количества трубок зависит от величины солнечной энергии из расчета на 1 квадратный метр. Тогда $1 \text{ м}^2 / 0,083 \text{ м}^2 = 12,05$. Другими словами, один квадратный метр площади поглощения равен 12 вакуумным трубкам коллектора СВК-20 А.

Для определения количества трубок солнечного коллектора для выработки тепловой мощности рассчитывается величина тепловой мощности одной трубки.

Мощность одной трубки (холодный период) рассчитывается из произведения площади поглощения одной трубки на инсоляцию одного квадратного метра для данного региона (холодный период) с учетом КПД солнечного коллектора.

Для расчета максимального КПД солнечного коллектора в таблице 1 приведена зависимость оптимального угла наклона солнечных панелей относительно поверхности земли от периода времени, и на рисунке 2 показан график изменения солнечной инсоляции в г. Омске.

Таблица 1 – Значения солнечной инсоляции и угла наклона солнечных панелей для г. Омска

Период	Солнечная инсоляция, кВт · ч/м ²	Оптимальный угол наклона, °
Январь	31	72
Февраль	61	64
Март	130	52
Апрель	181	36
Май	233	21
Июнь	243	11
Июль	243	18
Август	193	28
Сентябрь	135	44
Октябрь	74	59
Ноябрь	35	70
Декабрь	23	75
Среднее за год	131,8	45,7

При рассмотрении применения комбинированной схемы солнечного коллектора и воздушного теплового насоса в системе отопления и ГВС необходимо учитывать климатические особенности региона, экономическое обоснование и топливно-энергетический баланс района.

От среднегодовых и сезонных показателей температуры окружающего наружного воздуха зависит выбор точки бивалентности – это переломное значение, когда система теплоснабжения переходит на дублирующий источник теплоты, так как в системе с применением альтернативных источников энергии всегда необходимо учитывать дополнительный «традиционный» источник (в нашем случае это электрокотел), когда температура на улице становится слишком низкой (рисунок 3). Теплоснабжающая установка берет низкопотенциальное тепло из окружающего воздуха, и эффективность работы теплового насоса (коэффициент COP) напрямую зависит от значения наружных температур, а солнечный коллектор также меняет свои температурные значения в зависимости от времени суток и наружной температуры.

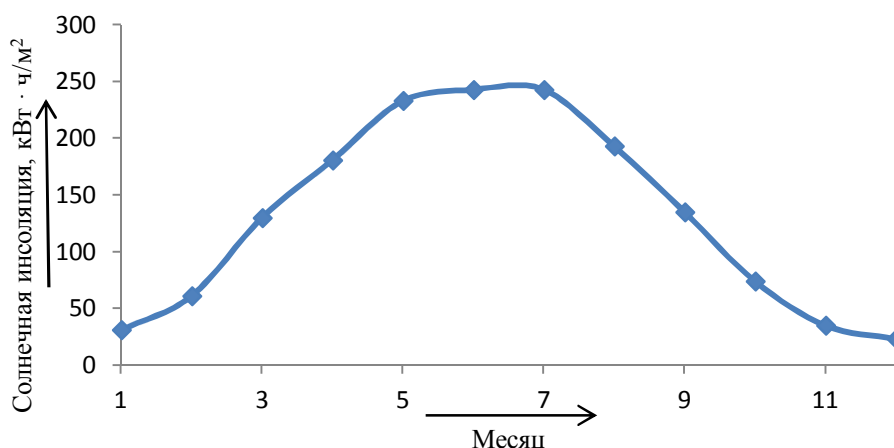


Рисунок 2 – График изменения солнечной инсоляции в г. Омске

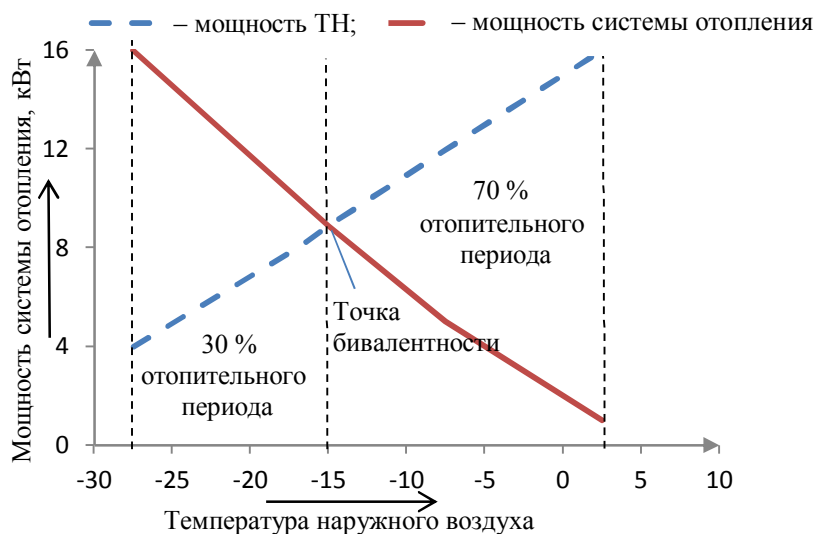


Рисунок 3 – График нагрузки системы отопления

Работа воздушного теплового насоса и солнечного коллектора по бивалентной схеме является более экономически оправданной: в этом случае не увеличивается заданное значение тепловой мощности для покрытия редких нагрузок в наиболее холодные дни и, следовательно, уменьшается стоимость комбинированной системы, как следствие, соблюдается эффективная окупаемость капиталовложений за счет экономии энергозатрат. Капитальные затраты могут быть как единовременными, так и распределенными на несколько периодов.

В качестве рабочего вещества в солнечных коллекторах обычно принимается рабочее вещество пропиленгликоль или этиленгликоль, а в контуре теплового насоса применяется фреон. Рассмотрение теплофизических свойств рабочих веществ солнечного коллектора и воздушного

теплового насоса при изменении температуры окружающей среды является немаловажным вопросом в изучении применения комбинированной схемы для системы отопления и ГВС.

При низких температурах окружающей среды и в ночное время суток, когда нет солнечного излучения на солнечные коллекторы, а следовательно, нет передачи теплоты в баки-аккумуляторы, температура горячей воды в системе снижается и теплота, расходуемая на ГВС, уменьшается. Необходимо изучить, как меняются температура и вязкость рабочего вещества в зависимости от снижения температуры окружающей среды. Температура замерзания пропиленгликоля (этиленгликоля) зависит от концентрации водного раствора.

В таблице 2 представлены значения температуры замерзания водных растворов выбранных рабочих веществ в зависимости от их концентрации.

Таблица 2 – Температура замерзания водных растворов этиленгликоля и пропиленгликоля

Массовая концентрация гликоля, %	Этиленгликоль, °С	Пропиленгликоль, °С
10	–3	–3
15	–5	–5
20	–8	–7
25	–11	–10
30	–14	–13
40	–22	–21
50	–34	–33
60	–48	–51

При изменении температуры этиленгликоля (пропиленгликоля) существенно изменяются их физические свойства.

Увеличение плотности и вязкости этиленгликоля при понижении температуры значительно изменяет потери напора, это, в свою очередь, приводит к нарушению циркуляции теплообменных процессов в системе солнечных коллекторов. На рисунке 4 представлены графики зависимости падения напора в зависимости от температуры пропиленгликоля (этиленгликоля), т. е. рабочего вещества.

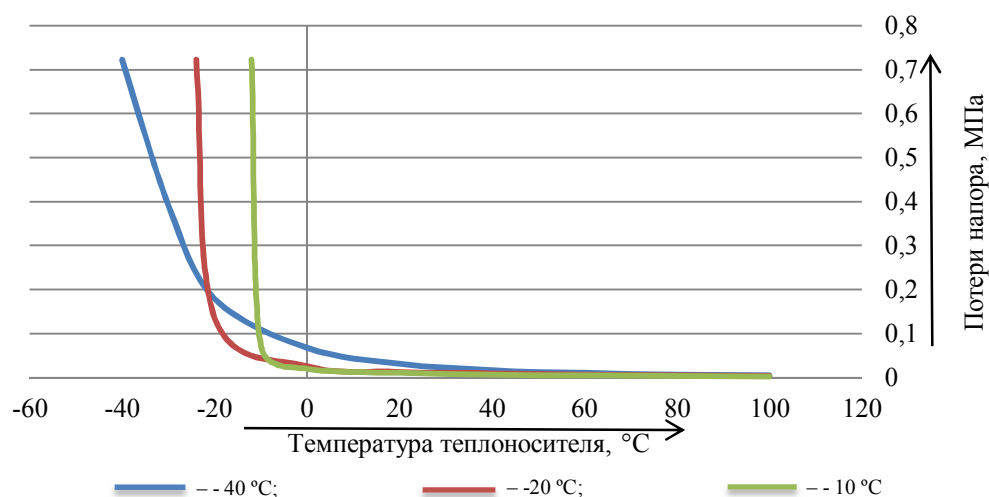


Рисунок 4 – Графики зависимости падения напора в зависимости от температуры пропиленгликоля (этиленгликоля)

Учитывая значительное влияние температуры теплоносителя на его вязкость, необходимо уделять особое внимание гидравлическим расчетам и, в частности, диаметрам трубопроводов, соединяющих коллекторы.

Рассмотрим КПД бивалентной установки, учитывая технико-экономические показатели. В исследуемом случае теплоснабжение системы отопления осуществляется от комбинированной установки в составе солнечного коллектора и теплового насоса.

Источники теплоснабжения:

солнечный коллектор СВК-20 А, три секции, $S_{\text{общ}} = 1,66 \text{ м}^2$. Прогнозируемая выработка: весна – 1440 кВт, лето – 900 кВт. КПД солнечного коллектора – 70 %. Настраиваемый параметр: $T = +60 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

тепловой насос Sila AS18,8I-EVI 3/3(НС) типа «воздух – вода». Прогнозируемая часовая выработка при $T_{\text{нар}} = +7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{обр}} = +35 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 19 кВт, потребление – 4,2 кВт. Настраиваемый параметр: $T_{\text{обр}} = +37 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{под}} = +42 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Технико-экономические показатели работы солнечного коллектора: суточная выработка летом составит около 40 – 50 кВт, среднечасовая – до 4 кВт при нулевой облачности, это соизмеримо с нагревом $1,5 \text{ м}^3$ воды до температуры $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в сут, расход электроэнергии на циркуляционный насос – 102 Вт. Стоимость использования электроэнергии в среднем за месяц доходит до 180 руб. Результирующая выработка в июле 2021 г. – 1201,11 кВт/ч. При тарифе электроэнергии 6 руб./кВт стоимость составит 7206,6 руб. Общая выработка за теплый период года с июля по октябрь – 4169 кВт, что соответствует 25014 руб. Актуальная стоимость оборудования на начало 2022 г.: 250 000 руб., источник бесперебойного питания обойдется в 40 000 руб., работы по установке – 72 000 руб., итого – 362 000 руб.

Технико-экономические показатели работы теплового насоса с сентября по декабрь: общая выработка тепла – 18831 кВт, при тарифе 6,3 руб./кВт получаем 118 635 руб., затрачено электроэнергии 7384 кВт, с учетом тарифа электроэнергии в сумме это 46 519 руб. Средний COP за исследуемый период – 2,5; экономия составила 72 200 руб. За отопительный период до мая экономия составит минимум 187 452,9 руб. Затраты на приобретение составили 380 000 руб., на монтаж и наладку – до 155 000 руб., всего – 535 000 руб.

Таким образом, окупаемость бивалентной установки по сравнению с электрическим отоплением составит $(362\,000 + 535\,000) / 187\,452,9 = 4,7$ года. Использование данной установки благоприятно сказывается на экологии региона, а также при грамотном совместном использовании источников альтернативной энергии можно в расчете на долгосрочный период получить и экономическую выгоду от применения комбинированной схемы. Внедрение системы солнечных коллекторов позволило сократить время работы теплового насоса с 2814 ч за отопительный сезон до 2240 ч (сокращение на 21 %). Выгодным решением для эффективного использования обсуждаемой системы являются системы отопления «теплый пол», «теплые стены» или «теплый потолок», так как в данных устройствах используется теплоноситель (рабочее вещество) с низкой температурой – $40 - 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В свою очередь радиаторные системы отопления в Сибирском регионе, учитывая климатические особенности, эффективно работают при температурных показателях рабочего тела $80 - 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Использование теплового насоса в такой системе может привести к снижению эффективности радиаторов в 2,5 раза, так как нагрев теплоносителя с помощью комбинированной системы наиболее эффективен до уровня $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$, при увеличении площади теплопередачи («теплый пол», «теплые стены» или «теплый потолок») получаем максимально возможный КПД системы отопления. Для обеспечения выгодного экономического и технического использования комбинированной установки применяют определенные меры для повышения результативности. Во-первых, система отопления должна быть доукомплектована дублирующим нагревателем (электрическим, газовым, твердотопливным), котлом и т. д. Во-вторых, организация термомодернизации является одним из доступных и эффективных способов энергосбережения.

Список литературы

1. Flaksman A.S., Mozgovoy A.I., Lopatkin D.S., Dikikh V.A., Shamsov I.S., Romanova Ju.A., Morkovkin D.E., Bovtrikova E.V. Prospects for the development of alternative energy sources in the

world energy, *International scientific and practical conference on ensuring sustainable development in the context of agriculture, green energy, ecology and earth science*. Smolensk, 2021, vol. 723, pp. 40-50.

2. Ovchinnikova S., Kukinova G., Borovkov A., Markina N. Environmental substantiation for the use of alternative energy sources, *22nd international scientific conference on energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies*, Voronezh, 2020, vol. 244, pp. 58-60.

