

**ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ В SIMPACK RAIL
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ
КОЛЕБАНИЙ ЛОКОМОТИВОВ**

**СУХОПУТНАЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНАЯ
ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА
ПРИПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЕЙ РОССИИ**

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РИДЕРОВ
И РАДИОМЕТОК В СИСТЕМЕ
ПРИВЯЗКИ К ПУТИ
ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА**

**АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ
И ПАРАМЕТРОВ ПОЛУВАГОНОВ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО
ДВИЖЕНИЯ**

**ВЛИЯНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ
НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ
ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА
И НА РАСХОД ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ**



МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Александр Галкин, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала «Транспорт Урала», Екатеринбург, Россия
2. Александер Сладковски, д-р техн. наук, профессор, Силезский технический университет, Польша
3. Эдуард Горкунов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Екатеринбург, Россия
4. Аксель Шмидер, д-р, «Сименс АГ», отраслевой сектор, департамент транспорта «Железнодорожное строительство», Эрланген, Германия
5. Эрки Хамалайнен, д-р экон. наук, университет Аалто, Школа экономики, Финляндия
6. Валерий Доманский, д-р техн. наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Булаев Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
5. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
10. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
11. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
12. Туранов Халибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
13. Умняшкин Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Ижевск
14. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
15. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Alexander Galkin, DSc, professor, editor-in-chief of the journal "Transport of the Urals", Ekaterinburg, Russia
2. Alexander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, academician of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
4. Axel Schmieder, DSc, Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, Transportation Engineering, Erlangen, Germany
5. Erkki Hamalainen, DSc, Aalto University School of Economics, Finland
6. Valeriy Domansky, DSc, professor of National technical University "Kharkiv politechnical institute", Kharkiv, Ukraine

EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Bulaev Vladimir Grigorievich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
5. Komarov Konstantin leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyaev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
9. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
10. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
11. Smolyaninov Alexander Vasiliyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
12. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
13. Umnyashkin Vladimir Alexeyevich, DSc, professor, Izhevsk
14. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
15. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

Е. В. Сердобинцев, А. Э. Тарасов.
Верификация пространственных динамических моделей рельсовых экипажей в SIMPACK Rail при исследовании горизонтальных колебаний локомотивов.....3

А. И. Давыдов, М. М. Никифоров.
Алгоритм анализа данных об использовании энергоресурсов на тягу поездов на уровне локомотивных депо при проведении энергообследования ОАО «Российские железные дороги».....10

Г. Л. Аккерман, П. И. Тарасов, С. Г. Аккерман, О. В. Голубев, И. В. Полещук.
Сухопутная мультимодальная транспортная система приполярных областей России15

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

А. М. Костроминов, Ал-р А. Костроминов, О. Н. Тюляндин.
Повышение надежности взаимодействия ридеров и радиометок в системе привязки к пути поездов метрополитена21

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

А. В. Смольянинов.
Анализ конструкций и параметров полувагонов, используемых для тяжеловесного движения26

Д. А. Банников, А. Г. Галкин, Н. Ф. Сирина.
Алгоритм расчета организации сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава.....31

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

А. Э. Александров, Е. Н. Тимухина, И. А. Ковалев.
Оптимизационная модель перевозочного процесса с использованием кольцевых маршрутов.....36

Н. Н. Романов, М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев.
Оценка пропускной способности железнодорожных направлений с использованием экспериментальной факторной математической модели40

Е. Н. Ахмаев, С. А. Бессоненко, В. В. Борисов, К. И. Корниенко.
Исследование движения отцепа в сортировочном парке.....49

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

В. Г. Булаев.
Природоохранная служба как инструмент экологической безопасности железнодорожного предприятия54

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Т. А. Лунина, С. А. Давыдов.
Алгоритм оценки ремонта и эксплуатации путевых машинных комплексов на основе мониторинга ключевых показателей эффективности.....60

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

В. Л. Незевак.
Оценка изменения объема электропотребления на тягу от графика движения поездов на участках с I типом профиля пути на основе регрессионных моделей и нейронных сетей65

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Б. А. Аржанников, И. А. Баева.
Влияние регулирования напряжения на пропускную способность электрифицированных участков постоянного тока и на расход электрической энергии на тягу поездов71

Ю. А. Кочунов, А. В. Паранин, Н. Л. Иванов, Д. В. Егоров.
Механические параметры кронштейна КПВЛТ76

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

И. В. Кондратьев, В. А. Сисин.
Исследование процессов управления торможением электроподвижного состава с дисковыми тормозами82

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

E. V. Serdobintsev, A. E. Tarasov.
Verification of spatial dynamic models of railway vehicles in SIMPACK Rail in the study of horizontal oscillations of locomotives 3

A. I. Davydov, M. M. Nikiforov.
Algorithm for the analysis of data on the use of energy resources for train traction at the level of locomotive depots during the energy survey of JSC Russian Railways..... 10

G. L. Akkerman, P. I. Tarasov, S. G. Akkerman, O. V. Golubev, I. V. Poleschuk.
The land multimodal transport system of the circumpolar regions of Russia 15

AUTOMATION, TELEMECHANICS AND COMMUNICATION

A. M. Kostrominov, Al-r A. Kostrominov, O. N. Tyulyandin.
Improving the reliability of the interaction of readers and radio tags in the system of binding to the track of metro trains..... 21

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

A. V. Smolyaninov.
Analysis of structures and parameters of open wagons used for heavy traffic 26

D. A. Bannikov, A. G. Galkin, N. F. Sirina.
Calculation algorithm of organization of service technical maintenance and repair of passenger rolling stock 31

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

A. E. Alexandrov, E. N. Timukhina, I. A. Kovalev.
Optimization model of the transportation process with the use of unit trains 36

N. N. Romanov, M. G. Yashin, R. A. Pantelev.
Assessment of capacity of the railway directions with use of experimental factorial mathematical model 40

E. N. Akhmaev, S. A. Bessonenko, V. V. Borisov, K. I. Kornienko.
Investigation of car movement in a sorting park..... 49

TECHNOSPHERIC SAFETY

V. G. Bulaev.
Environmental service as an instrument of environmental safety of the railway enterprise 54

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

T. A. Lunina, S. A. Davydov.
Algorithm for evaluation of repair and operation of track machine complexes based on monitoring of key performance indicators..... 60

ELECTRIC TRACTION

V. L. Nezevak.
Assessment of changes in the volume of electricity consumption for traction from the train schedule on sections with the first type of path profile based regression models and neural networks..... 65

ELECTRIC SUPPLY

B. A. Arzhannikov, I. A. Baeva.
The effect of voltage regulation on capacity of electrified DC sections and on the consumption of electric energy on the traction of trains 71

Yu. A. Kochunov, A. V. Paranin, N. L. Ivanov, D. V. Egorov.
Mechanical parameters of the polymer bracket KPVLT..... 76

ROLLING STOCK AND TRACTION

I. V. Kondratyev, V. A. Sisin.
The research of braking controlling processes of electric rolling stock with disc brakes 82

УДК 621.424.001

Евгений Васильевич Сердобинцев, доктор технических наук, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия,
Антон Эдуардович Тарасов, аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия

ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ В SIMPACK RAIL ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛОКОМОТИВОВ

Evgeniy Vasilievich Serdobintsev, DSc in Engineering, Professor, Electric Trains and Locomotives Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia,
Anton Eduardovich Tarasov, postgraduate student, Electric Trains and Locomotives Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia

Verification of spatial dynamic models of railway vehicles in SIMPACK Rail in the study of horizontal oscillations of locomotives

Аннотация

В статье рассмотрена возможность применения программного пакета моделирования динамических систем рельсового транспорта SIMPACK Rail, созданного в Германии в 1980-х гг. для проектирования нового подвижного состава колеи 1435 мм, к исследованию динамики моделей рельсовых экипажей колеи 1520 мм. На основе опыта каждого из авторов статьи результаты расчетов пространственной модели рельсового экипажа с характеристиками типового грузового электровоза в SIMPACK Rail (А. Э. Тарасов) сопоставлены с результатами расчетов в комплекте программ, разработанных на кафедре «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (МИИТ) (Е. В. Сердобинцев). При сравнении использован математический способ проверки, построенный на решении однородных дифференциальных уравнений для устойчивых механических систем с ненулевыми начальными условиями. Объектом системы выбрана колесная пара как наиболее сложный элемент в моделировании динамики рельсовых экипажей. Авторы также уделили внимание особенностям пространственного моделирования движения колесных пар в SIMPACK Rail.

Правильность математического описания реальных объектов моделирования до сих пор остается актуальной задачей, поэтому в статье демонстрируются возможности одного из инструментов, широко применяемых в ФРГ и других странах Западной Европы для моделирования динамических систем с большим количеством тел. Статья предназначена для научно-технических работников, изучающих вопросы динамики, конструкторов, перед которыми стоят проблемы динамических расчетов, а также широкого круга специалистов, связанных в своей деятельности с механической частью подвижного состава.

Ключевые слова: динамика, колесная пара, математическое моделирование, верификация.

Summary

The article considers the possibility of using the software package for modeling the dynamic systems of rail transport SIMPACK Rail, created in Germany in the 1980s for the design of a new rolling stock on 1435 mm railways, to study the dynamics of models of railway vehicles on 1520 mm. Based on the experience of each of the authors of the article, the results of calculations of the spatial model of the railway vehicle with the characteristics of a typical cargo electric locomotive in SIMPACK Rail (A. E. Tarasov) are compared with the results of calculations in the set of programs developed at the Electric Trains and locomotives Department of the Russian University of Transport (RUT-MIIT) (E. V. Serdobintsev). The mathematical method of verification, constructed on the solution of homogeneous differential equations for stable mechanical systems with nonzero initial conditions, is used in comparison. The object of the system was chosen wheelset as the most complex element in modeling the dynamics of railway vehicles. The authors also paid attention to the features of the spatial simulation of the movement of wheelsets in SIMPACK Rail.

The correctness of the mathematical description of real simulation objects is still an urgent task, therefore the article demonstrates the possibilities of one of the tools widely used in the GFR and other countries of Western Europe to model dynamic systems with a large number of bodies. The article is intended for scientific and technical specialists studying the problems of dynamics, designers, which face the problems of dynamic calculations, as well as a wide range of specialists related to the mechanical part of the rolling stock in their activities.

Keywords: dynamics, wheelset, mathematical modeling, verification.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-3-9

В настоящее время при проектировании рельсовых экипажей с целью исследования их динамических качеств и выбора параметров все чаще используются программные пакеты динамического моделирования систем, состоящих из многих тел (Multi Body Simulation Systems — MBS Systems), имеющие специальные модули-надстройки для систем рельсового транспорта: UM loco, Adams/Rail, SIMPACK Rail и др.

К достоинствам таких пакетов относятся возможность точного построения динамических моделей локомотивов в пространственных координатах по их кинематическим схемам и высокая степень параметризации моделей, что обеспечивает двустороннюю взаимосвязь конструирования и расчетов. Кроме того, они позволяют учитывать большое количество дополнительных факторов, необходимых для решения реальных задач (нелинейные характеристики упругих и дис-

сипативных элементов, детальное описание процессов взаимодействия колеса и рельса).

Однако реализованные в этих программных пакетах алгоритмы расчетов не выводятся для проверки исследователем, уравнения движения составляются в закрытом (фоновом) режиме при запуске модуля интегратора (решателя). Поэтому в данном случае проверка правильности расчетной модели становится первоочередной задачей, хотя и представляет определенные трудности. Цель настоящей статьи — обобщение опыта отладки, а также сравнение результатов, полученных при верификации построенной в SIMPACK Rail пространственной модели рельсового экипажа с осевой формулой 2o-2o (фрагмент модели представлен на рис. 1), с результатами расчетов по модели горизонтальных колебаний вагона метрополитена, имеющей близкую по параметрам кинематическую схему и схожие характеристики основных силовых элементов.

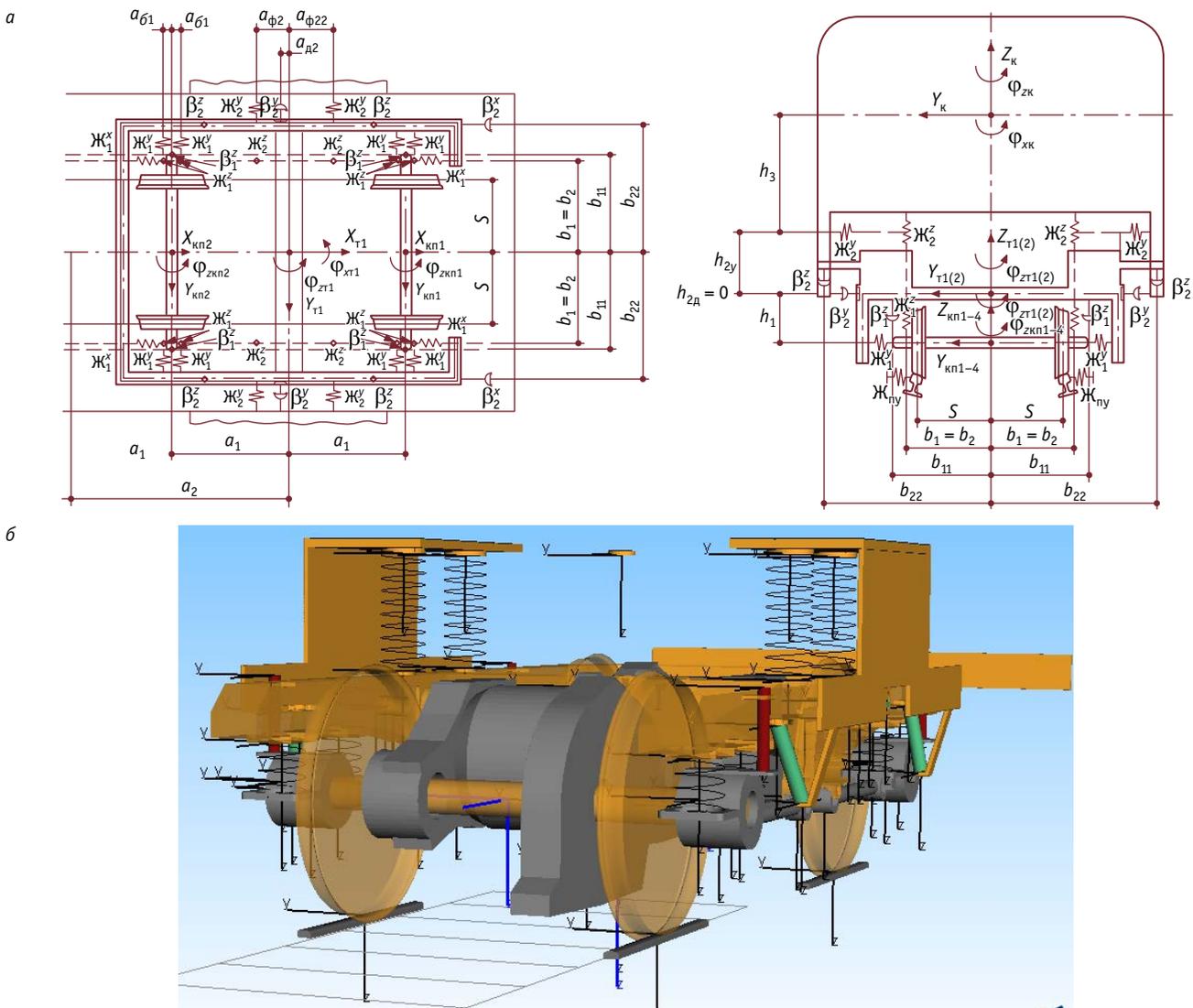


Рис. 1. Кинематическая схема тележки грузового электровоза с учетом связей с кузовом (а) и ее координатная модель в SIMPACK Rail (б)

На рис. 1а обозначено: X, Y, Z — оси обобщенных координат кузова, тележек, колесных пар; φ_x — обобщенная координата боковой качки кузова, тележек; φ_z — обобщенная координата виляния кузова, тележек, колесных пар; s — расстояние от оси пути до основного круга катания колесной пары, м; a_1 — расстояние от шкворня тележки до оси колесной пары, м; a_2 — половина межшкворневого расстояния рамы кузова, м; $a_{\phi 1}$ — расстояние от оси колесной пары до линии действия пружины буксового подвешивания в поперечном направлении, м; $a_{\phi 2}$ — расстояние от шкворня тележки до линии действия пружины кузовного подвешивания с закрытой стороны рамы тележки в поперечном направлении, м; $a_{\phi 22}$ — расстояние от шкворня тележки до линии действия пружины кузовного подвешивания с открытой стороны рамы тележки в поперечном направлении, м; $a_{д2}$ — расстояние от шкворня тележки до линии действия демпфера бокового отнosa кузовной ступени подвешивания, м; b_1 — расстояние от оси пути до линии действия пружин буксового подвешивания, м; b_2 — расстояние от оси пути до линии действия пружин центрального подвешивания, м; b_{11} — расстояние от оси пути до линии действия вертикального демпфера буксового подвешивания, м; b_{22} — расстояние от оси пути до линии действия вертикального демпфера и демпфера виляния кузовного подвешивания, м; h_1 — высота от оси колесной пары до центра тяжести рамы тележки, м; $h_{2д}$ — высота от центра тяжести тележки до линии действия демпфера бокового отнosa, м; h_{2y} — расстояние от центра тяжести рамы тележки до половины высоты пружины кузовного подвешивания, м; h_3 — расстояние от половины высоты пружины кузовного подвешивания до центра тяжести кузова, м; $J_{пу}$ — жесткость пути в поперечном направлении, Н/м; J_1^x — продольная жесткость буксовой пружины, Н/м; J_1^y — поперечная жесткость буксовой пружины, Н/м; J_1^z — вертикальная жесткость буксовой пружины, Н/м; J_2^y — поперечная жесткость кузовной пружины,

Н/м; J_2^z — вертикальная жесткость кузовной пружины, Н/м; β_1^z — коэффициент демпфирования вертикального демпфера буксовой ступени подвешивания, Н·с/м; β_2^x — коэффициент демпфирования демпфера виляния кузовной ступени подвешивания, Н·с/м; β_2^z — коэффициент демпфирования вертикального демпфера кузовной ступени подвешивания, Н·с/м; β_2^y — коэффициент демпфирования демпфера бокового отнosa кузовной ступени подвешивания, Н·с/м.

Отметим, что основные отличия отладки исследуемой модели и, как следствие, результатов расчетов связаны с высокой степенью детализации процесса взаимодействия колеса и рельса в SIMPACK Rail и подобных пакетах, а потому ниже остановимся на описании этих особенностей более подробно. Колебания адрессорного строения экипажа при рассмотрении опустим. Исходные данные экипажей приведены в табл. 1 и 2.

Поскольку основные отличия заключаются в подробном учете факторов, влияющих на движение непосредственно колесных пар, приведем прежде всего необходимые теоретические выдержки.

При движении колесной пары в режиме качения без ее проскальзывания извилистое движение возникает вследствие свойств наложенных кинематических связей, и в данном случае изменение обобщенных координат происходит по гармоническим законам [1]. Частота гармонических горизонтальных колебаний отнosa и виляния колесной пары при ее отклонении от среднего положения описывается выражением [2]

$$\omega_c = v \sqrt{i / (r \cdot s)}, \quad (1)$$

где ω_c — круговая частота колебаний, рад/с;
 v — скорость поступательного движения, м/с;
 i — уклон конической части бандажа;
 r — радиус основного круга катания колеса, м.