3. Башмаков, И. Российский ресурс энергоэффективности: масштабы, затраты и выгоды / И. Башмаков. – Текст : непосредственный // Вопросы экономики. – 2009. – № 2. – С. 71–89.

4. Selikhov Y.A., Kotsarenko V.A., Kapustenko P.O., Klemeš J.J. The performance of plastic solar collector as part of two contours solar unit, *Chemical Engineering Transactions*, 2018, vol. 70, pp. 2053-2058.

5. Dosov S.V., Fedoseev V.N., Emelin V.A., Loginova S.A. digital technological model of heat exchange control in an air heat pump in a low-rise building. *Journal of physics: conference series «Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ITMM 2021- Mathematical Modeling and Computational Methods in Problems of Electromagnetism, Electronics and Physics of Welding»*, 2021, pp. 52-80.

6. Lertsatitthanakorn C., Jamradloedluk J., Rungsiyopas M., Therdyothin A., Soponronnarit S. Performance analysis of a thermoelectric solar collector integrated with a heat pump, *Journal of Electronic Materials*, 2013., vol. 42, no. 7, pp. 2320-2325.

7. Хамоков, М. М. Определение эффективности солнечных коллекторов, используемых в регионах с низкой солнечной радиацией / М. М. Хамоков, А. Б. Чапаев. – Текст : непосредственный // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2020. – № 6 (81). – С. 33–39.

8. Кадцын, И. И. Исследование теплофизических характеристик грунтов города Омска для проектирования геотермальных зондов / И. И. Кадцын, А. П. Стариков, В. Р. Ведрученко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 128–139.

9. James A., Srinivas M., Jayaraj S., Mohanraj M. Thermal analysis of heat pump systems using photovoltaic-thermal collectors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, pp. 90-115.

10. Зверева, Э. Р. Снижение вредных выбросов тепловых электростанций / Э. Р. Зверева, Т. М. Фарахов, А. Р. Исхаков. – Текст : непосредственный // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2011. – № 1 (8). – С. 39–44.

11. Kuziyev O.A.U. Analysis of energy parameters of steam-compressor heat pumps, *Current scientific research in the modern world*, 2021, no. 3-1 (71), pp. 6-8.

References

1. Flaksman A.S., Mozgovoy A.I., Lopatkin D.S., Dikikh V.A., Shamsov I.S., Romanova Ju.A., Morkovkin D.E., Bovtrikova E.V. Prospects for the development of alternative energy sources in the world energy, *International scientific and practical conference on ensuring sustainable development in the context of agriculture, green energy, ecology and earth science*. Smolensk, 2021, vol. 723, pp. 40-50.

2. Ovchinnikova S., Kukinova G., Borovkov A., Markina N. Environmental substantiation for the use of alternative energy sources, *22nd international scientific conference on energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies*, Voronezh, 2020, vol. 244, pp. 58-60.

3. Bashmakov I. Russian Energy Efficiency Resource: Scale, Costs and Benefits. *Economic issues – theoretical and scientific-practical journal of general economic content*, 2009, no. 2, pp. 71-89 (In Russian).

4. Selikhov Y.A., Kotsarenko V.A., Kapustenko P.O., Klemeš J.J. The performance of plastic solar collector as part of two contours solar unit, *Chemical Engineering Transactions*, 2018, vol. 70, pp. 2053-2058.

5. Dosov S.V., Fedoseev V.N., Emelin V.A., Loginova S.A. digital technological model of heat exchange control in an air heat pump in a low-rise building. *Journal of physics: conference series «Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, IITMM 2021- Mathematical Modeling and Computational Methods in Problems of Electromagnetism, Electronics and Physics of Welding»*, 2021, pp. 52-80.
6. Lertsatitthanakorn C., Jamradloedluk J., Rungsiyopas M., Therdyothin A., Soponronnarit S. Performance analysis of a thermoelectric solar collector integrated with a heat pump, *Journal of Electronic Materials*, 2013., vol. 42, no. 7, pp. 2320-2325.
7. Hamokov M.M., Chapaev A.B. Determination of the efficiency of solar collectors applied in regions with low solar. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta – Ambassador of the north caucasian federal university*, 2020, no. 6 (81), pp. 33-39 (In Russian).
8. Kadtsyn I.I., Starikov A.P., Vedruchenko V.R. Study of the thermophysical characteristics of the soil of the city of omsk for the design of geothermal probes. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 128-139 (In Russian).
9. James A., Srinivas M., Jayaraj S., Mohanraj M. Thermal analysis of heat pump systems using photovoltaic-thermal collectors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, pp. 90-115.
10. Zvereva E.R., Farakhov T.M., Iskhakov A.R. Reduction of harmful emissions of thermal power plants. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Ambassador of Kazan state energy university*, 2011, no. 1 (8), pp. 39-44 (In Russian).
11. Kuziyev O.A.U. Analysis of energy parameters of steam-compressor heat pumps, *Current scientific research in the modern world*, 2021, no. 3-1 (71), pp. 6-8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Финиченко Александра Юрьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-06-23.

E-mail: Finichenko@mail.ru

Полозкова Анастасия Петровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студентка кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (983) 660-07-63.

E-mail: nastypolozkova6@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Финиченко, А. Ю. Комбинированный метод применения солнечного коллектора и теплового насоса в условиях низких температур / А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 103 – 110.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Finichenko Aleksandra Yurevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Heat Power Engineering », OSTU.

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

E-mail: Finichenko@mail.ru

Polozkova Anastasia Petrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Student of the department «Heat Power Engineering», OSTU.

Phone: +7 (983) 660-07-63.

E-mail: nastypolozkova6@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Finichenko A.Y., Polozkova A.P. Combined method of application of solar collector and heat pump under low temperature conditions. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 1 (49), pp. 103-110.

К. С. Петров, В. В. Петров

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ АСТИГМАТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ ИХ НАД ДАТЧИКОМ

Аннотация. В статье описаны три варианта математической модели функции чувствительности магнитоиндукционного датчика для оценки влияния различных параметров датчика в электромеханической системе «колесо – рельс – магнитоиндукционный датчик» для диагностирования технического состояния поверхности катания колес подвижного состава в процессе его движения над датчиком. Описан пример алгоритма для идентификации дефектов, находящихся на поверхности круга катания колеса. Предлагаемая многовекторная математическая модель позволяет имитировать различные дефекты на поверхности катания колеса, разрабатывать и тестировать новые алгоритмы обработки выходного сигнала датчика на основе современных аппаратных и программных средств. Реализованный алгоритм идентификации дефекта основан на свойстве центрально симметричной формы функции чувствительности магнитоиндукционного датчика и выделения полезного сигнала, соответствующего определенному типу дефекта, на основе применения взаимной корреляционной функции и оценки ее максимального и минимального значений по сравнению с заданными порогами и доверительными интервалами. Основное требование для реализации модели – это равномерное движение состава над датчиком по прямолинейному участку рельсового пути. В данной статье рассматривается только один из возможных алгоритмов цифровой обработки сигналов, но предлагаемая модель позволяет сравнивать эффективность и других возможных алгоритмов идентификации дефектов поверхности катания колесных пар. Разработанная модель подтверждает перспективность применения магнитоиндукционных датчиков для идентификации не только видимых, но и скрытых дефектов на поверхности катания колеса в процессе движения железнодорожного состава.

Ключевые слова: математическая модель, электромеханическая система, моделирование, подвижной состав, колесо, дефектоскопия, автоматизация, магнитоиндукционный датчик, вектор.

Konstantin S. Petrov, Vladimir V. Petrov

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

MATHEMATICAL MODEL OF THE SENSITIVITY FUNCTION OF A MAGNETOINDUCTION SENSOR BASED ON THE ASTIGMATIC APPROACH TO IDENTIFY DEFECTS IN THE ROLLING SURFACE OF WHEELSETS IN THE PROCESS OF MOVING THEM ABOVE THE SENSOR

Abstract. The article describes three variants of the mathematical model of the sensitivity function of the magnetoinduction sensor for assessing the influence of various sensor parameters in the electromechanical system «wheel – rail – magnetoinduction sensor» for diagnosing the technical condition of the rolling surface of the rolling wheels of rolling stock in the process of its movement over the sensor. An example of an algorithm for identifying defects located on the surface of the wheel rolling circle is described. The proposed multi-vector mathematical model allows simulating various defects on the rolling surface of the wheel, developing and testing new algorithms for processing the output signal of the sensor on the basis of modern hardware and software. The implemented defect identification algorithm is based on the property of the centrally symmetric form of the sensitivity function of the magnetoinduction sensor and the allocation of a useful signal corresponding to a certain type of defect, based on the application of a mutual correlation function and the assessment of its maximum and minimum values in comparison with the specified thresholds and confidence intervals. The main requirement for the implementation of the model is the uniform movement of the train above the sensor along a straight section of the rail track. This article discusses only one of the possible digital signal processing algorithms, but the proposed model allows us to compare the efficiency of other possible algorithms identification of defects in the rolling surface of wheelsets. The developed model confirms the prospects of using magnetic induction sensors for identification of not only visible, but also hidden defects on the rolling surface of the wheel in the process of movement of the train.

Keywords: mathematical model, electromechanical system, modeling, movable composition, wheel, flaw detection, automation, magnetic induction sensor, vector.

Идентификация дефектов поверхности круга катания колес подвижного состава является одним из важных этапов технологического процесса для обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте. Поэтому применению автоматического контроля технического состояния тележек подвижного состава, особенно в процессе движения поезда, уделяется в настоящее время большое внимание [1]. Активное внедрение современных цифровых технологий для использования во всех технологических процессах на железнодорожном транспорте позволяют применять искусственный интеллект и ресурсы Big Data для решения таких важных задач. Многолетний опыт эксплуатации магнитоиндукционных датчиков на железнодорожном транспорте показал высокую надежность работы таких устройств в условиях влияния неблагоприятных климатических факторов и вибрационных воздействий [2]. Кроме того, несомненное преимущество применения магнитного поля для дефектоскопии поверхности катания заключается в возможности обнаружения внутренних скрытых дефектов колеса (например, трещин) в процессе движения состава вдоль датчика.

Системы контроля состояния профиля колесных пар, которые реализованы на основе применения оптических или лазерных технологий [3], по надежности и большим материальным затратам уступают устройствам, использующим магнитоиндукционные датчики. С энергетической точки зрения магнитоиндукционные датчики являются источниками электрической энергии, которую можно использовать и для питания микропроцессорного контроллера, выполняющего оцифровку и передачу всей информации от датчика в центр обработки данных. Таким образом, имеется возможность обеспечить энергетическую независимость системы. На основе информации от датчика принимается решение о наличии возможных дефектов каждой колесной пары или тележки подвижного состава для последующего инструментального контроля на ближайшем пункте технического обслуживания [4].

Основная задача данной работы состоит в разработке математической модели электромеханической системы «колесо – рельс – магнитоиндукционный датчик» (ЭМС «КРМД») для оценки эффективности разрабатываемых алгоритмов идентификации дефектов поверхности катания колесных пар в процессе движения их над магнитоиндукционным датчиком с учетом параметров объектов, входящих в состав модели.

Математическая модель электромеханической системы «КРМД» может быть реализована с различными параметрами и функционалом в зависимости от поставленной задачи и требований, предъявляемых к результатам моделирования. В зависимости от соотношения параметров объектов, входящих в состав ЭМС «КРМД», можно рассмотреть три варианта модели такой системы с учетом следующих условий:

$$R_k > L_m ; \quad (1)$$

$$R_k \approx L_m ; \quad (2)$$

$$R_k < L_m , \quad (3)$$

где R_k – радиус колеса; L_m – длина (протяженность вдоль рельса) магнитного сердечника датчика.

Простейшей моделью физического тела, с которой начинается построение любой математической модели, является материальная точка, имеющая заданные свойства. В работе [5] реализована точечная (стигматическая) модель ЭМС «КРМД», в которой реализовано условие (1). Упрощенная схема реализации точечной модели изображена на рисунке 1.

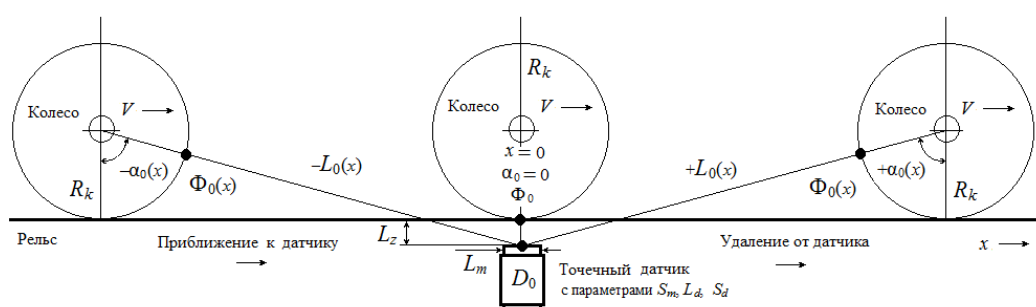


Рисунок 1 – Схема движения колеса относительно магнитоиндукционного точечного путевого датчика

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: x – координата перемещения колеса вдоль рельса над датчиком; D_0 – точечный магнитоиндукционный датчик; V – равномерная скорость движения колеса по прямолинейному рельсовому пути; L_z – минимальный воздушный зазор между гребнем колеса и датчиком D_0 ; S_m – площадь магнитного сердечника датчика; S_d – площадь магнитного потока рассеивания; L_d – длина магнитного потока рассеивания; $-L_0(x)$ – расстояние между ближайшей точкой колеса и центральной точкой поверхности сердечника магнитоиндукционного датчика D_0 в процессе приближения колеса к датчику; $+L_0(x)$ – аналогичное предыдущему расстояние в процессе удаления от датчика; $\Phi_0(x)$ – магнитный поток между ближайшей точкой колеса и серединой магнитного сердечника датчика; $-\alpha_0(x)$ и $+\alpha_0(x)$ – углы между векторами магнитной индукции и нормалью к поверхности сердечника датчика для вычисления эффективной площади магнитного потока.