Таблица 1

Инерционные и геометрические характеристики экипажей

Экипаж	Параметры							Примечание	
	$v_{кр}$ км/ч	$m_{кр}$ т	$m_{тр}$ т	$m_{кп}$ т	$I_{укр}$ т·м ²	$I_{утр}$ т·м ²	База кузова, м		База тележки, м
Эталон, 2о-2о	155	38	4,3	2,7	2000	2,73	12,6	2,2	II класс тяговой передачи
SIMPACK, 2о-2о	120	51,5	7,8	2,8	1266	4,82	9,4	3,0	То же

Примечание. $v_{кр}$ — скорость локомотива; $m_{кр}$, $m_{тр}$, $m_{кп}$ — соответственно масса кузова, тележки и колесной пары; $I_{укр}$ и $I_{утр}$ — соответственно момент инерции кузова и тележки вокруг оси $у$.

Таблица 2

Упругие и диссипативные характеристики экипажей

Экипаж	Параметры (см. рис. 1а)								
	J_2^z , кН/м	J_2^y , кН/м	J_1^y , кН/м	J_1^x , кН/м	J_1^z , кН/м	β_2^z , кН·с/м	β_2^y , кН·с/м	β_1^z , кН·с/м	
Эталон, 2о-2о	747	500	5502	27510	917	33,6	27,3	29,2	
SIMPACK, 2о-2о	751	142	28000*	141166*	757	50,8**	50,8**	17,1**	

*С учетом буксовых поводков. **Линейное значение.

Неустойчивость извилистого движения рельсового экипажа связана с возможной неустойчивостью движения колесных пар. Извилистое движение одиночной колесной пары, нагруженной вертикальной силой $2P$, скорость v центра масс которой сохраняет свое значение и направлена неизменно вдоль оси пути, сопровождается деформациями в точках контакта и возникновением сил псевдоскольжения (сил крива) [3].

Предложен ряд способов описания процесса взаимодействия колеса и рельса в поперечном направлении, однако все они с теми или иными оговорками сводятся к введению в расчетную схему нелинейного очертания бандажа и нелинейной зависимости между относом и продольными и поперечными силами.

Эти характеристики описываются тремя строго нелинейными зависимостями:

1) приращение радиуса круга катания $\Delta R(y)$ как разности радиусов кругов катания левого и правого колеса в точках контакта от относа y

$$\Delta R(y) = R_{\text{right}}(y) - R_{\text{left}}(y);$$

2) среднее арифметическое угла поворота колесной пары вокруг оси x (угол боковой качки колесной пары) в функции относа вдоль оси y

$$\varphi(y) = (\varphi_{\text{right}}(y) + \varphi_{\text{left}}(y))/2;$$

3) среднее значение левого и правого углов между контактными плоскостями колеса и рельса в точке контакта (относительно оси x)

$$\delta_r(y) = (\delta_{r,\text{right}}(y) + \delta_{r,\text{left}}(y))/2.$$

На рис. 2 представлено графическое пояснение этих параметров.

В SIMPACK Rail для расчетов во временной области используется точная кубическая сплайн-интерполяция поверхности катания колеса, рабочей зоны головки рельса и получаемое приращение радиуса круга катания $\Delta R(y)$ (рис. 3).

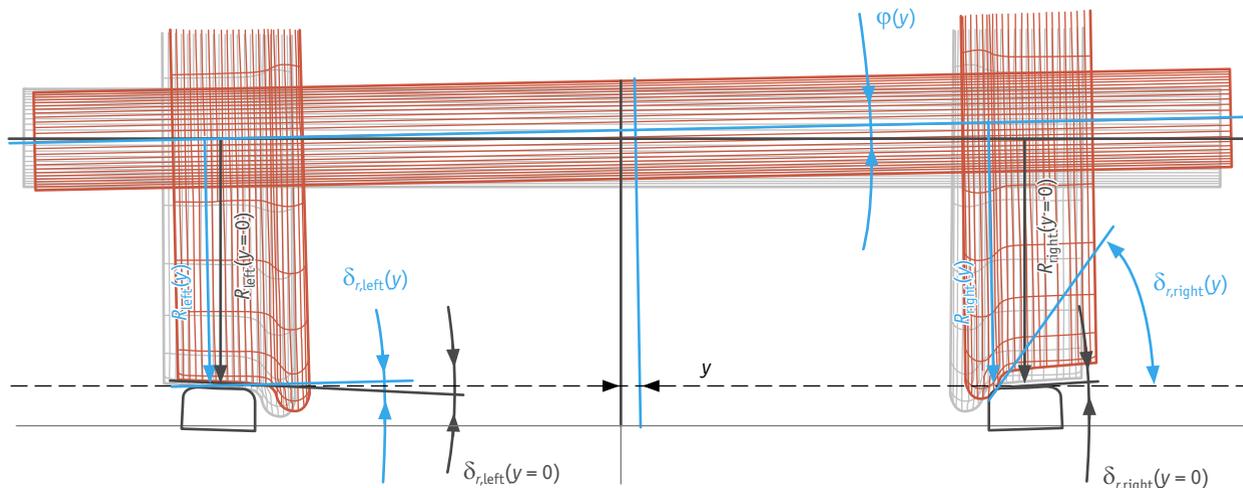


Рис. 2. Визуализация геометрических характеристик движения колесной пары

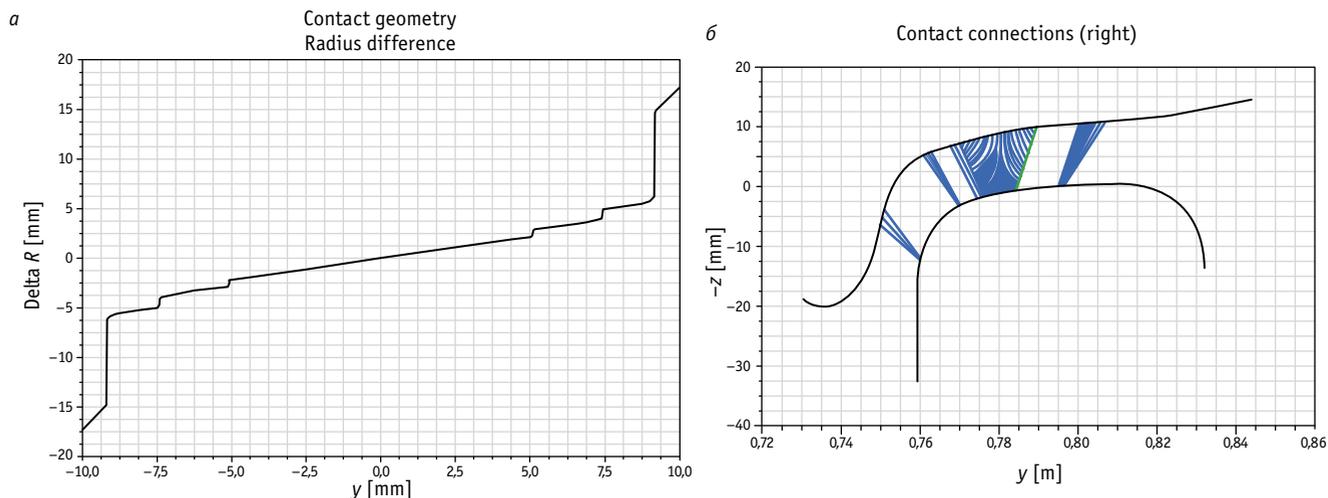


Рис. 3. Зависимость приращения радиуса круга катания колеса от амплитуды бокового относа колесной пары (а) и геометрия контакта для колеса ГОСТ 9036–88 [4] и рельса Р65 (б)

Для расчетов в частотной области производится приближенная линейаризация всех трех параметров контакта колеса и рельса. Результат расчета линейаризации для модели с использованием геометрии профиля рельса Р65, конусности $i = 1 : 20$, колеса по ГОСТ 9036–88 [4] и вертикальной нагрузки на колесную пару 250 кН показан на рис. 4. Эквивалентные зоны контакта представлены в виде кусочно-линейных участков различной конусности, а зависимости изменения углов контактных площадок — линейными функциями и ожидаемыми значениями расположения точек контакта на колесах и рельсах [5].

Расчет эталонной модели выполнен с использованием комплекта программ, разработанных на кафедре «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (МИИТ), позволяющих разделять горизонтальные, боковые и вертикальные колебания экипажей [6]. Расчет сравнительной мо-

дели сделан в программном пакете SIMPACK Rail при взаимном учете горизонтальных и вертикальных колебаний, а также учете вышеуказанных параметров, которые характеризуют нелинейное движение колесной пары. Расчеты проведены для скорости движения 100 км/ч на идеальном прямом участке пути (без возмущений), т.е. для свободных колебаний системы. Начальным условием численного интегрирования принято смещение первой колесной пары на $y_0^{кп1} = 0,005$ м.

На рис. 5 показаны первые результаты моделирования в SIMPACK Rail. Как видно из графика, представленного на рис. 5б, в начальный период интегрирования (до 0,02 с) относительное смещение колесной пары имеет ярко выраженную высокочастотную составляющую в 100 Гц (зона 1), кроме того, присутствует остаточное смещение колесной пары примерно на 0,0005 м после затухания колебаний (зона 2), что свидетельствует о выраженной асимметрии моделирования.

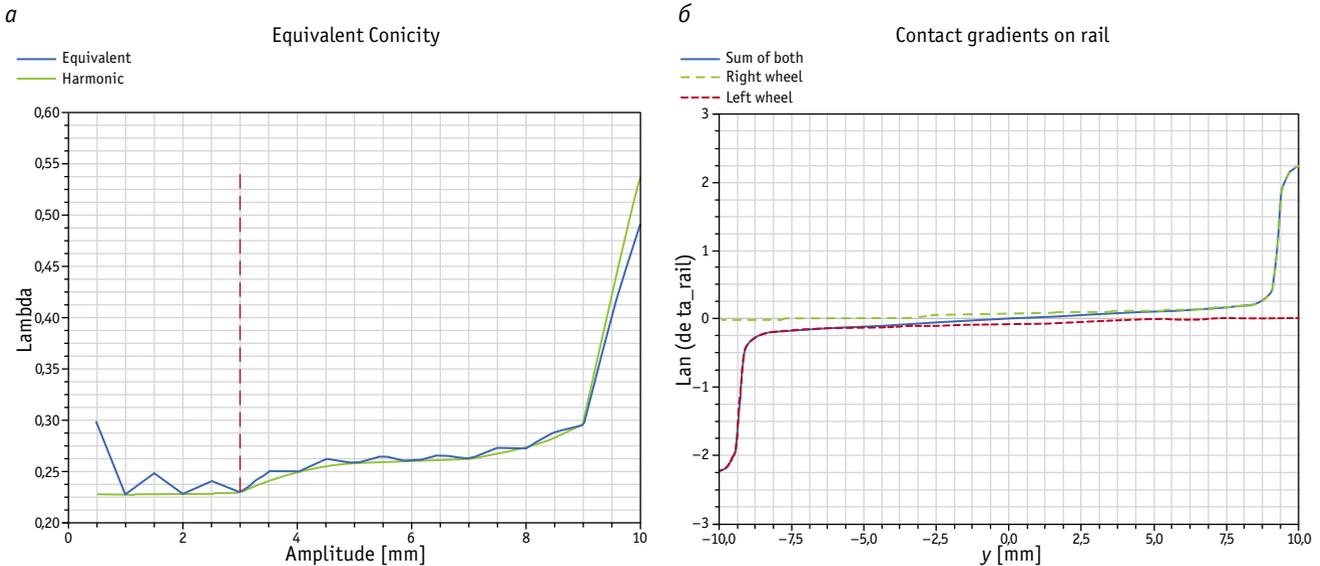


Рис. 4. Эффективная конусность контакта между колесом и рельсом в зависимости от амплитуды бокового отхода колесной пары (а) и нелинейная аппроксимация функции тангенса угла наклона контактных площадок колеса и рельса (б)

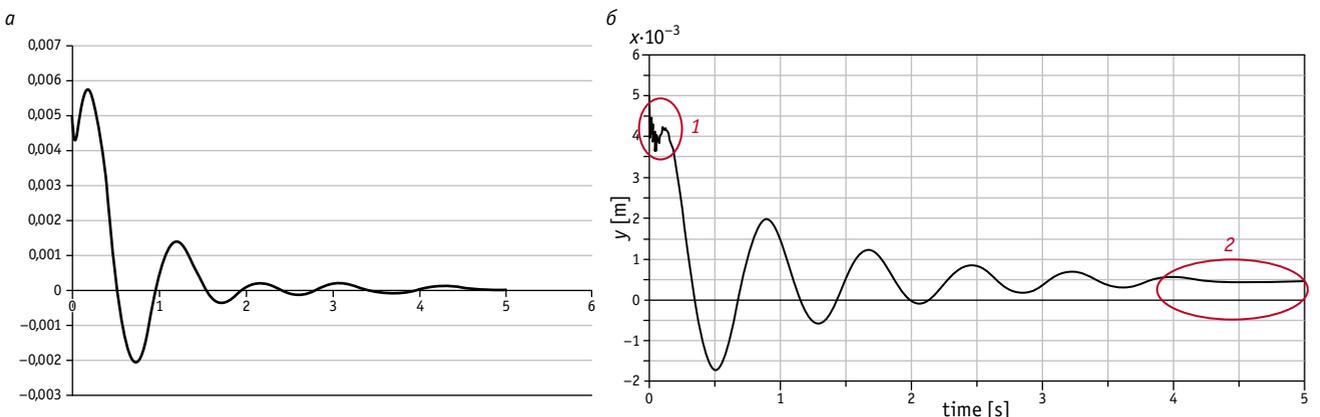


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования колебаний бокового отхода первой колесной пары эталонной модели (а) и модели в SIMPACK Rail (б)

Причина такого результата объясняется прежде всего учетом нелинейной геометрии контакта колеса и рельса в поперечном направлении. Если в эталонной модели простое смещение колесной пары по оси y не влияет на ее начальное положение вокруг оси x (угол $\varphi_{\text{кп1}}^x$), то в SIMPACK Rail, в силу линейзации и учета взаимозависимости параметров, показанных на рис. 2, изначальное смещение колесной пары приводит также к изменению угла ее поворота вокруг продольной оси. С помощью САД-программы смоделирована твердотельная сборка колесной пары в точках контакта левого и правого колеса с рельсами и установлено, что при вышеуказанной геометрии взаимного расположения колес и рельсов поперечное смещение на 0,005 м приводит к повороту колесной пары примерно на $-0,15$ град вокруг оси x . Добавляя это начальное условие к первому, получаем результаты интегрирования, представленные на рис. 6а. Расстояние от оси пути до главного круга катания колеса в обоих случаях постоянное, т.е. $s = 0,79$ м. Для дополнительной проверки расчетов в SIMPACK Rail изменяем диаметр колес по кругу катания ($R_{\text{к0}}$) верифицируемой модели с 0,625 до 0,39 м, как у эталонной модели, и проверяем соблюдение равенства (1). Результат расчета координаты бокового отхода первой колесной пары в этом случае представлен на рис. 6б.

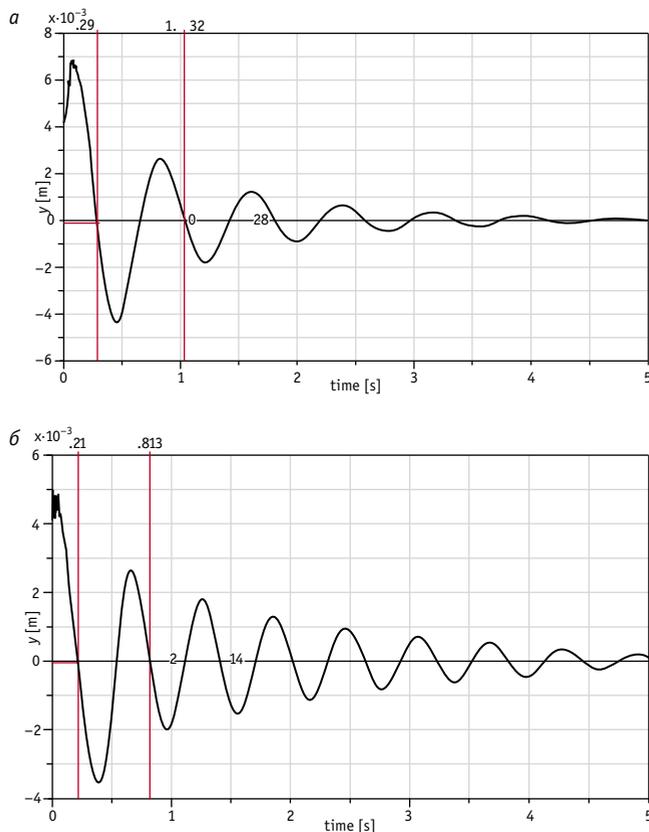


Рис. 6. Результаты моделирования бокового отхода первой колесной пары в SIMPACK Rail со скорректированными начальными условиями

Амплитудные спектры колебаний отхода колесной пары при начальных радиусах колес по кругу катания 0,39 м у эталонной модели и 0,625 м у верифицируемой модели показаны соответственно на рис. 7а и 7б.

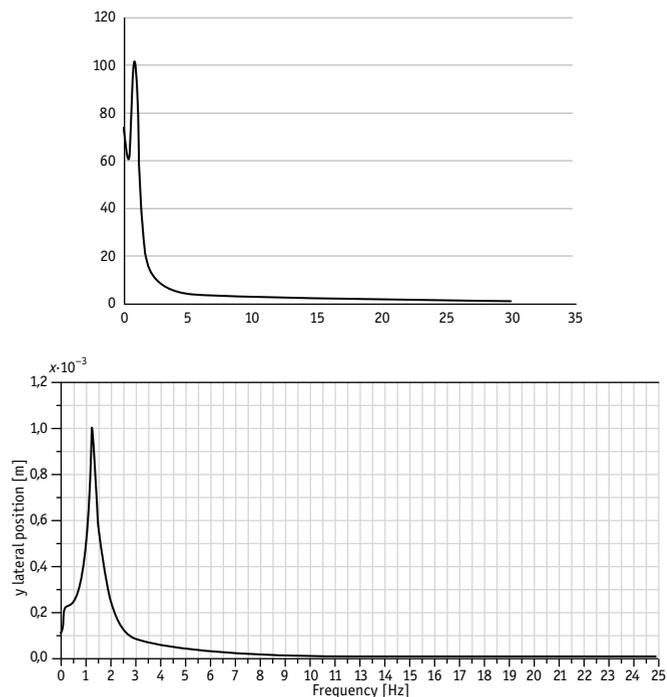


Рис. 7. Амплитудные спектры колебаний бокового отхода первой колесной пары

Все результаты проверки сведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение результатов моделирования

Экипаж	Параметры							
	$R_{\text{к0}}$, м	v , км/ч	$y_0^{\text{кп1}}$, м	$\varphi_{0\text{кп1}}^x$, град	$\omega_{\text{кп1}}^y$, рад/с	$f_{\text{кп1}}^y$, Гц	i	s , м
Эталон, 2о-2о	0,39	100	0,005	0	6,28	1,0	0,05	0,8
SIMPACK, 2о-2о	0,625	100	0,005*	-0,15	$\frac{8,07}{8,84}$ **	1,3	0,05	0,79
SIMPACK, 2о-2о	0,39	100	0,005*	-0,15	$\frac{10,41}{11,17}$ **	1,7	0,05	0,79

Примечание. $R_{\text{к0}}$ — радиус неизношенного колеса по основному кругу катания; $y_0^{\text{кп1}}$ — обобщенная координата бокового отхода колесной пары; $\varphi_{0\text{кп1}}^x$ — обобщенная координата боковой качки 1-й колесной пары экипажа; $\omega_{\text{кп1}}^y$ — угловая частота колебаний бокового отхода и влияния 1-й колесной пары экипажа; $f_{\text{кп1}}^y$ — линейная частота колебаний бокового отхода и влияния 1-й колесной пары экипажа.