Все составляющие элементы в этой модели представлены в виде материальных точек, имеющих определенные параметры, расстояние между которыми изменяется в процессе движения колеса над датчиком, в частности, изменяется угол

$$\alpha_0(x) = \tan^{-1} \left(\frac{x}{R_k + L_z} \right). \quad (4)$$

Кроме того, изменяются величина воздушного зазора, интенсивность магнитного потока и направление вектора магнитной индукции к поверхности датчика, что в свою очередь создает ЭДС индукции на клеммах катушки. Зависимость величины магнитного потока от координаты x можно найти в рамках предложенной точечной модели по выражению

$$\Phi_0(x) = K_\Phi \left(\frac{S_m \cos^2(\alpha_0(x))}{R_k + L_z - R_k \cos(\alpha_0(x))} - \frac{S_d}{L_d} \right). \quad (5)$$

Учитывая векторное свойство магнитной индукции, выражение (5) для величины магнитного потока можно представить в более общем и наглядном виде:

$$\Phi_0(x) = K_\Phi \Phi_0 \cos(\alpha_0(x)), \quad (6)$$

где K_Φ – коэффициент пропорциональности, который зависит от параметров датчика и применяемой системы измерений; $\Phi_0(x)$ – скалярная величина магнитного потока между ближайшей точкой колеса и поверхностью сердечника датчика в процессе перемещения колеса над датчиком. Функция чувствительности магнитоиндукционного датчика к перемещению колеса над датчиком вдоль координаты x (т. е. к изменению магнитного потока в ЭМС)

$$S_0(x) = K_e \frac{d\Phi_0(x)}{dx}. \quad (7)$$

Эта функция с точностью до постоянного множителя ($x = V \cdot t$) совпадает с ЭДС на выходе датчика. Магнитный поток и функция чувствительности точечной математической модели, реализующей условие (1), имеют вид, изображенный на рисунке 2.

Выражение (7) описывает функцию чувствительности датчика к перемещению колеса по рельсовому пути при постоянной скорости движения и заданных параметрах ЭМС «КРМД», в котором K_e – коэффициент пропорциональности, определяемый установленными конструктивными параметрами датчика, скоростью движения колеса, числом витков обмотки, коэффициентом рассеивания магнитного поля и системой измерений величин, входящих в это выражение.

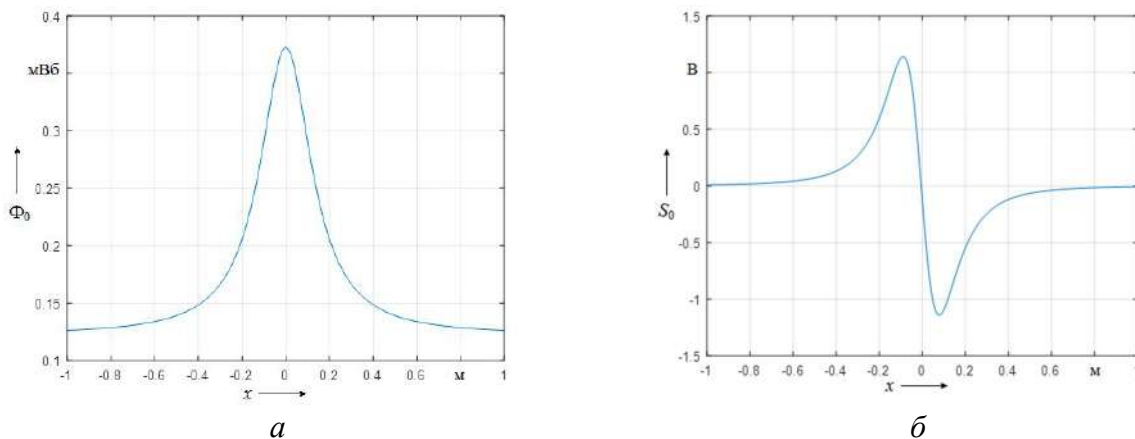


Рисунок 2 – Зависимость параметров точечной модели от смещения колеса относительно датчика:
 a – модель магнитного потока $\Phi_0(x)$ в системе «КРМД»; b – модель функции чувствительности $S_0(x)$ датчика

Изменение параметров точечного датчика и ЭМС «КРМД» влияет только на амплитуду ЭДС (мощность выходного импульсного сигнала) и не влияет на его форму, причем длительность сигнала определяется только скоростью движения колесной пары по рельсовому пути, которая в предлагаемой модели принимается постоянной. Поэтому точечную (стигматическую) модель можно применять для оценки помехоустойчивости формируемого бинарного сигнала, фиксирующего момент прохождения колесной пары над датчиком и вычисления мощности импульсного выходного сигнала ЭМС «КРМД» [6]. Следует учитывать, что в точечной модели ЭМС «КРМД» функция чувствительности и форма выходного сигнала отличаются от формы сигнала на выходе реального магнитоиндукционного датчика, например, ПБМ-56 [7].

Увеличение длины сердечника магнитоиндукционного датчика, соответствующего условию (2), позволяет увеличить мощность выходного сигнала и помехоустойчивость системы, но это приводит к существенному изменению функции чувствительности и формы выходного сигнала. Поэтому для оценки влияния параметров объектов, входящих в состав ЭМС «КРМД», на форму выходного сигнала необходимо использовать уже многоточечную (астигматическую) модель такой системы. Магнитный сердечник датчика, длина которого соизмерима с радиусом колеса в модели (2), представляется в виде последовательности дискретных точечных виртуальных датчиков [8]. Похожий подход используется в физической модели «абсолютно твердое тело», в которой тело любой формы можно представить в виде совокупности материальных точек, жестко связанных между собой. В описываемой модели ЭМС каждый из виртуальных датчиков имеет собственный элементарный магнитный поток, который иногда называют элементарными магнитными трубками. Схема, поясняющая принцип реализации многоточечной (астигматической) модели, изображена на рисунке 3.

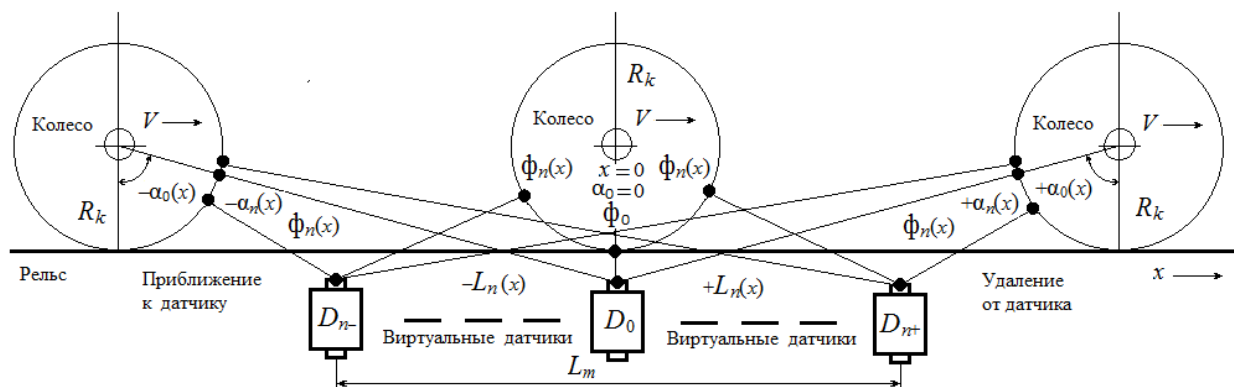


Рисунок 3 – Схема прохождения магнитных потоков многоточечной векторной модели датчика между сердечниками виртуальных датчиков и ближайшими точками к поверхности колеса

На рисунке 3 обозначено $D_{n-} \dots D_0 \dots D_{n+}$ – совокупность виртуальных датчиков, имеющих одинаковые параметры, через которые проходят элементарные магнитные потоки $\phi_n(x)$. Интенсивность этих магнитных потоков зависит от положения колеса относительно каждого точечного датчика, а общий магнитный поток (согласно принципу суперпозиции для магнитных цепей) определяется суммой $\Phi_1(x)$ всех элементарных потоков, проходящих через все виртуальные датчики, с учетом векторного характера магнитной индукции

$$\Phi_1(x, n) = K_\phi \sum_{i=-n}^n \phi_i(x + L_m \frac{i}{n}) \cos(\alpha_i(x)). \quad (8)$$

Учитывая, что данная модель реализует датчик, состоящий из $2n + 1$ виртуальных датчиков, и фактически является вектором-строкой из $2n + 1$ элементов, такую модель можно называть векторной (многоточечной – астигматической) моделью. ЭДС на выходе датчика определяется согласно закону электромагнитной индукции, которая при постоянной скорости движения колеса (7) и конкретном значении n соответствует функции чувствительности датчика, описываемой векторной моделью для реализации условия (2),

$$S_1(x) = K_e \frac{d\Phi_1(x, n)}{dx}. \quad (9)$$

Примеры элементарных магнитных потоков $\phi_n(x)$ и суммарного магнитного потока датчика приведены на рисунке 4, а. Функции чувствительности такой модели датчика (8), (9) приведены на рисунке 4, б. Причем в этой модели ЭМС «КРМД» каждый элементарный магнитный поток $\phi_i(x)$ для каждого D_i виртуального датчика вычисляется по формулам точечной модели (4) – (7). Поэтому при отсутствии дефектов на поверхности катания колеса все элементарные магнитные потоки $\phi_i(x)$, протекающие через независимые виртуальные датчики (согласно принципу суперпозиции), имеют одинаковые амплитуду и форму. Таким образом, предложенная математическая модель на основе астигматического подхода позволяет учитывать длину магнитного сердечника при моделировании формы функции чувствительности магнитоиндукционного датчика.

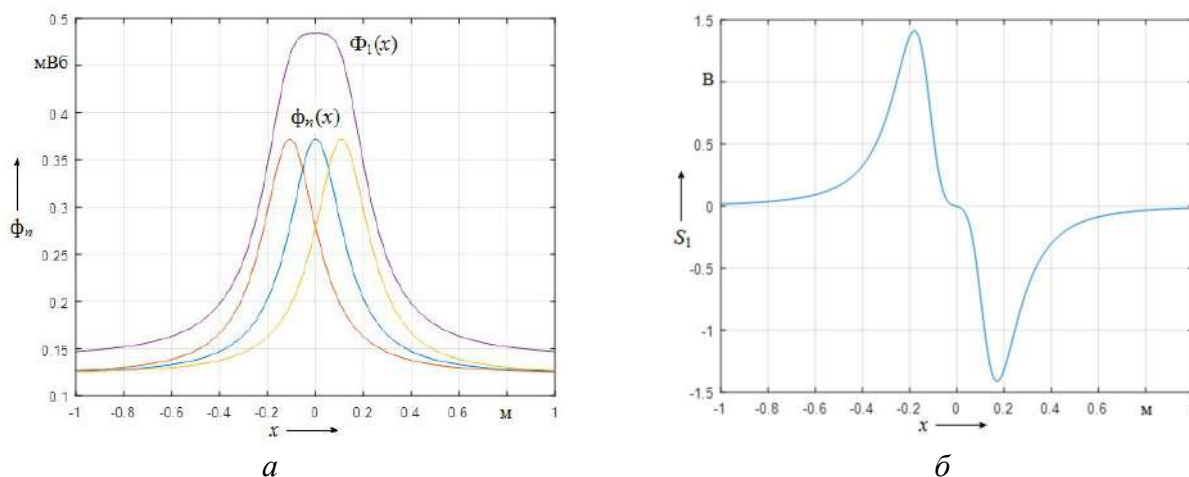


Рисунок 4 – Зависимость параметров векторной модели (2) от смещения колеса вдоль датчика (длиной 0,3 м): а – модель элементарных $\phi_n(x)$ магнитных потоков виртуальных датчиков (в начале, середине и в конце сердечника) и суммарного магнитного потока $\Phi_1(x)$; б – модель функции чувствительности датчика $S_1(x)$

Форма графика ЭДС (см. рисунок 4, б) подтверждает, что в центре магнитного сердечника чувствительность датчика снижается по сравнению с точечной моделью (1) и намного ближе к форме выходного сигнала реального магнитоиндукционного путевого датчика.

Для исследования электромеханической системы «КРМД», соответствующей условию (3), рассмотрим вариант модели на основе двух векторов, в которой рассматриваются не только

дискретная модель протяженного вдоль рельса датчика, но и дискретная точечная модель видимого сектора (дуги) колеса от каждого виртуального датчика. Таким образом, для реализации условия (3) простой векторной астигматической модели только для датчика в ЭМС «КРМД» уже недостаточно. Поэтому необходимо разработать матричную модель, включающую в себя дополнительный вектор для дискретного моделирования точек на поверхности круга катания колеса, так как при реализации условия (3) магнитные потоки от поверхности катания колеса локализируются в области видимости сектора вблизи колеса для каждого виртуального датчика. К удаленным виртуальным датчикам элементарные магнитные потоки от гребня колеса практически не доходят, что учитывается в матричной многоточечной астигматической модели, в которой есть дополнительный вектор. При отсутствии дефектов на поверхности катания колеса в модели (3) реализован подход, используемый в области физики твердого тела для моделирования взаимодействия двух абсолютно твердых тел, размерами и формой которых нельзя пренебречь, с целью достижения достаточной адекватности модели. Схема реализации модели (3) представлена на рисунке 5, где каждый дискретный элементарный поток $\Phi_{nm}(x)$ в видимом секторе колеса доходит до каждого соответствующего точечного виртуального датчика от D_{n-} до D_{n+} .

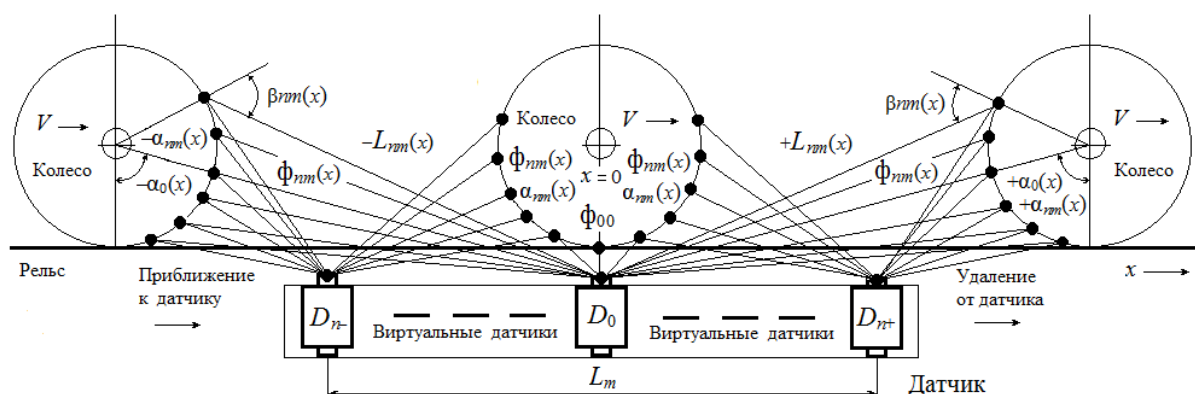


Рисунок 5 – Схема прохождения магнитных потоков в матричной модели ЭМС «КРМД», реализующей условие (3)

Общий магнитный поток $\Phi_2(x)$ вычисляется как сумма всех элементарных потоков с учетом углов $\alpha_{nm}(x)$ каждого элементарного потока к нормальям поверхностей виртуальных датчиков и углов $\beta_{nm}(x)$ к нормальям касательных к поверхности в каждой дискретной видимой точке колеса:

$$\Phi_2(x, n, m) = K_\Phi \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m \Phi_{ij}(x) \cos(\alpha_i(x)) \cos(\beta_j(x)). \quad (10)$$

Модель функции чувствительности датчика, реализующая условие (3), вычисляется аналогично выражениям (7) и (8) при конкретных значениях n и m :

$$S_2(x) = K_e \frac{d\Phi_2(x, n, m)}{dx}. \quad (11)$$

Результат моделирования прореженных для наглядности магнитных потоков и функции чувствительности ЭМС «КРМД», реализующей условие (3), изображен на рисунке 6.

Анализируя графики результатов моделирования (см. рисунок 6), реализующих условие (3), можно сделать следующие предварительные выводы: чувствительность к перемещению колеса на краях датчика существенно выше, чем в центре его магнитного сердечника ($x = 0$), т. е. сохраняется, как и у модели (2), но зона низкой чувствительности к перемещению колеса значительно расширяется; функция чувствительности датчика $S_2(x)$ к перемещению колеса, следовательно, и его выходной сигнал сохраняют центрально симметричный вид относительно центра датчика D_0 .

Эти важные свойства магнитоиндукционного датчика, имеющего протяженный магнитный сердечник, можно использовать для моделирования и идентификации дефектов на поверхности катания колесной пары, при этом прежняя матричная модель взаимодействия двух абсолютно твердых тел уже не подходит, так как при наличии дефекта положение точек на поверхности колеса может отклоняться от нормального состояния. Поэтому требуется введение дополнительных векторов, описывающих различные типы дефектов $S_{\text{одф}}(x)$ поверхности круга катания. В этом случае необходимо реализовать более сложную матричную модель, похожую на взаимодействие различных слоев (жидкости) в разделе физики «текущих сред», так как дефекты колеса возникают из-за определенной степени пластичности металла [9].

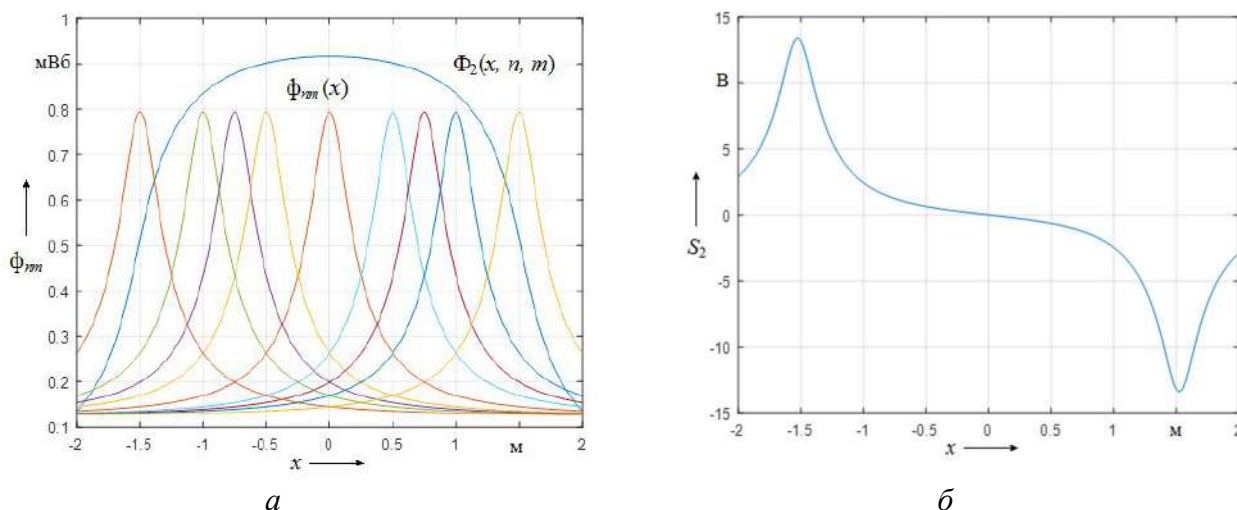


Рисунок 6 – Зависимость параметров матричной модели, реализующей условие (3), от смещения колеса вдоль датчика, длина которого от $-1,5$ м до $1,5$ м: *а* – модель магнитных потоков $\Phi_{nm}(x)$ независимых виртуальных датчиков и суммарного магнитного потока $\Phi_2(x, n, m)$; *б* – модель функции чувствительности датчика $S_2(x)$, имеющего общую длину магнитного сердечника 3 м, к перемещению колеса вдоль датчика

На основе математической модели (10), (11), содержащей большое число элементарных потоков $\Phi_{nm}(x)$ между дискретными точками на поверхности круга катания колеса и дискретными виртуальными датчиками, имеется возможность не только имитации различных дефектов поверхности круга катания колеса, но и тестирования алгоритмов идентификации этих дефектов путем анализа формы сигнала на выходе датчика. Например, на рисунке 7 представлены зависимости прореженных для наглядности магнитных потоков и функция чувствительности датчика от относительного положения датчика и колеса, имеющего дефект типа «навар» высотой 3 мм на расстоянии $-0,75$ м от середины сердечника датчика D_0 ($x = 0$).

Так как амплитуда функции чувствительности $S_2(x)$ на краях датчика значительно больше, чем изменения амплитуды, возникающие из-за наличия дефекта, то главная задача алгоритма идентификации дефекта – это выделение слабого сигнала, описывающего дефект, на фоне мощного сигнала, возникающего на краях датчика в процессе движения массивного колеса.

Анализируя полученный в результате моделирования график (рисунок 7, б), легко заметить, что функция чувствительности $S_2(x)$ (соответственно и ЭДС на выходе датчика) сохраняет свое важное свойство центральной симметрии относительно точки $x = 0$ (центра D_0), однако наличие дефекта вносит элемент несимметрии в этот вектор. Учитывая, что дефекты на поверхности катания колеса имеют случайный характер и очень маловероятно симметричное расположение различных типов дефектов (например, навар и ползун) относительно точки $x = 0$ в процессе движения колеса, имеется возможность существенно повысить чувствительность алгоритма идентификации наличия дефектов на поверхности катания колеса благодаря применению цифровой ретроспективной обработки данных.

Главная задача цифровых алгоритмов идентификации дефекта на поверхности круга катания колеса заключается в формировании такой функции чувствительности датчика, которая

чувствует только дефекты поверхности катания и не реагирует на приближение и удаление массивного колеса относительно датчика. Для решения такой задачи можно использовать описанные выше свойства центральной симметрии функции чувствительности и соответствующего сигнала на выходе датчика. Алгоритм ретроспективной идентификации дефектов для обработки сигнала магнитоиндукционного датчика реализуется в два этапа.

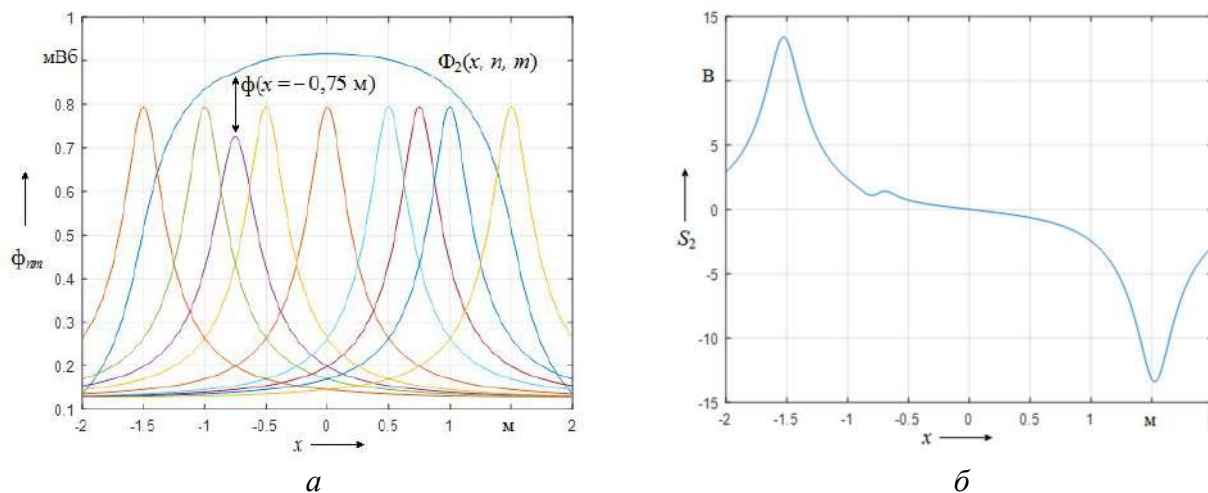


Рисунок 7 – Зависимость параметров в модели, реализующей условие (3), от смещения колеса вдоль датчика при наличии дефекта типа «навар» на поверхности катания на расстоянии $-0,75$ м от точки ($x = 0$):
 а – модель магнитных потоков $\Phi_{mi}(x)$ виртуальных датчиков, на один из которых воздействует дефект $\Phi(x = -0,75$ м), и суммарного магнитного потока $\Phi_2(x, n, m)$; б – модель функции чувствительности датчика $S_2(x)$, имеющего длину магнитного сердечника 3 м, при наличии дефекта на поверхности катания колеса

Первый этап идентификации дефекта заключается в суммировании вектора, описывающего дискретный сигнал на выходе датчика $S_2(x)$, и его «обратной версии», созданной путем обратной нумерации элементов (зеркального отображения) этого вектора $S_{2обр}(x)$:

$$S_{2\text{сум}}(x) = S_2(x) + S_{2\text{обр}}(x). \quad (12)$$

Операция (12) поясняется графически на рисунке 8 для сравнения вектора сигнала на выходе датчика без дефекта и вектора такого же сигнала при наличии дефекта типа «навар».

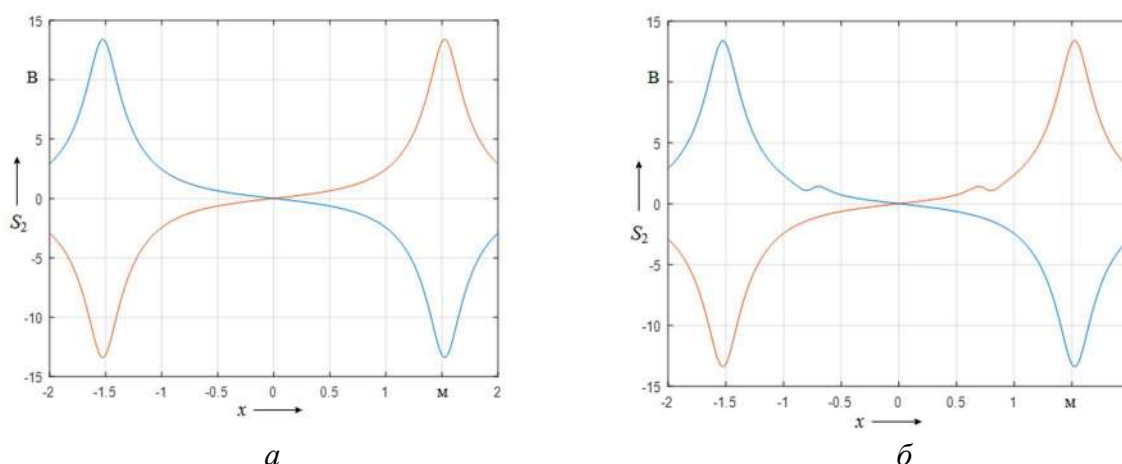


Рисунок 8 – ЭДС с прямой и обратной последовательностью элементов вектора от смещения колеса вдоль датчика: а – без дефекта; б – при наличии на поверхности катания колеса дефекта типа «навар»

Благодаря операции суммирования вектора оцифрованного сигнала с его «обратной версией» (12) подавляются основные импульсные составляющие (практически детерминированные) центрально-симметричной формы выходного сигнала на краях датчика и остается только

симметрично раздвоенный сигнал, соответствующий дефекту, на фоне неизбежного случайного шума (помех) (рисунок 9). При этом следует учитывать, что при сложении двух случайных сигналов их дисперсии тоже складываются [10].