*В проекции на ось y . **В числителе — по результатам моделирования, в знаменателе — расчетное по равенству (1).

ВЫВОДЫ

1. Исследование правильности построения динамических систем с помощью свободных колебаний является универсальным способом, который также применим и для пространственных моделей.

2. Степень детализации пространственных моделей должна учитываться при выборе начальных условий проверки.

3. Сравнение моделирования в SIMPACK Rail показало хорошую сходимость результатов по боковому отношению колесной

пары с плоской моделью. Во всех случаях колесные пары «качались» с ожидаемой амплитудой, частотой и временем затухания примерно в 5 с.

4. Установлено, что степень точности результатов расчетов пространственных моделей находится в большей зависимости от качества и количества исходных данных (данных необходимо гораздо больше) по сравнению с плоскими моделями, а также требует тонкой настройки параметров моделирования.

Литература

1. Ильин М. М., Колесников К. С., Саратов Ю. С. Теория колебаний : учеб. для вузов / Под общ. ред. К. С. Колесникова ; 2-е изд., стер. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 271 с.
2. Механическая часть тягового подвижного состава : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак и др. ; под ред. И. В. Бирюкова. М. : АльянсС, 2013. 440 с.
3. Бурчак Г. П. Совершенствование методики исследования свободных боковых колебаний экипажей // Фундаментальные проблемы динамики и прочности подвижного состава : юбил. сб. науч. тр. / Под ред. А. Н. Савоськина. М. : МИИТ, 1997. Вып. 912. С. 3–12.
4. ГОСТ 9036–88. Колеса цельнокатаные. Конструкция и размеры. М. : Издательство стандартов, 1989. 15 с.
5. SIMPACK Documentation, Release 9.5 / Copyright by SIMPACK AG, 2013. 3810 s.
6. Крушев С. Д., Сердобинцев Е. В., Званцев П. Н. Исследование свободных и вынужденных колебаний моделей подвижного состава : учеб. пособие. М. : МИИТ, 2012. 51 с.

References

1. Il'in M. M., Kolesnikov K. S., Saratov Yu. S. Teoriya kolebaniy : ucheb. dlya vuzov [The theory of oscillations : a textbook] / Pod obsch. red. K. S. Kolesnikova ; 2-e izd., ster. M. : Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2003. 271 s.
2. Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava : ucheb. dlya vuzov zh.-d. transp. [Mechanical part of traction rolling stock : a textbook for railway universities] / I. V. Biryukov, A. N. Savos'kin, G. P. Burchak i dr. ; pod red. I. V. Biryukova. M. : Al'yansS, 2013. 440 s.
3. Burchak G. P. Sovershenstvovanie metodiki issledovaniya svobodnykh bokovykh kolebaniy ekipazhey [Improvement of the methodology for studying free lateral oscillations of vehicles] // Fundamental'nye problemy dinamiki i prochnosti podvizhnogo sostava : yubil. sb. nauch. tr. / Pod red. A. N. Savos'kina. M. : MIIT, 1997. Vyp. 912. S. 3–12.
4. GOST 9036–88. Kolesa tsel'nokatanые. Konstruktsiya i razmery [Solid-rolled wheels. Design and dimensions]. M. : Izdatel'stvo standartov, 1989. 15 s.
5. SIMPACK Documentation, Release 9.5 / Copyright by SIMPACK AG, 2013. 3810 s.
6. Krushev S. D., Serdobintsev E. V., Zvantsev P. N. Issledovanie svobodnykh i vynuzhdennykh kolebaniy modeley podvizhnogo sostava : ucheb. posobie [Study of free and forced oscillations of rolling stock models : a textbook]. M. : MIIT, 2012. 51 s.

УДК 629.41+311.2

Алексей Игоревич Давыдов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Михаил Михайлович Никифоров, кандидат технических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения (НИИЭ ОмГУПС), Омск, Россия

АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ДАННЫХ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ НА УРОВНЕ ЛОКОМОТИВНЫХ ДЕПО ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНЕРГООБСЛЕДОВАНИЯ ОАО «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»

Alexey Igorevich Davydov, PhD in Engineering, Associate Professor, Informatics, Applied Mathematics and Mechanics Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Mikhail Mikhaylovich Nikiforov, PhD in Engineering, Deputy Director of the Research Institute for Energy Saving in Railway Transport, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Algorithm for the analysis of data on the use of energy resources for train traction at the level of locomotive depots during the energy survey of JSC Russian Railways

Аннотация

В статье представлен алгоритм анализа эффективности использования энергоресурсов на тягу поездов при проведении энергетического обследования в ОАО «Российские железные дороги». Алгоритм включает в себя два логических блока: первый — для анализа соответствия норм расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов фактическому энергопотреблению, второй — для сравнительного исследования результатов потребления электроэнергии и дизельного топлива на тягу поездов несколькими локомотивными депо, работающими на общем полигоне. Выполнение такого комплексного анализа позволит выявить скрытые резервы повышения энергетической эффективности перевозочного процесса благодаря одному из важнейших мотивирующих факторов для локомотивных бригад — правильно установленной норме расхода энергии.

Ключевые слова: энергетическое обследование, анализ, тяга поездов, топливно-энергетические ресурсы.

Summary

The article presents an algorithm for analyzing the efficiency of using energy resources for train traction during an energy survey at JSC Russian Railways. The algorithm includes two logical blocks: the first — for analyzing the compliance of fuel and energy resources consumption rates with the traction of trains to actual energy consumption, and the second — for comparative study of the results of electricity and diesel fuel consumption for train traction by several locomotive depots operating at a common landfill. The implementation of such a comprehensive analysis will reveal hidden reserves of increasing the energy efficiency of the transportation process due to one of the most important motivating factors for locomotive crews — the correctly established rate of energy consumption.

Keywords: energy survey, analysis, train traction, fuel and energy resources.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-10-14

Как было отмечено в [1], все объекты ОАО «РЖД» раз в пять лет подлежат обязательному энергетическому обследованию. Организация такого обследования крайне трудоемка, что обусловлено сложностью структуры управления процессами приобретения, выработки, транспортировки, использования и передачи энергоресурсов сторонним потребителям. Чтобы обеспечить качественное энергетическое обследование, необходимо разделить его на этапы, структурировать и обеспечить контроль выполнения работ на всех уровнях [2]. Первый энергетический паспорт ОАО «РЖД» был разработан и утвержден в 2012 г. Соответственно в 2017 г. энергетическое обследование объектов ОАО «РЖД» проводится повторно, что ставит определенные условия при выполнении работ [3, 4].

Необходимо признать, что энергетическое обследование ОАО «РЖД» нельзя считать полным без учета главной отраслевой специфики, а именно потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на тягу поездов.

Энергопотребление на тягу поездов характеризуется большой неравномерностью нагрузки по времени, широким расщеплением приемников и потребителей энергоресурсов в пространстве, существенными отличиями использования энергоресурсов для разных типов движения поездов и местами возникновения потерь для разных систем энергоснабжения. Особенности проведения энергообследования дистанций электроснабжения и локомотивных депо проанализированы в [5–7].

В соответствии с [8] процедура энергетического обследования делится на несколько этапов. Один из них — обработка и анализ сведений, полученных по результатам сбора информации об объекте энергетического обследования. Рассмотрим алгоритм (рис. 1) выполнения этого этапа применительно к локомотивным эксплуатационным депо, работающим на общем полигоне, при обследовании не зданий и сооружений, а процесса использования энергоресурсов на тягу поездов.

Сравнительный анализ данных об использовании энергоресурсов на тягу поездов выполняется по относительному по-

казателю, устанавливающему соответствие фактического расхода ТЭР на тягу поездов заданным нормативным значениям. Этот показатель рассчитывается для каждой серии локомотива и вида движения, %:

$$\gamma_{ij} = 100 \cdot \frac{b_{ij}^{\Phi} - b_{ij}^H}{b_{ij}^H},$$

где b_{ij}^{Φ} , b_{ij}^H — соответственно средний фактический и нормативный удельный расход ТЭР локомотива i -й серии в j -м виде движения, кВт·ч (кг)/10000 т·км брутто.