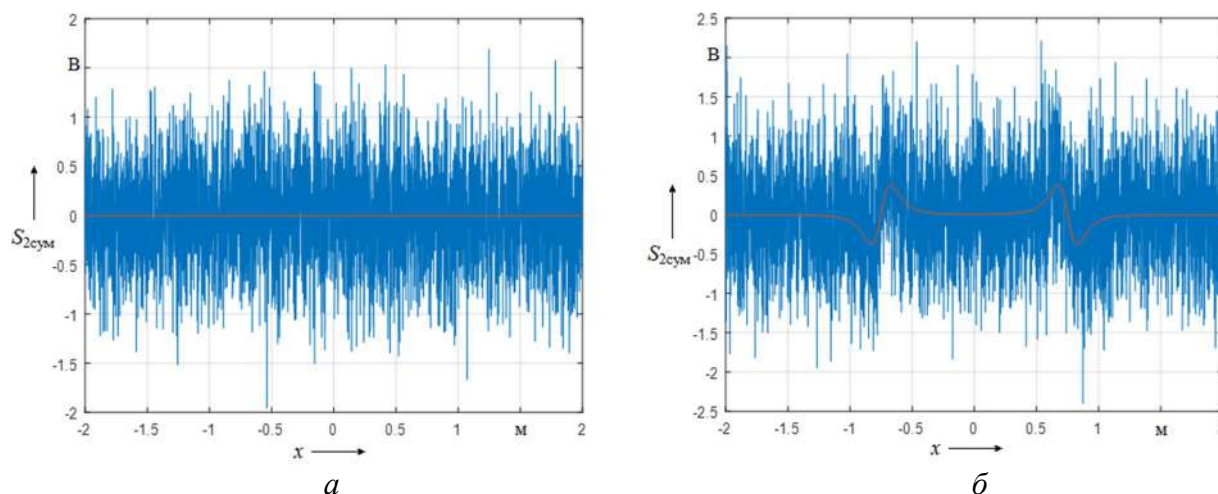


Рисунок 9 – Сумма векторов ЭДС с прямой и «обратной» версией последовательности элементов вектора от смещения колеса относительно датчика: *а* – без дефекта; *б* – при наличии дефекта на поверхности катания

На втором этапе идентификации дефекта осуществляется выделение области измененной формы сигнала, вызванного наличием дефекта, из зашумленного случайной помехой выходного сигнала датчика. Для этого можно воспользоваться обычным алгоритмом [11] вычисления взаимной корреляционной функции (ВКФ) вектора $S_{2\text{сум}}(x)$ и вектора $S_{\text{одф}}(x)$, описывающего образ дефекта, которые в дискретном представлении обозначены как $S_{2\text{сум}}(k)$ и $S_{\text{одф}}(k + n_x)$ – смещение образа дефекта на n_x элементов вектора (по оси x) при вычислении взаимной корреляционной функции:

$$r(n_x) = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K S_{2\text{сум}}(k) S_{\text{одф}}(k + n_x). \quad (13)$$

Векторы образов различных типов дефектов $S_{\text{одф}}(x)$ (в дискретном виде это $S_{\text{одф}}(k + n_x)$) формируются заранее на основе предлагаемой модели (3) в процессе дополнительных исследований и сохраняются в соответствующей базе данных. Варианты результатов вычисления ВКФ (13) векторов $S_{2\text{сум}}(x)$ и $S_{\text{одф}}(x)$ на фоне случайных помех при отсутствии и наличии дефекта поверхности круга катания колеса изображены на рисунке 10, где x – смещение колеса в диапазоне от -2 м до 2 м вдоль рельсового пути над датчиком, длина которого 3 м.

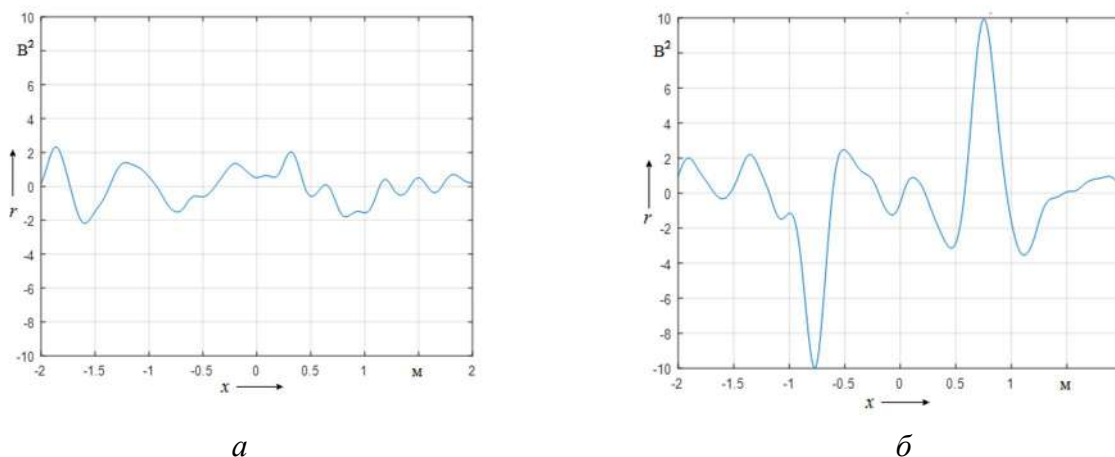


Рисунок 10 – Взаимные корреляционные функции вектора $S_{2\text{сум}}(x)$ и вектора, описывающего образ дефекта $S_{\text{одф}}(x)$, от смещения колеса вдоль рельсового пути над датчиком: *а* – без дефекта на поверхности катания колеса; *б* – при наличии дефекта на поверхности катания колеса на расстоянии $0,75$ м от середины датчика ($x = 0$)

Если амплитудные значения взаимной корреляционной функции (13) превышают заданные уровни пороговых значений (см. рисунок 10), пороги можно установить ± 5 по оси ординат и доверительный интервал 20 %), то однозначно можно сделать вывод о наличии дефекта поверхности катания колеса на расстоянии 0,75 м от середины датчика.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

1. В основе реализованной дискретной модели лежит условие линейности параметров магнитной цепи и независимости элементарных магнитных потоков, проходящих через все точечные виртуальные датчики, что позволяет применять принцип суперпозиции для вычисления суммарного магнитного потока датчика.

2. Математическая модель магнитоиндукционного датчика, длина магнитного сердечника которого превышает длину окружности поверхности катания колеса, на основе предложенного астигматического многовекторного подхода позволяет оценить свойства функции чувствительности датчика с заданными параметрами.

3. Описываемая модель магнитоиндукционного датчика позволяет исследовать возможности предложенного цифрового алгоритма для применения датчиков с различной длиной сердечника в системах идентификации дефектов на поверхности катания колес.

4. Предложенная математическая модель подтверждает перспективность применения магнитоиндукционных датчиков с большой длиной магнитного сердечника для автоматизации процесса диагностирования технического состояния поверхности круга катания колес подвижного состава железнодорожного транспорта бесконтактным способом.

Список литературы

1. Совершенствование технологии ремонта и технического обслуживания вагонов : межвуз. тем. сб. науч. тр. / под ред. В. В. Лукина. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – 71 с. – Текст : непосредственный.

2. ЩигOLEV, С. А. Путьевые датчики для устройств железнодорожной автоматики / С. А. ЩигOLEV, А. В. Кондакова, Д. Е. Соболев. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 11. – С. 1–3.

3. Опыт разработки и эксплуатации лазерных автоматизированных диагностических комплексов для бесконтактного контроля параметров колес грузовых вагонов / А. Н. Байбаков, К. И. Кучинский, В. И. Патерикин [и др.]. – Текст : непосредственный // Измерительная техника. – 2010. – № 4. – С. 61–64.

4. Патент № 192 859, Российская Федерация, МПК В61К 9/12 (2006.01). Устройство контроля технического состояния тележек подвижного состава : № 2019118942 : заявлено 17.06.2019 : опубликовано 03.10.2019 / Кондратенко Е. В., Петров В. В., Петров К. С. – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.

5. Петров, К. С. Математическая модель выходного сигнала магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе стигматического подхода / К. С. Петров, А. С. Окишев, В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 131–140.

6. Петров, К. С. Энергонезависимая информационная система для контроля технического состояния тележек подвижного состава железнодорожного транспорта / К. С. Петров, Е. В. Кондратенко, В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 257–263.

7. Педали и датчики // scbist.com : сайт. – Текст : электронный. – URL : http://scbist.com/spravochnik/1/pedali_datchiki1.htm (дата обращения: 05.12.2021).

8. Петров, К. С. Астигматическая модель сигнала магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе дискретного подхода / К. С. Петров, В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 125–135.
9. ГОСТ 10791–11. Колеса цельнокатаные. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 32 с. – Текст : непосредственный.
10. Куликов, Е. И. Методы измерения случайных процессов / Е. И. Куликов. – Москва : Радио и связь, 1986. – 272 с. – Текст : непосредственный.
11. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1973. – 831 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Lukin V.V. ed. *Sovershenstvovaniye tekhnologii remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya vagonov* [Improving the technology of repair and maintenance of cars]. Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2009, 71 p. (In Russian).
2. Shchigolev S.A., Kondakova A.V, Sobol' D.Ye. Track sensors for railway automation devices. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, Communication, Informatics*, 2013, no. 11, pp. 1-3 (In Russian).
3. Baybakov A.N., Kuchinskiy K.I., Paterikin V.I., Plotnikov S.V., Sotnikov V.V. Experience in the development and operation of laser automated diagnostic systems for contactless control of parameters of freight car wheels. *Izmeritel'naya tekhnika – Measuring equipment*, 2010, no. 4, pp. 61-64 (In Russian).
4. Kondratenko Ye.V., Petrov V.V., Petrov K.S. *Patent RU 192 859 U1*, 03.10.2019.
5. Petrov K.S., Okishev A.S., Petrov V.V. Mathematical model of the output signal of the magnetic induction sensor for rolling stock axes of railway transport based on the stigmatic approach. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 131-140 (In Russian).
6. Petrov K.S., Kondratenko Ye.V., Petrov V.V. Non-volatile information system for monitoring the technical condition of mobile carts the composition of railway transport. *Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy XIV nauchnoy konferentsii posvyashchennoy dnyu Rossiyskoy nauki* (Innovative projects and technologies in education, industry and transport: materials of the XIV scientific conference dedicated to the day of Russian science). Omsk, 2020, pp. 257-263 (In Russian).
7. *Pedali i datchiki* (Pedals and sensors). Available at: http://scbist.com/spravochnik/1/pedali_datchiki1.htm (accessed 05.12.2021).
8. Petrov K.S., Petrov V.V. Astigmatic model of magnetoinduction signal of rolling stock axis of railway transport based on discrete approach. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 125-135 (In Russian).
9. *Kolesa tsel'nokatanyye GOST 10791–11* (Wheels are solid-rolled, National Standard 10791–11), Moscow: Standardinform, 2021, 32 p (In Russian).
10. Kulikov Ye.I. *Metody izmereniya sluchaynykh protsessov* (Measurement methods of random processes). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1986, 272 p. (In Russian).
11. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematical Handbook for Scientists and Engineers). Moscow: Nauka Publ., 1973, 831 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Константин Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студент ОмГУПСа.

Тел.: +7 (3812) 31-04-09.

E-mail: iatit@omgups.ru

Петров Владимир Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Петров, К. С. Математическая модель функции чувствительности магнитоиндукционного датчика на основе астигматического подхода для идентификации дефектов поверхности катания колесных пар в процессе движения их над датчиком / К. С. Петров, В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 111 – 122.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Konstantin Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

The student of OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-04-09.

E-mail: iatit@omgups.ru

Petrov Vladimir Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Chief scientific worker, associate professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petrov K. S., Petrov V. V. Mathematical model of the sensitivity function of a magnetoinduction sensor based on the astigmatic approach to identify defects in the rolling surface of wheelsets in the process of moving them above the sensor. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 1 (49), pp. 111-122 (In Russian).

УДК 629.423

А. Н. Савоськин¹, К. И. Юренко², П. А. Харченко³, И. К. Юренко⁴

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

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ),
г. Новочеркасск, Российская Федерация;

³ОАО «Российские железные дороги», Дирекция тяги, г. Екатеринбург, Российская Федерация;

⁴ООО «НТЦ «КиберИнтеллС», г. Новочеркасск, Российская Федерация

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДА

Аннотация. Проблема оптимизации режимов ведения поезда долгое время продолжает оставаться актуальной, несмотря на большое число научных исследований и разработок в данной предметной области. Это связано как с общей сложностью реализации технологического процесса ведения поезда, так и с параметрической неопределенностью и значительными вариациями параметров самого объекта управления и внешней среды. Известные методы вычисления энергооптимальных режимов ведения поезда (вариационное исчисление, принцип максимума, динамическое программирование) и системы автоведения, построенные на их основе, предполагают некоторые упрощения исходной задачи и, как следствие, на практике реализуют квазиоптимальное управление. В связи с этим разработка методов поиска глобального экстремума функционала, определенного на множестве допустимых траекторий движения поезда как динамической системы, является как теоретически, так и практически значимой задачей. Целью работы является создание вычислительно-эффективного метаэвристического алгоритма поиска энергооптимального управления как глобального экстремума целевой функции, значения которой вычисляются с помощью эталонной модели объекта управления. Авторами разработан проблемно-ориентированный эволюционный алгоритм вычисления оптимального управления движением поезда на основе теории случайного поиска. Его особенностями являются предложенные специализированные операторы

локального случайного поиска, учитывающие специфику объекта управления как многорежимной системы; комбинированные процедуры локальной и глобальной оптимизации на основе концепции многоостровного популяционного алгоритма с суперпопуляцией, а также метод отбора (селекции) перспективных вариантов на основе алгоритма кластеризации. Вычислительные эксперименты показали хорошую сходимость алгоритма и повторяемость результатов вычислений. На основе полученных решений может быть реализован регулятор времени хода поезда, реализующий асимптотически-оптимальное управление.

Ключевые слова: оптимизации режимов ведения поезда, оптимальное управление, случайный поиск, глобальный экстремум, проблемно-ориентированный эволюционный алгоритм.

Anatoly N. Savos'kin¹, Konstantin I. Yurenko², Pavel A. Kharchenko³, Ivan K. Yurenko⁴

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

²Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, the Russian Federation;

³Join stock company «Russian Railways», Traction Directorate, Yekaterinburg, the Russian Federation;

⁴LLC «Scientific and Technical Center "CYBERINTELLS"», Novocherkassk, the Russian Federation

A PROBLEM-ORIENTED EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR OPTIMIZING TRAIN CONTROL MODES

Abstract. The problem of optimizing train driving modes continues to be relevant for a long time, despite a large number of scientific research and development in this subject area. This is due both to the general complexity of the implementation of the technological process of running the train, and to parametric uncertainty and significant variations in the parameters of the control object itself and the external environment. Well-known methods for calculating energy-optimal train driving modes (calculus of variations, the maximum principle, dynamic programming) and auto-driving systems based on them assume some simplifications of the original problem, and, as a result, implement quasi-optimal control in practice. In this regard, the development of methods for searching for the global extremum of a functional defined on the set of permissible trajectories of a train as a dynamic system is both theoretically and practically a significant task. The aim of the work is to create a computationally efficient metaheuristic algorithm for searching for energy-optimal control as a global extremum of the objective function, the values of which are calculated using a reference model of the control object. The authors have developed a problem-oriented evolutionary algorithm for calculating the optimal control of train movement based on the theory of random search. Its features are the proposed specialized operators of local random search, taking into account the specifics of the control object as a multi-mode system; combined procedures of local and global optimization based on the concept of a multi-island population algorithm with superpopulation, as well as a method of selection (selection) of promising options based on the clustering algorithm. Computational experiments have shown good convergence of the algorithm and repeatability of the calculation results. Based on the solutions obtained, a train running time controller can be implemented that implements asymptotically optimal control.

Keywords: optimization of train driving modes, optimal control, random search, global extremum, problem-oriented evolutionary algorithm.

Проблема безопасного и оптимального (энергорационального) ведения поездов многие годы находится в центре внимания эксплуатационных служб ОАО «РЖД», ученых и специалистов отраслевых вузов, предприятий и научно-исследовательских организаций. Это связано с тем, что расход электроэнергии и топливных ресурсов на тягу поездов составляет значительную долю общих эксплуатационных затрат на железнодорожном транспорте и его снижение способно дать заметный экономический эффект. Сложность рассматриваемой проблемы связана с априорной неопределенностью поездной обстановки и условий движения, наличием случайных возмущений, а также вариациями параметров внешней среды и характеристик объекта управления. За последние годы в этом направлении достигнуты определенные успехи [1 – 3]. Вместе с тем, как показывает опыт эксплуатации пассажирского и грузового подвижного состава, указанная проблема окончательно не решена и существуют значительные резервы снижения расхода энергоресурсов.

В общем случае задача энергорационального ведения поезда может быть сформулирована следующим образом. Из всех допустимых режимов ведения поезда при движении из начального пункта следования (с определенной начальной скоростью) в конечный пункт с заданной скоростью в конце пути необходимо выбрать такую последовательность их переключения и параметры, которые обеспечивают выполнение графика движения согласно расписанию и ми-

нимум расхода электроэнергии на тягу. При этом под допустимыми понимаются режимы движения, удовлетворяющие правилам технической эксплуатации железных дорог и подвижного состава, включая требования безопасности (в частности, ограничения скорости, конструкционные ограничения и т. д.).

Математическая формализация постановки задачи оптимального управления движением поезда может быть представлена в следующем виде. Движение объекта управления – поезда – описывается дифференциальными уравнениями в общем виде:

$$v = \frac{ds}{dt}; \quad \frac{dv}{dt} = \xi f(v, s, u_1, u_2, u_3, \dots), \quad (1)$$

где v – скорость; s – координата пути; t – время; $\xi = k/(1 + \gamma)$, здесь k – коэффициент, учитывающий размерность, а γ – коэффициент инерции вращающихся частей; f – удельная равнодействующая всех сил, действующих на поезд, $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ – управляющие переменные тяги, электрического (рекуперативного или реостатного) и механического (пневматического и электропневматического) торможения.

Требуется найти такое управление $\mathbf{u}$, при котором на множестве траекторий движения $\mathbf{x}(t, \mathbf{u})$, где $\mathbf{x}$ – вектор состояния ОУ, $\mathbf{x} = (s, v, \dots)$, обеспечивается минимум функционала качества управления $J(\mathbf{u}) = A_T(\mathbf{u}) - A_P(\mathbf{u})$, где A_T – расход энергии на тягу, A_P – возврат энергии в сеть в режиме рекуперации с обязательным выполнением графика движения (заданного времени хода) и терминальных условий: $t \in [0, T_x]$; $s(t_0) = 0$; $s(T_x) = s_k$; $v(t_0) = v_0$; $v(T_x) = v_k$; $J^*(\mathbf{u}^*) = \underset{\mathbf{u} \in U; \mathbf{x} \in X}{\operatorname{argmin}} J(\mathbf{u})$, где U и X – области допустимых управлений и значений

фазовых координат соответственно.

Будем учитывать распределенную массу поезда (перемещение отдельных частей поезда по различным элементам профиля пути), меняющееся напряжение в контактной сети и добавочное сопротивление движению, а в качестве независимой переменной выберем координату пути. Тогда уравнения движения поезда могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dt}{ds} &= \frac{1}{v}; \\ \frac{dv}{ds} &= \frac{(1 + \gamma)}{kv} \left[\frac{F_\Sigma(\boldsymbol{\mu}(\mathbf{u}), U_{\text{КС}}) - W_{\text{осн}}(v) - W_{\text{доб}}(\theta, W_{\text{доб}}(v)) - W_i(s, l_{\text{п}})}{\sum_{j=1}^p m_{\text{л}}^j + \sum_{j=1}^q m_{\text{в}}^j} \right]; \\ F_\Sigma(\boldsymbol{\mu}(\mathbf{u}), U_{\text{КС}})|_{\boldsymbol{\mu}=(\mu_1, \mu_2, \mu_3)} &= F(\mu_1, U_{\text{КС}}) + R(\mu_2, U_{\text{КС}}) + B(\mu_3)|_{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \equiv 0}; \\ \mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3); \quad \boldsymbol{\mu}(\mathbf{u}) &= (\mu_1(u_1), \mu_2(u_2), \mu_3(u_3)); \\ W_{\text{осн}}(v) &= \sum_j^{p+q} W_0^j(v) = \begin{cases} (a_0 + a_1 v + a_2 v^2) m_{\text{л}}^j g, & j = 1..p; \\ (a_3 + (a_4 + a_5 v + a_6 v^2)/m_{\text{осб}}^j) m_{\text{в}}^j g, & j = 1 + p..q; \end{cases} \quad (2) \\ W_{\text{доб}}(\theta, W_\Sigma(v)) &= W_{\text{осн}}(v) \cdot f_{\text{доб}}(\theta(v)); \\ W_i(s, l_{\text{п}}) &= \frac{l_{\text{п}} - s_0(s)}{l_{\text{п}}} i_1(s) + \frac{1}{l_{\text{п}}} \sum_{j=2}^{p+q-1} s_j(s) i_j(s) + \frac{1}{l_{\text{п}}} \left(s_0(s) - \sum_{j=2}^{p+q-1} s_j(s) \right) i_j(s), \end{aligned}$$

где F_Σ – суммарная управляемая сила, реализуемая тяговой и тормозной системами поезда; $\boldsymbol{\mu}$ – управляющие воздействия на исполнительные устройства (приводы), реализуемые регуляторами скорости и тормозной силы, в частности, μ_1 – на тяговую систему; μ_2 и μ_3 – на системы электродинамического (рекуперативного) и механического торможения соответственно; $U_{\text{КС}}$ – напряжение в контактной сети (КС); F , R , B – силы тяги, рекуперативного и механического торможения; $W_{\text{осн}}$, $W_{\text{доб}}$, W_i – силы основного, добавочного, а также дополнительного сопротивления от уклонов и кривых пути; $m_{\text{л}}^j$, $m_{\text{в}}^j$, $m_{\text{осб}}^j$ – массы j -х локомотива, вагона и массы j -го вагона в расчете на одну ось; p и q – число локомотивов

и вагонов в составе; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – числовые коэффициенты; g – ускорение свободного падения; θ и $f_{\text{доб}}$ – вектор-функция параметров и функция для расчета коэффициента добавочного сопротивления движению; $l_{\text{п}}$ – длина поезда; s_0 – расстояние от принятой за начало отсчета точки сопряжения 1-го и 2-го элементов профиля до «головы» поезда; i_k – уклон k -го элемента профиля, на котором находится часть поезда ($j=1, 2, \dots$); s_k – длина k -го элемента профиля пути.

Терминальные условия задачи:

$$\begin{cases} s \in [s_0, s_k]; \\ v(s_0) = v_0; \\ v(s_k) = v_k; \\ t(s_0) = 0; \\ t(s_k) = T_x, \end{cases} \quad (3)$$

где s_0 и s_k – начальная и конечная координаты пути, а s является непрерывной монотонно возрастающей переменной величиной; v_0 и v_k – скорость в начале и конце пути; T_x – заданное время хода по перегону согласно расписанию, являющееся изопериметрическим условием рассматриваемой вариационной задачи

$$T_x(s) = \int_{s_0}^{s_k} \frac{ds}{v(s)}, \quad (4)$$

а ограничения на фазовые координаты зададим в виде:

$$\begin{cases} \frac{dt}{ds}(\mu(u)) \geq \frac{1}{v_{\text{огр}}(s)}; \\ \frac{d^2t}{ds^2}(\mu(u)) \geq \frac{1}{a_{\text{max}}}; \\ \frac{d^3t}{ds^3}(\mu(u)) \geq \frac{1}{\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{max}}}, \end{cases} \quad (4)$$

здесь $v_{\text{огр}}$ – значения ограничений скорости; a_{max} и $\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{max}}$ – максимально допустимые значения ускорения и его производной, характеризующей плавность хода в переходных режимах движения.

Примем за **функционал качества управления** суммарный расход электроэнергии на тягу с учетом возврата в сеть при рекуперации (энергетический критерий), который запишем в виде:

$$\begin{cases} J(\mu(u)) = A_{\Sigma} = A_1(\mu_1(u_1)) + A_2(\mu_2(u_2)); \\ A_1(\mu_1(u_1)) = \int_{s_0}^{s_k} \frac{F(\mu_1(u_1))}{\eta_{\text{т}}(\mu_1(u_1))} ds; \\ A_2(\mu_2(u_2)) = \int_{s_0}^{s_k} R(\mu_2(u_2)) \eta_{\text{р}}(\mu_1(u_1)) ds, \end{cases} \quad (6)$$

где A_1 и A_2 – соответственно расход энергии на тягу и возврат при рекуперации; $\eta_{\text{т}}$ и $\eta_{\text{р}}$ – КПД тяговой системы электровоза в режиме тяги и рекуперации: $\eta_{\text{т}}(\eta_{\text{р}}) = \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{т. п}} \eta_{\text{рд}}$. Здесь $\eta_{\text{дв}}$, $\eta_{\text{т. п}}$, $\eta_{\text{рд}}$ – КПД тягового двигателя, тягового преобразователя и редуктора (механической передачи) в режиме тяги и рекуперативного торможения соответственно. Важным уточнением рассматриваемой задачи является определение ограничений на управление, а также учет баланса мощностей, поскольку значения управляемых сил определяются исходя из характеристик конкретного типа подвижного состава и условий эксплуатации.