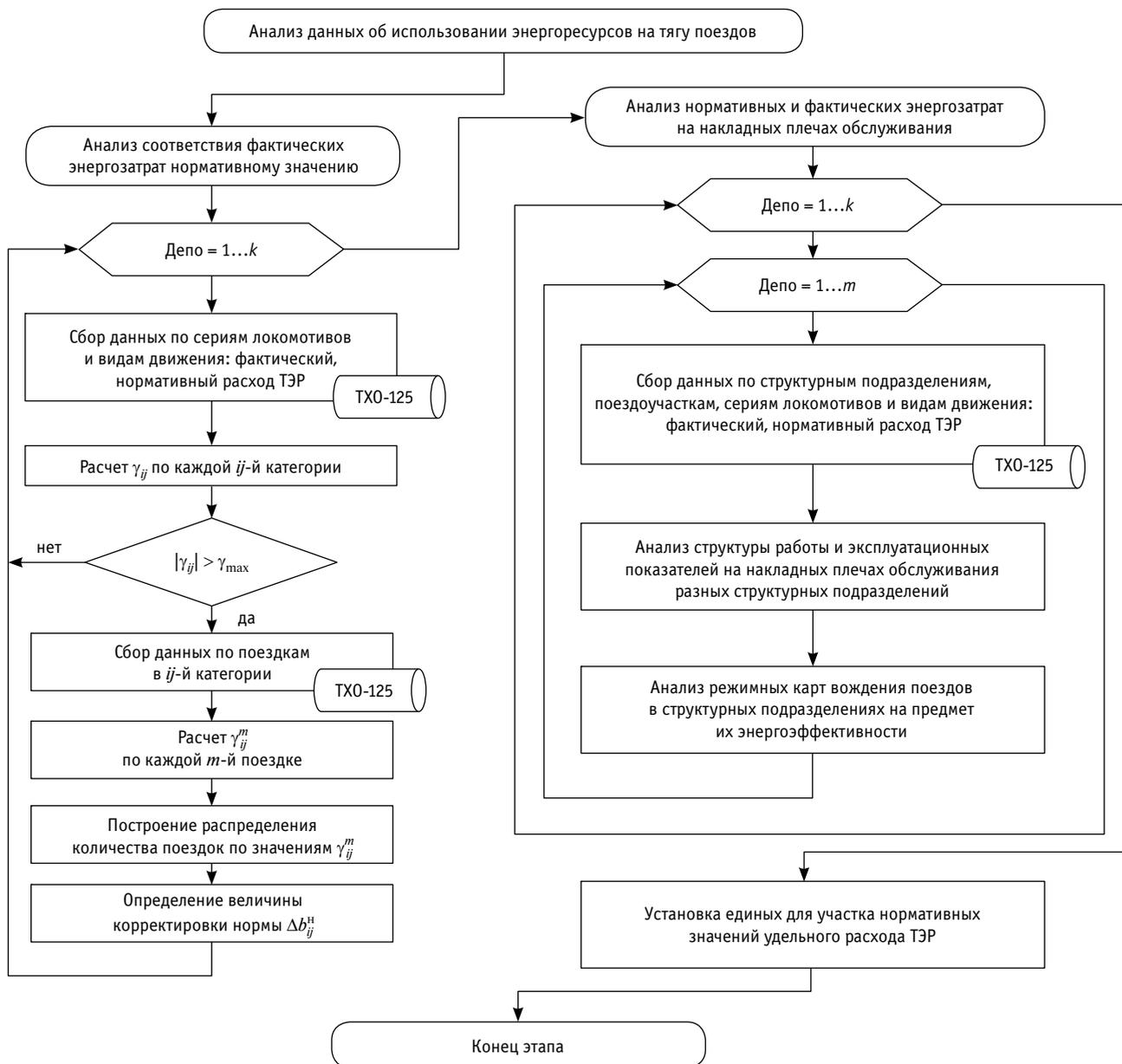


Рис. 1. Алгоритм анализа данных об использовании энергоресурсов на тягу поездов на уровне локомотивных депо

Рассчитанное значение γ_{ij} по любой категории не должно превышать $\gamma_{\max} = 10\%$. В противном случае необходимо проверить аналогичные данные за годы, предшествующие году проведения энергообследования.

Если ситуация $|\gamma_{ij}| > \gamma_{\max}$ сохраняется во все годы, то в автоматизированной системе «Корпоративное информационное хранилище «Локомотивный парк» необходимо запросить данные формы ТХО-125 «Отчет о расходе топлива и электроэнергии на тягу поездов» с детализацией по поездкам i -й серии локомотива в j -м виде движения за текущий месяц и месяц, предшествующий ему. По данным выборки строится распределение значений γ_{ij} . Целесообразно представлять его в табличном (табл. 1) и графическом (рис. 2) виде.

Таблица 1

Пример распределения поездок в выборке по значениям расхождения фактического и нормативного удельного расхода ТЭР

Значение γ_{ij} , %	Количество поездок	Удельный вес поездок со значением γ_{ij} в общем объеме поездок, %
Менее -100	26	10,0
От -100 до -50	53	20,5
От -50 до -30	55	21,2
От -30 до -20	31	12,0
От -20 до -10	21	8,1
От -10 до 0	10	3,9
От 0 до 10	13	5,0
От 10 до 20	18	6,9
От 20 до 30	15	5,8
От 30 до 50	7	2,7
От 50 до 100	8	3,1
Более 100	2	0,8
Всего	259	100,0

В рассматриваемом примере только 8,9 % всех поездок попадают в область оптимального соотношения фактического и нормативного удельного расхода ТЭР. При этом около 50 % поездок попадают в область значительной экономии ТЭР. Отсюда можно сделать вывод, что норма расхода ТЭР для данной i -й серии локомотива в j -м виде движения завышена и должна быть снижена в среднем на 30–40 %. В случае необходимости может быть проведено исследование по составляющим начисления нормы аналогичным образом.

Вторым направлением анализа системы нормирования расхода ТЭР является исследование норм, установленных на накладных плечах обслуживания локомотивных бригад разных структурных подразделений дирекции тяги. Информационной основой такого анализа служат данные формы ТХО-125, полученные по поездкам в депо приписки локомотивных бригад.

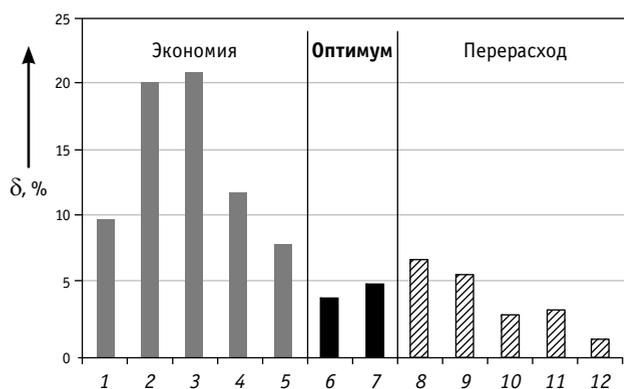


Рис. 2. Гистограмма распределения отклонений фактического удельного расхода ТЭР от нормативного:

- 1 — менее -100 %; 2 — от -100 до -50 %; 3 — от -50 до -30 %;
- 4 — от -30 до -20 %; 5 — от -20 до -10 %; 6 — от -10 до 0 %;
- 7 — от 0 до 10 %; 8 — от 10 до 20 %; 9 — от 20 до 30 %;
- 10 — от 30 до 50 %; 11 — от 50 до 100 %; 12 — более 100 %

Рассмотрим случай, когда на участке в грузовом движении работают бригады локомотивных депо N и K . На первом этапе анализа определяются доли (в процентах) перевозочной работы по плечам обслуживания локомотивных бригад этих депо, как представлено на рис. 3.

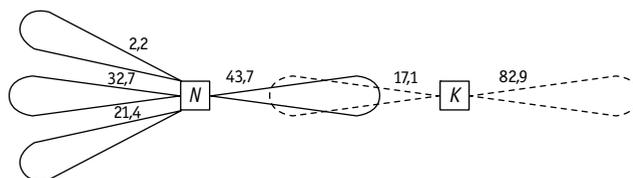


Рис. 3. Распределение работы локомотивных депо N и K по плечам обслуживания

На следующем этапе анализа строится распределение поездок по нормообразующему фактору. Например, для грузового движения нормы чаще всего устанавливаются по нагрузке на ось грузового вагона. На рис. 4 и 5 приведено распределение числа маршрутных листов и работы в локомотивных депо N и K по квантам средней нагрузки на ось вагона.

Основные качественные показатели выполнения перевозочного процесса на исследуемом участке в эксплуатационных локомотивных депо N и K в месяце, предшествующем месяцу проведения энергообследования, приведены в табл. 2. Важно рассматривать именно последнюю информацию о показателях выполнения перевозочного процесса, так как в текущих условиях эксплуатации они даже в течение года могут значительно меняться.

Данные рис. 4 и 5, а также табл. 2 свидетельствуют о том, что в рассматриваемых структурных подразделениях условия работы в грузовом движении схожи.

Значения нормативного и фактического удельного расхода ТЭР на тягу поездов в депо N и K приведены в табл. 3, из которой видно, что нормы расхода ТЭР в депо K могут быть снижены до значений, установленных в депо N .