Так, для электроподвижного состава однофазно-постоянного тока:

$$\left\{ \begin{array}{l} F(u_1) \leq F_{\max} = \min \left[\max_{\beta \in N_{\text{оп}}} [F_{\text{тяг}}(v, U_{\text{КС}}, \beta)], F_{\text{сц}}(v, m) \right]; \\ R(u_2) \leq R_{\max} = \min [R_{\text{рек}}(v), F_{\text{сц}}(v, m)]; \\ B(u_3) \leq B_{\max} = \min [B_{\text{пт}}(P_{\text{тц}})], F_{\text{сц}}(v, m); \\ P = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{КС}}(t) I(t, \mu(u)) dt = \begin{cases} \frac{1}{T_{\text{тяг}}} \int_0^{T_{\text{тяг}}} F(t, \mu_1(u_1)) v(t) dt; \\ \frac{1}{T_{\text{рек}}} \int_0^{T_{\text{рек}}} R(t, \mu_2(u_2)) v(t) dt; \end{cases} \\ P_a = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{КС}}(t) I_{\text{да}}(t, \mu(u)) K_U dt = \begin{cases} \frac{1}{T_{\text{тяг}}} \int_0^{T_{\text{тяг}}} \frac{F(t, \mu_1(u_1)) v(t)}{\eta_{\text{т}}} dt; \\ \frac{1}{T_{\text{рек}}} \int_0^{T_{\text{рек}}} R(t, \mu_2(u_2)) v(t) \eta_{\text{р}} dt, \end{cases} \end{array} \right. \quad (7)$$

где β – степень ослабления поля; $N_{\text{оп}}$ – число ступеней ослабления поля; $F_{\text{сц}}$ – сила сцепления; P и P_a – полная и активная мощность локомотива соответственно; $T_{\text{тяг}}$ и $T_{\text{рек}}$ – время движения в режимах тяги и рекуперации; I и $I_{\text{да}}$ – полный ток и его активная составляющая; K_U – коэффициент формы кривой напряжения на данном $U_{\text{КС}}$. В уравнении (7) учитываются сила сцепления и коэффициент формы кривой напряжения.

Соотношения (2) – (7) определяют модель объекта и уточненную постановку задачи его оптимального управления для электроподвижного состава однофазно-постоянного тока.

Классические аналитические и численно-аналитические методы решения рассматриваемой задачи, основанные на необходимых условиях оптимальности в форме **принципа максимума**, предполагают некоторые упрощения модели объекта управления [1, 2, 5]. Это позволяет определять квазиоптимальное управление и реализовать регулятор времени хода на борту локомотива на основе прежудающего тягового расчета.

Другой подход связан с использованием метода **динамического программирования** [1, 4]. Численная реализация дискретного варианта последнего связана с определенными трудностями, среди которых подбор неопределенных множителей Лагранжа целевой функции качества управления, учитывающей как расход энергии, так и время хода; применение дополнительных эвристик для исключения «звонковых» режимов и движения по пилообразной траектории, состоящей из участков «разгон – торможение»; высокая чувствительность к отклонениям параметров объекта управления и внешней среды от номинальных значений, приводящая к снижению качества управления; большая вычислительная сложность.

Возможности современной вычислительной техники и развитие оптимизационного подхода в теории управления, методов синтеза интеллектуальных систем и технологий имитационного моделирования [6 – 11] позволяют перейти к решению задачи асимптотически оптимального управления на основе методов поиска глобального экстремума функционала, определенного на множестве допустимых траекторий движения поезда.

Целью исследований является создание вычислительно-эффективного алгоритма поиска энергооптимального управления как глобального экстремума целевой функции, значения которой вычисляются с помощью эталонной модели объекта управления. На основе полученных решений может быть реализован регулятор времени хода поезда, реализующий асимптоти-

чески-оптимальное управление в условиях параметрической неопределенности и вариации параметров внешней среды и объекта управления.

Авторами предлагается преобразование исходной задачи оптимального управления движением поезда к задаче структурно-параметрического синтеза на основе множества базисных решений. Последняя рассматривается как задача нелинейного программирования и решается с использованием идей метаэвристической поисковой оптимизации [12].

Будем рассматривать управление как функцию, параметризованную по координате пути, т. е. $\mathbf{u} = |\hat{\mathbf{u}}_i(s_i)|_{i=1}^N$, где N – конечное число точек переключения управления; s_i – их координаты; $\hat{\mathbf{u}}_i$ – управление, задаваемое в точке s_i .

Построение управления в такой форме является более удобным, чем параметризация по времени, поскольку ограничения по скорости и профиль пути задаются как кусочно-непрерывные функции координаты s , а цель управления заключается в перемещении оптимальным образом поезда из начальной координаты s_0 в конечную s_k , при этом каждому j -му варианту управления $\hat{\mathbf{u}}^{(j)}(s_i^{(j)})$ соответствует траектория движения, которая может быть определена

как семейство кривых, в частности, как вектор-функция

$$\begin{cases} v = v(s, \hat{\mathbf{u}}); \\ t = t(s, \hat{\mathbf{u}}); \\ J = J(s, \hat{\mathbf{u}}). \end{cases}$$

Тогда для j -го варианта управления соответствующую траекторию движения можно представить как $\mathbf{x}_i^{(j)} = \mathbf{x}_{i-1}^{(j)} + \Delta \mathbf{x}(\mathbf{x}_{i-1}^{(j)}, \hat{\mathbf{u}}_{i-1}(s_{i-1}))$, причем

$$\mathbf{u}^{(j)} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{u}}_0^{(j)}(s_0) \\ \hat{\mathbf{u}}_1^{(j)}(s_1^{(j)}) \\ \hat{\mathbf{u}}_2^{(j)}(s_2^{(j)}) \\ \dots \\ \hat{\mathbf{u}}_i^{(j)}(s_i^{(j)}) \\ \dots \\ \hat{\mathbf{u}}_{N^{(j)}}^{(j)}(s_{N^{(j)}}^{(j)}) \end{pmatrix}; \mathbf{x}^{(j)} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{x}_1^{(j)}(\hat{\mathbf{u}}_0^{(j)}(s_0)) \\ \mathbf{x}_2^{(j)}(\hat{\mathbf{u}}_1^{(j)}(s_1)) \\ \dots \\ \mathbf{x}_i^{(j)}(\hat{\mathbf{u}}_{i-1}^{(j)}(s_{i-1})) \\ \dots \\ \mathbf{x}_{N^{(j)}+1}^{(j)}(\hat{\mathbf{u}}_{N^{(j)}}^{(j)}(s_{N^{(j)}}^{(j)})) \end{pmatrix} \begin{cases} i = 1: N^{(j)}; \\ j = 1: M \in \mathbb{N}; \\ \mathbf{u}^{(j)} \in \mathbf{U}; \\ \mathbf{x}^{(j)} \in \mathbf{X}; \\ \mathbf{x}_{N^{(j)}+1}^{(j)} \in \mathbf{X}_k, \end{cases} \quad (8)$$

где $N^{(j)}$ – число точек переключения режимов в j -м варианте управления; M – общее число рассматриваемых вариантов управления; $\mathbf{X}_k$ – заданное терминальное многообразие.

Разработан и исследован проблемно-ориентированный эволюционный алгоритм решения рассматриваемой задачи на основе теории случайного поиска со следующей последовательностью шагов.

1. Сформировать множество базисных решений $\mathcal{R} = \{R_i\}_{i=1}^N$, $R_i = |r|_{j=1}^{Q(i)}$, где N – число базисных решений; $Q(i)$ – число точек переключения управления $\mathbf{u}$ вдоль траектории для i -го базисного решения.

2. На множестве $\mathcal{R}$ сформировать начальную популяцию решений $P_0 = (p_0^{(1)}, p_0^{(2)}, \dots, p_0^{(K_0)})$, где K_0 – заданное число; $p = \langle \mathbf{u}, \mathbf{x}(\mathbf{u}), J(\mathbf{u}) \rangle$; начальную популяцию сделать рабочей $P_t = P_0$.

3. Установить начальную «температуру» $t = T_0$.

4. На множестве решений текущей популяции выполнить специально разработанные операторы: структурной $\mathcal{M}_{\text{ст}}$ и параметрической $\mathcal{M}_{\text{пар}}$ мутаций для получения промежуточной популяции решений: $P_2 = \mathcal{M}_{\text{ст}}(P_{11} \subset P_t) \cup \mathcal{M}_{\text{пар}}(P_{12} \subset P_t)$ и локальной оптимизации: $P_3 = \mathcal{O}_{\text{лок}}(P_2)$.

5. Поместить полученные локально-оптимальные решения в популяцию: $P_t = P_t \cup P_3$.

6. Осуществить выбор перспективных решений на основе алгоритма кластеризации: $P_4 = O_{\text{класт}}(P_3)$; уменьшить «температуру» $t = t \cdot \beta$, где $1 > \beta > 0$; обновить популяцию $P_t = P_4$.

7. Проверить достижение нижнего значения «температуры»: ЕСЛИ $t < T_k$, ТО перейти к шагу 8; ИНАЧЕ – к шагу 4.

8. Из текущего пула выбрать решение, соответствующее глобальному минимуму функционала: $J^*(u^*) = \underset{p \in P_t}{\operatorname{argmin}} J(u)$.

Среди особенностей, отличающих предложенный алгоритм от известных, можно выделить следующие:

задача оптимального управления движением поезда решается как задача структурно-параметрического синтеза на множестве базисных решений с использованием методов эволюционного случайного поиска;

в данном алгоритме, являющемся популяционным, используется понятие «температура», характерное для метода имитации отжига, который в свою очередь относится к траекторным методам;

совместное использование операторов структурной и параметрической мутации наряду с операторами локальной оптимизации и кластеризации (отбора).

Для повышения вычислительной эффективности поиска по разработанному методу реализован многоостровной вычислительный алгоритм, структура которого показана на рисунке 1. Его оригинальной особенностью является способ организации миграции особей-вариантов решений между «островами» посредством суперпопуляции, в которую отбираются лучшие варианты от каждого «острова» и подвергаются улучшающим преобразованиям с использованием операторов многоточечного и арифметического кроссовера. Повышение вычислительной эффективности при такой организации вычислений достигается за счет того, что дополнительные операторы кроссовера, повышающие эффективность поиска при большом числе повторений в окрестности локального экстремума целевой функции, применяются только к наиболее перспективным вариантам решений, делегированным в суперпопуляцию, а не ко всем имеющимся вариантам.



Рисунок 1 – Схема многоостровного вычислительного алгоритма с суперпопуляцией

Исследование алгоритма расчета энергооптимальных режимов движения поезда.

Для выполнения вычислительных экспериментов с целью исследования предложенного метода был разработан программный комплекс на языке MATLAB/Octave, реализующий приве-

денный алгоритм (шаги 1 – 8), а также эталонную модель движения поезда на основе соотношений 1 – 6, обеспечивающую вычисление функционала качества управления 8 и многокритериальный алгоритм, структурная схема которого представлена на рисунке 1.

На рисунке 2 приведен пример расчета энергооптимальных режимов движения пассажирского поезда с 15 вагонами с помощью разработанного вычислительного алгоритма для участка длиной 30 км со сложным профилем пути.

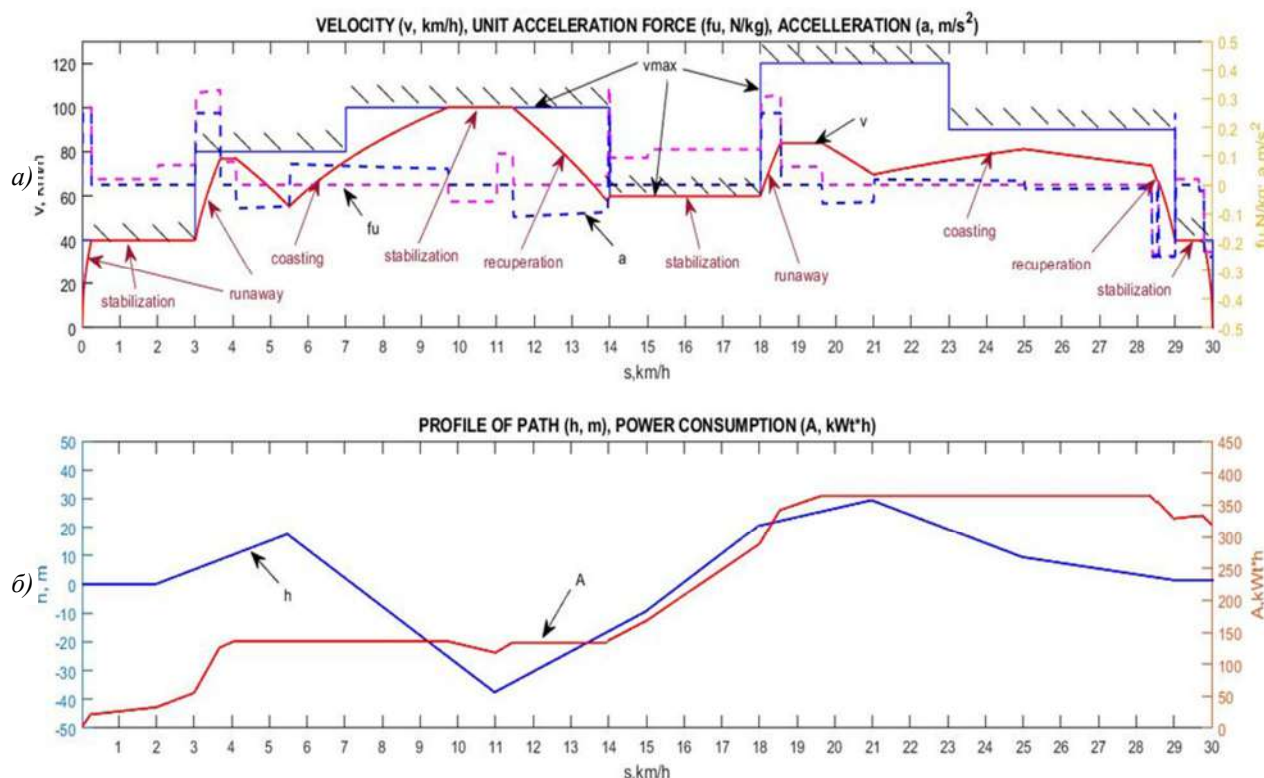


Рисунок 2 – Результаты вычислительного эксперимента: a – кривые скорости (v), ускорения (a) и удельной ускоряющей силы (f_u); b – кусочно-линейная кривая профиля пути (h) и расхода электроэнергии (A)

На рисунке 3 показаны найденное множество локальных экстремумов функционала и определенный глобальный экстремум.