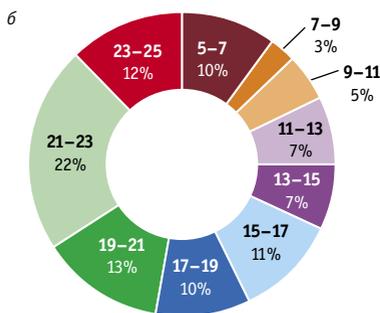
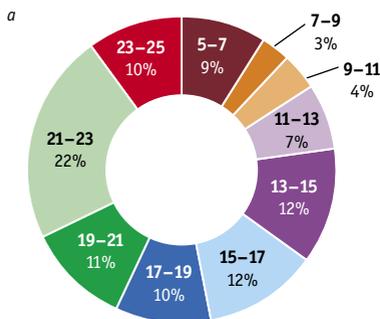


Рис. 4. Распределение числа маршрутов машинистов по квантам средней нагрузки на ось вагона:
а — в депо *N*; б — в депо *K*

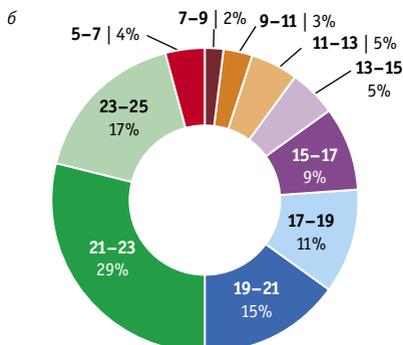
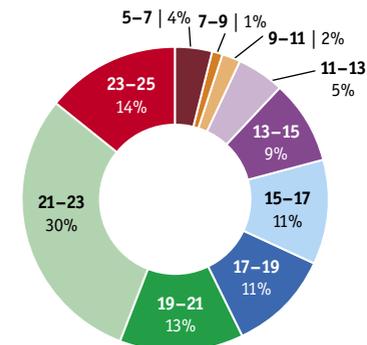


Рис. 5. Распределение работы по квантам средней нагрузки на ось вагона:
а — в депо *N*; б — в депо *K*

Таблица 2

Основные качественные показатели выполнения перевозочного процесса в локомотивных депо *N* и *K* на исследуемом участке

Показатель	Депо <i>N</i>	Депо <i>K</i>	Разница, ед.	Разница, %
Средняя масса поездов, т	5189	5125	-64,0	-1,2
Техническая скорость, км/ч	64,4	66,3	1,9	3,0
Средняя нагрузка на ось, т	15,9	16,1	0,2	1,3

Таблица 3

Нормативный и фактический удельный расход ТЭР в локомотивных депо *N* и *K*

Кванты нагрузки на ось грузового вагона, т	Нормативный удельный расход ТЭР, ед./10 тыс. т-км брутто				Фактический удельный расход ТЭР, ед./10 тыс. т-км брутто			
	<i>N</i>	<i>K</i>	Разница	Разница, %	<i>N</i>	<i>K</i>	Разница	Разница, %
5-7	128,1	134,3	-6,2	-4,8	123,4	131,0	-7,6	-6,2
7-9	99,9	118,8	-18,9	-18,9	97,8	103,8	-6,0	-6,1
9-11	83,8	98,1	-14,3	-17,0	81,6	87,5	-6,0	-7,4
11-13	72,8	80,9	-8,0	-11,0	68,4	73,3	-4,9	-7,2
13-15	65,2	71,8	-6,5	-10,0	61,8	66,6	-4,9	-7,9
15-17	57,1	62,1	-5,0	-8,7	55,6	61,2	-5,6	-10,0
17-19	51,1	56,7	-5,6	-11,0	49,6	53,1	-3,5	-7,1
19-21	46,7	53,6	-6,8	-14,6	44,5	50,0	-5,5	-12,2
21-23	43,5	51,5	-8,0	-18,4	41,8	46,1	-4,3	-10,4
23-25	41,5	49,3	-7,9	-19,0	39,7	44,3	-4,7	-11,8

Приведенные данные свидетельствуют о том, что локомотивные бригады депо *K*, выполняя заданное нормативное значение потребления энергоресурсов, не всегда в полном объеме используют энергоэффективные приемы выполнения поездки.

Таким образом, установление корректных норм расхода ТЭР на тягу поездов — одно из наиболее действенных и в то же время незатратных мероприятий по повышению энергетической эффективности на предприятиях железнодорожного транспорта.

Данные, полученные при выполнении этого этапа энергетического обследования, позволяют определить участки работы локомотивных бригад, для которых необходимо проведение натурных экспериментов по оценке достоверности установленных норм расхода энергоресурсов, уровня потерь электроэнергии для электрифицированных участков, качества ремонта подвижного состава, уровня подготовки машинистов и т.д.

Литература

1. Черемисин В. Т., Никифоров М. М. Основные направления реализации Федерального закона № 261-ФЗ от 23.11.09 «Об энергосбережении...» в холдинге «Российские железные дороги» // Известия Транссиба. 2010. № 2 (2). С. 119–123. ISSN 2220–4245.
2. Никифоров М. М. Концепция организации энергетического обследования в ОАО «Российские железные дороги» // Известия Транссиба. 2010. № 4 (4). С. 120–126. ISSN 2220–4245.
3. Каштанов А. Л., Никифоров М. М., Комяков А. А. Особенности проведения повторного энергетического обследования объектов ОАО «Российские железные дороги» // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем : матер. второй междунар. науч.-практ. конф. / ОмГУПС. Омск, 2016. С. 165–171.
4. Каштанов А. Л., Никифоров М. М., Комякова О. О. Совершенствование методической базы и порядка проведения энергетического обследования объектов ОАО «Российские железные дороги» // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 8–13. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-8-13. ISSN 1815–9400.
5. Каштанов А. Л., Комяков А. А., Никифоров М. М. Особенности проведения энергетических обследований дистанций электрооборудования — структурных подразделений железных дорог — филиалов ОАО «Российские железные дороги» // Омский научный вестник. 2010. № 3 (93). С. 148–151. ISSN 1813–8225.
6. Давыдов А. И., Никифоров М. М. Особенности проведения энергетического обследования электрической тяги поездов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011. № 1. С. 303–306. ISSN 2071–3827.
7. Никифоров М. М. Энергетическое обследование системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава // Инновационное развитие железнодорожного транспорта России : матер. всерос. науч.-практ. конф. / ОмГУПС. Омск, 2012. С. 113–119.
8. Об утверждении требований к проведению энергетического обследования и его результатам и правил направления копий энергетического паспорта, составленного по результатам обязательного энергетического обследования : приказ Минэнерго России от 30.06.2014 г. № 400 [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1507> (дата обращения: 30.10.2017).

References

1. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M. Osnovnye napravleniya realizatsii Federal'nogo zakona № 261-FZ ot 23.11.09 «Ob energosberezhenii...» v kholdinge «Rossiyskie zheleznye dorogi» [The basic directions of realization of the Federal Law «About power savings...» No. 261-FZ on 23.11.09 in holding Russian Railways] // Izvestiya Transsiba. 2010. № 2 (2). S. 119–123. ISSN 2220-4245.
2. Nikiforov M. M. Kontseptsiya organizatsii energeticheskogo obsledovaniya v ОАО «Rossiyskie zheleznye dorogi» [The concept of the organization of power inspection JSC Russian Railways] // Izvestiya Transsiba. 2010. № 4 (4). S. 120–126. ISSN 2220-4245.
3. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Komyakov A. A. Osobennosti provedeniya povtornogo energeticheskogo obsledovaniya ob#ektov ОАО «Rossiyskie zheleznye dorogi» [Aspects of performing a repeated energy survey of the object at JSC Russian Railways] // Povyshenie energeticheskoy effektivnosti nazemnykh transportnykh sistem : mater. vtoroy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / OmGUPS. Omsk, 2016. S. 165–171.
4. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Komyakova O. O. Sovershenstvovanie metodicheskoy bazy i poryadka provedeniya energeticheskogo obsledovaniya ob#ektov ОАО «Rossiyskie zheleznye dorogi» [Improvement of the methodological basis and procedure of energy audit in JSC Russian Railways] // Transport Urala. 2017. № 1 (52). S. 8–13. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-8-13. ISSN 1815-9400.
5. Kashtanov A. L., Komyakov A. A., Nikiforov M. M. Osobennosti provedeniya energeticheskikh obsledovaniy distantsiy elektrosnabzheniya — strukturnykh podrazdeleniy zheleznykh dorog — filialov ОАО «Rossiyskie zheleznye dorogi» [Checklist for power inspections of electrical supply networks in Russian Railways] // Omskiy nauchnyy vestnik. 2010. № 3 (93). S. 148–151. ISSN 1813-8225.
6. Davydov A. I., Nikiforov M. M. Osobennosti provedeniya energeticheskogo obsledovaniya elektricheskoy tyagi poezdov [Features of conducting energy audits of electric train traction] // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2011. № 1. S. 303–306. ISSN 2071-3827.
7. Nikiforov M. M. Energeticheskoe obsledovanie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya i elektropodvizhnogo sostava [Energy survey of power supply system and electric rolling stock] // Innovatsionnoe razvitie zheleznodorozhnogo transporta Rossii : mater. vseros. nauch.-prakt. konf. / OmGUPS. Omsk, 2012. S. 113–119.
8. Ob utverzhenii trebovaniy k provedeniyu energeticheskogo obsledovaniya i ego rezul'tatam i pravil napravleniya kopiy energeticheskogo pasporta, sostavlenogo po rezul'tatam obyazatel'nogo energeticheskogo obsledovaniya : prikaz Minenergo Rossii ot 30.06.2014 g. № 400 [On approval of the requirements for carrying out the energy audit and its results and the rules for sending copies of the energy passport compiled on the basis of the results of the mandatory energy audit : Order of the Ministry of Energy of Russia on 30.06.2014 No. 400]. [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1507> (access date: 30.10.2017).