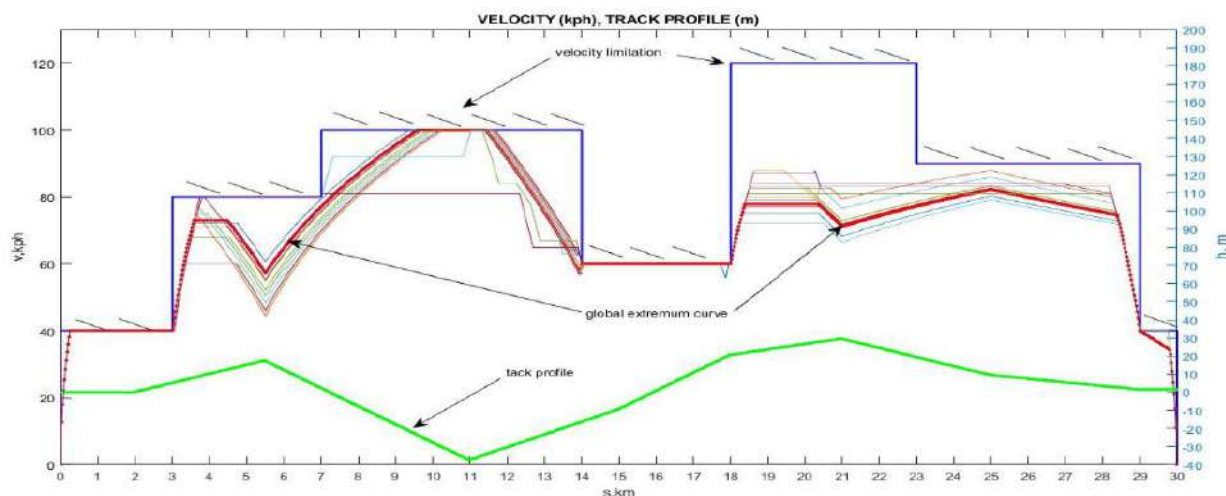


Рисунок 3 – Множество кривых, соответствующих локальным и глобальному экстремумам функционала

На рисунке 4 показано изменение значения целевой функции в зависимости от номера поколения популяции решений для четырех вычислительных экспериментов, что иллюстрирует хорошую сходимость алгоритма.

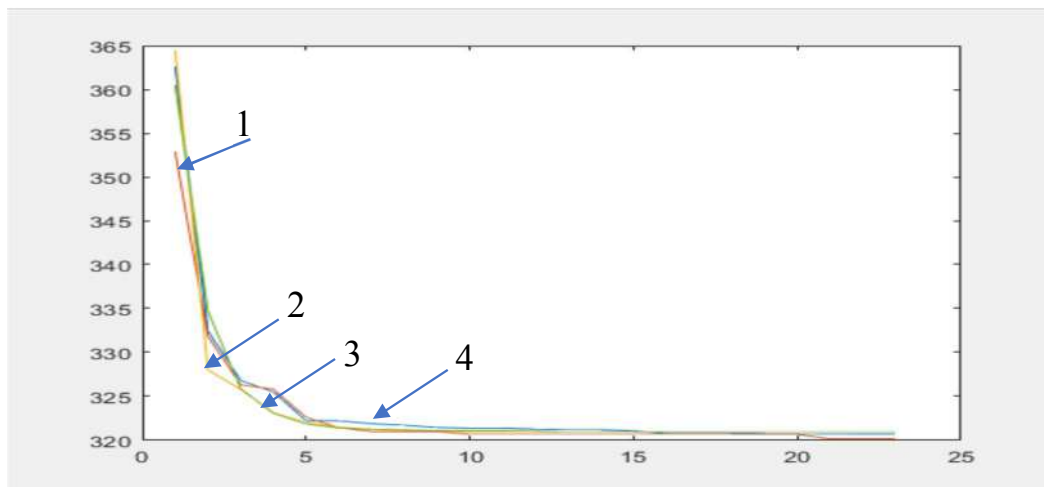


Рисунок 4 – Кривые зависимости значения целевой функции от номера поколения популяции

На основе изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Предложенный метод, предполагающий сведение исходной задачи оптимального управления движением поезда к задаче структурно-параметрического синтеза и ее решение с помощью разработанного проблемно-ориентированного эволюционного вычислительного алгоритма, дает возможность находить глобальный экстремум функционала, определенного на множестве допустимых траекторий посредством выявления множества локальных.

2. Одной из вычислительно-эффективных реализаций предложенного алгоритма является многоостровная вычислительная модель с суперпопуляцией, в которую делегируются лучшие особи-варианты решений и подвергаются дополнительным улучшающим преобразованиям с использованием операторов многоточечного и арифметического кроссовера.

3. Вычислительные эксперименты подтверждают хорошую сходимость алгоритма и повторяемость результатов, что дает возможность использовать предложенный алгоритм в практических расчетах.

4. Полученные результаты открывают дальнейшие перспективы исследований в области синтеза адаптивных регуляторов в режиме реального времени, что даст возможность, в частности, решать задачи синтеза асимптотически-оптимальных регуляторов времени хода систем автоведения поездов.

Список литературы

1. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь. – Москва : Московский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – 164 с. – Текст : непосредственный.
2. Мугинштейн, Л. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. – Текст : непосредственный // Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». – Москва : Интекст, 2012. – 80 с.
3. Завьялов, Е. Е. Автоведение – необходимый инструмент скоростного и высокоскоростного движения / Е. Е. Завьялов, Д. В. Волковский. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 2 (57). – С. 42–43.
4. Юренко, К. И. Расчет энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического программирования / К. И. Юренко. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 3. – С. 78–82.

5. Юренко, К. И. Принцип максимума Л. С. Понтрягина в задаче оптимального управления движением поезда / К. И. Юренко. – Текст : непосредственный // Вестник ВЭЛНИИ. – 2018. – № 1-2 (79). – С. 147–161.
6. Программно-аппаратный комплекс реального времени для имитационного моделирования электромагнитных процессов в электрических железных дорогах переменного тока / А. Н. Савоськин, М. В. Телегин, Д. И. Болдин, И. И. Гарбузов. – Текст : непосредственный // Университетский научный журнал. – 2013 – № 5. – С. 113–119.
7. Савоськин, А. Н. Имитационное моделирование энергетических показателей при движении электровозов переменного тока с бортовыми компенсаторами реактивной мощности по типовому участку электрической железной дороги / А. Н. Савоськин, Ю. М. Кулинич, И. И. Гарбузов. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2015 – № 9. – С. 42–49.
8. Юренко, К. И. Математическое моделирование энергооптимальных режимов ведения поезда с учетом возмущений / К. И. Юренко, А. Н. Савоськин, Е. И. Фандеев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 34–44.
9. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование : пер. с англ. / Д. Химмельблау. – Москва : Мир, 1976. – 256 с. – Текст : непосредственный.
10. Растрингин, Л. А. Случайный поиск / Л. А. Растрингин. – Москва : Знание, 1979. – 64 с. – Текст : непосредственный.
11. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – Москва : Дрофа, 2006. – 175 с. – Текст : непосредственный.
12. Пантелеев, А. В. Метаэвристические алгоритмы поиска оптимального программного управления : монография / А. В. Пантелеев, Д. В. Скавинская, Е. А. Алешина. – Москва : Инфра-М, 2018. – 396 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Baranov L. A., Erofeev E. V., Meleshin I. S., Chin L. M. *Optimizacija upravljenja dvizheniem poezdov* [Optimization of train traffic control]. Moscow, MIIT Publ, 2001, 164 p.
2. Muginstein L.A., Ilyutovich A.E., Yabko I.A. *Jenergootimal'nye metody upravljenja dvizheniem poezdov* [Energooptimal methods of train traffic control]. Moscow, Intext Publ., 2012, 80 p.
3. Zavyalov E. E., Volkovsky D. V. Autodriver – a necessary tool for high-speed and high-speed traffic. *Transport of the Russian Federation*, 2019, no. 2 (57), pp.42-43 (In Russian).
4. Yurenko K. I. Calculation of energy-optimal modes of movement of promising rolling stock by dynamic programming method. *Scientific and Technical Journal Russian Electromechanics*, 2013, no. 3, pp.78-82 (In Russian).
5. Yurenko K.I. The maximum principle of L.S. Pontryagin in the problem of optimal control of train movement. *Vestnik VELNII*, 2018, no. 1-2 (79), pp.147-161 (In Russian).
6. Savoskin, A.N., Telegin M.V., Boldin D.I., Garbuzov I.I. Real-time software and hardware complex for simulation of electromagnetic processes in electric AC railways. *University Scientific Journal*, 2013, no. 5, pp. 113-119 (In Russian).
7. Savoskin, A.N., Kulinich Yu.M., Garbuzov I.I. Simulation modeling of energy indicators during the movement of AC electric locomotives with on-board reactive power compensators along a typical section of an electric railway. *Electrical Engineering*, 2015, no. 9, pp. 42-49 (In Russian).
8. Yurenko K.I., Savoskin A.N., Fandeev E.I. Mathematical modeling of energy-optimal modes of train driving taking into account perturbations. *University News. North Caucasian Region. Technical Sciences*, 2015, no. 3, pp. 34-44 (In Russian).
9. Himmelblau D. *Prikladnoe nelinejnoe programmirovanie* [Applied nonlinear programming]. Moscow, Mir Publ., 1976, 80 p.
10. Rastrigin L.A. *Sluchajnyj poisk* [Random search]. Moscow, Knowledge Publ., 1979, 64 p.

11. Sobol I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami* [The choice of optimal parameters in problems with many criteria]. Moscow, Drofa Publ., 2006, 175 p.
12. Panteleev A.V., Skavinskaya D.V., Alyoshina E.A. *Metajevristicheskie algoritmy poiska optimal'nogo programmogo upravlenija* [Metaheuristic algorithms for optimal program control search]. Moscow, INFRA-M Publ., 2018, 396 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савоськин Анатолий Николаевич

Российский университет транспорта (МИИТ).
Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы».

Тел.: +7 (495) 684-22-15.

E-mail: elmechtrans@mail.ru

Юренко Константин Иванович

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова.

Просвещения ул., д. 132, г. Новочеркасск, 346428, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент.

Тел.: +7 (904) 445-46-78.

E-mail: ki-yurenko@yandex.ru

Харченко Павел Алексеевич

ОАО «Российские железные дороги», Дирекция тяги.

Челюскинцев ул., д. 11, Екатеринбург, 620013, Российская Федерация.

Заместитель начальника службы по управлению тяговыми ресурсами северо-западного полигона Дирекции тяги.

Тел.: +7 (904) 502-34-56.

E-mail: lrk-9@mail.ru

Юренко Иван Кондратьевич

ООО «НТЦ «КиберИнтеллС».

Гвардейская ул., д. 36, г. Новочеркасск, 346405, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заместитель директора.

Тел.: +7 (904) 347-91-92.

E-mail: ikyur@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Проблемно-ориентированный эволюционный алгоритм для оптимизации режимов ведения поезда / А. Н. Савоськин, К. И. Юренко, П. А. Харченко, И. К. Юренко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 122 – 132.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Savos'kin Anatoly Nikolaevich

Russian University of Transport (MIIT).
9, b9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

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

Phone: +7 (495) 684-22-15.

E-mail: elmechtrans@mail.ru

Yurenko Konstantin Ivanovich

South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platova.

132, Prosveshchenia st., Novocherkassk, 346428, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor.

Phone: +7 (904) 445-46-78.

E-mail: ki-yurenko@yandex.ru

Kharchenko Pavel Alekseevich

JSC «Russian Railways», Traction Directorate.

11, Chelyuskintsev st., Yekaterinburg, 620013, the Russian Federation.

Deputy Head of the Traction Resources Management Service of the North-West Range of the Traction Directorate.

Phone: +7(904)502-34-56.

E-mail: lrk-9@mail.ru

Yurenko Ivan Kondratievich

LLC «STC «Cyberintells».

36 Gvardeyskaya st., 346405, Novocherkassk, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Deputy Director.

Phone: +7 (904) 347-91-92.

E-mail: ikyur@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Savos'kin A.N., Yurenko K.I., Kharchenko P.A., Yurenko I.K. Problem-oriented evolutionary algorithm for optimizing train control modes. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 1 (49), pp. 122-132 (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 редакционного совета журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию Журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.
 2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.
 3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).
 4. Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.
 5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех соавторов статьи.
- В тексте статьи обязательно указывается тематический раздел журнала, в который подается статья и научная специальность, которой она соответствует.

Текст 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 (объем списка литературы – не менее 10 наименований), транслитерацию и перевод списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках. Текст 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.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим основные фактические сведения и выводы описываемой работы; текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен 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; аннотация должна быть дополнена аннотацией на английском языке (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированной (следовать логике описания результатов в статье), «англоязычной» (написанной качественным английским языком), необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт); текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм); размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт; размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (-); необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»); буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подписанные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт; межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см; автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить; инициалы и фамилии не должны отделяться друг от друга;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде; рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следуют списки 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 в соответствии с образцом (прилагается);

при публикации научной статьи на русском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках; публикация статей с полным текстом на иностранном языке не допускается.

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотаций и списков литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также 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 разных выпусках Журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста. Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам. Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, 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»

№ 1 (49) 2022

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 15.04.2022.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 20.04.2022.