УДК 656.223

Геннадий Львович Аккерман, доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Петр Иванович Тарасов, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе ООО «Перспектива-М», Екатеринбург, Россия,

Сергей Геннадьевич Аккерман, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Олег Ведирирович Голубев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Ирина Васильевна Полещук, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия

СУХОПУТНАЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА ПРИПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЕЙ РОССИИ

Gennadiy Lvovich Akkerman, DSc in Engineering, Professor, Railway Construction and Railway Track Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Petr Ivanovich Tarasov, PhD in Engineering, Deputy Director for Scientific Work, LLC «Perspektiva-M», Ekaterinburg, Russia,

Sergey Gennadyevich Akkerman, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Railway Construction and Railway Track Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Oleg Vedimirovich Golubev, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Construction

and Railway Track Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Irina Vasilyevna Poleschuk, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia

The land multimodal transport system of the circumpolar regions of Russia

Аннотация

Статья посвящена этапному развитию транспортной сети на территории Западной Якутии, соединяющей через Тикси (или Юрюнг-Хая) материковую часть России с Северным морским путем. Сегодня Республика Саха (Якутия) — один из богатейших российских регионов, однако суровый климат вносит свои коррективы в его полноценное развитие: здесь практически отсутствует сеть автомобильных и железных дорог, кроме того, несмотря на активное освоение месторождений начиная с середины прошлого века, до сих пор более 16 тыс. потенциальных месторождений все еще остаются малоизученными. Таким образом, для развития в регионе промышленности и социально-экономической сферы необходимы транспортные магистрали, которые должны быть построены с использованием достижений современной техники и технологий. При выборе варианта размещения транспортной сети следует ориентироваться на взаимное расположение сырьевой базы и обогащительных фабрик. Для доставки грузов авторы статьи предлагают использовать специализированные транспортные средства и магистрали (легкую железную дорогу). В статье раскрыт вопрос проектирования энергооптимального профиля автомобильных и железных дорог, в качестве строительного материала рекомендуется использовать существующие отвалы вскрышных пород алмазодобывающей промышленности. Причем объема данных отвалов хватит на строительство более 20 тыс. км двухпутных магистралей промышленного и гражданского назначения.

Ключевые слова: мультимодальный, энергооптимальный, Северный морской путь, транспортная сеть, железная дорога.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-15-20

Summary

The article is devoted to the development of the transport network in the territory of Western Yakutia, which connects the mainland of Russia with the Northern Sea Route through Tiksi (or Yuryung-Khaya). Today, The Sakha (Yakutia) Republic — is one of the richest Russian regions, but the harsh climate is making its corrections to its full-fledged development: there is virtually no network of roads and railways, in addition, despite the active development of deposits since the middle of the last century, more than 16 thousand potential deposits are still poorly understood. Thus, for the development of industry in the region and socio-economic sphere, it is necessary to transport highways that must be built using the achievements of modern technique and technologies. When choosing the variant of the transport network location, one should be guided by the relative location of the raw materials base and concentrating plants. For the delivery of goods, the authors of the article suggest using specialized vehicles and highways (light railway). In the article the question of designing the energy-optimal profile of roads and railways is disclosed, it is recommended to use existing dumps of overburden from the diamond mining industry as a building material. Moreover, the volume of these dumps is enough for the construction of more than 20 thousand km of double-track industrial and civilian lines.

Keywords: multimodal, energy-optimal, Northern Sea Route, transport network, railway.

Стратегической задачей освоения российской Арктики, в пределах которой расположено 27 субъектов Российской Федерации, занимающих площадь в 11,9 млн км², или 70 % территории страны, является создание предпосылок для использования ее ресурсов. Однако выполнение этой важнейшей государственной задачи до сих пор сдерживается из-за отсутствия в регионе современной развитой транспортной сети.

К числу основных трудностей, с которыми приходится сталкиваться при создании транспортной системы в приполярных районах, помимо сурового климата и сложных грунтовых условий, относятся:

малая населенность (до 0,3 чел./км²);

практически полное отсутствие дорог (например, в Республике Саха их протяженность составляет 2 тыс. км, в то время как на Аляске, занимающей в 2 раза меньшую площадь, — 20 тыс. км); медленно восстанавливаемая природная среда;

частое слияние технологических дорог с магистральными (в частности, дороги, связывающие карьеры с обогащательными фабриками, по существу технологические и нередко выполняют функцию магистральных).

Все это формирует особые требования к транспортным магистралям:

минимальная площадь дорог (с точки зрения экологии);

малочисленный эксплуатационный штат;

использование ресурсосберегающих технологий.

Эти требования должны быть заложены уже на стадии проектирования транспортной сети.

Для более гармоничного развития всех видов транспорта здесь должны использоваться системы организации перевозок, в которых будут задействованы два и более вида транспорта для доставки груза от заказчика потребителю. Поскольку одним из факторов, влияющих на выбор такой системы, является стоимость перевозок, наиболее выгодными с этой точки зрения будут морской и железнодорожный транспорт. Именно они должны сыграть основную роль для развития контейнерных перевозок.

Под мультимодальной понимается, как известно, транспортная система с возможностью использования общей инфраструктуры различными видами транспорта (морским, железнодорожным, автомобильным, комбинированным).

На данный момент основное транспортное обеспечение производственной и социальной инфраструктуры Севера представлено авиа- и морским транспортом. Однако в условиях расширения производства вскоре потребуется системная организация связи арктических и приполярных территорий с внутренними регионами страны, а также со странами ЕАЭС [1].

Транспортная сеть в первую очередь должна связать очаги природных ресурсов с обогащательными фабриками (расстояние доходит до 250 км), с существующими или проектируемыми магистралями, которые, в свою очередь, связывают порты и базы Северного морского пути с железнодорожной сетью страны.

Частью этой системы в приполярных районах можно считать и технологический транспорт. В Якутии это прежде всего автосамосвалы грузоподъемностью 200 т и более, которые используются в карьерах по добыче алмазов.

Таким образом, сухопутная транспортная сеть арктических районов должна состоять из карьерных и технологических ав-

томобильных, «автомагистральных» и железных дорог. Причем автомобильные дороги при необходимости могут перерасти в железные дороги. А собственно железные дороги возможны с комбинированным подвижным составом и облегченные.

Транспортная сеть Арктики включает в себя и бездорожные пути сообщения — перевозки грузов и пассажиров аэросанями, вездеходами, платформами на воздушной подушке.

Для транспортной системы Арктики желательны использование малолюдных и ресурсосберегающих технологий. Работа «без водителя» наиболее легко организуется при движении по рельсовому пути.

Сложившаяся в Западной Якутии ситуация показывает, что вскрышные объемы при добыче алмазов и других твердых полезных ископаемых могут стать основой для строительства автомобильных и железнодорожных путей от Северного Ледовитого океана до Транссибирской магистрали, которые одновременно служат и технологическими дорогами для АК «АЛРОСА».

Требуется четко понимать, что для полноценного использования северных территорий необходимо комплексное внедрение в различных областях новых идей, технологий и технических средств.

После проведения ряда экономических расчетов специалистами ИГД УрО РАН было установлено, что наибольший экономический эффект в условиях Арктики может быть достигнут при разработке и использовании многозвенных поездов на автомобильном и железнодорожном ходу [2].

Одним из наиболее интересных в плане создания транспортных узлов для освоения новых территорий в Западной Якутии является морской порт Тикси, расположенный на берегу одноименной бухты близ дельты реки Лены, основанный в 1933 г. Он служит основной базой снабжения и обеспечения условий плавания всего морского каботаж в восточной части российской Арктики. Единственная проблема порта — мелководность: он может принимать суда с осадкой не более 5 м. Поэтому очень важно создание различных путей переправки грузов через него. Приведем такие цифры: в 1987 г. грузооборот порта достигал 850 тыс. т, к 2011-му снизился до 55 тыс. т, по итогам 2012 г. грузооборот Тиксинского филиала, ФГУ «АМП Восточный», составил 358,4 тыс. т [3].

В настоящее время из арктической зоны Российской Федерации наиболее промышленно развита территория Западной Якутии, в которой разведанные запасы кимберлитовых месторождений простираются вплоть до Северного Ледовитого океана.

Проблема беднотоварных удаленных кимберлитовых карьеров, расположенных в северной части Западной Якутии, заключается в том, что экономически невыгодно строить обогащательные фабрики вблизи месторождений, поэтому лучшим решением в данных условиях является организация доставки необогащенной руды на расстояние 10–200 км до места ее обработки [4].

В связи с этим предполагается создание технологических транспортных артерий из автомобильных дорог, а в дальнейшей перспективе и железных дорог, которые будут пронизывать территорию Якутской алмазонасной провинции и одновременно станут основой Якутского транспортного коридора. Он позволит для Западной Якутии связать все алмазодобывающие и другие предприятия, а для России объединить через Тик-

си (или Юрюнг-Хая) материковую часть с Северным морским путем, через Усть-Кут — с западной частью страны, а также с Казахстаном и Средней Азией, через Якутск — с восточной частью вплоть до Тихого океана.

Необходимо учитывать, что из всех видов транспорта для Западной Якутии преимущество имеют железные дороги благодаря низким эксплуатационным расходам, независимости от климатических и сезонных условий, возможности использовать различные виды энергии (для тепловозной и электровозной тяги) и длительным срокам службы подвижного состава (до 20–25 лет). Причем железнодорожный транспорт должен быть доступен в любом районе Якутии независимо от наличия источников электроэнергии [5].

Рельсовый путь позволит на промышленной основе продолжить ускоренное освоение других богатейших месторождений полезных ископаемых в Западной Якутии, что будет способствовать созданию новых производств и рабочих мест и, как следствие, увеличению валового регионального продукта республики.

Железная дорога должна проходить вблизи существующих отвалов горной массы и будущих кимберлитовых месторождений. На рис. 1 представлена транспортная сеть западных территорий Якутии [6–9].

Нами предлагается этапное строительство (реконструкция) участков транспортных магистралей на территории Западной Якутии, что является развитием идеи, рассмотренной в [10], с учетом необходимости первоочередного строительства технологических железных и автодорог. К таким участкам относятся: Мирный — Ленск, Мирный — Якутск, Мирный — Удачный, Удачный — Тикси, Удачный — Саскылах, Саскылах — Тикси, Саскылах — Юрюнг-Хая, Саскылах — Хатанга (табл. 1). Участок Хатанга — Саскылах — Тикси станет частью стратегической железнодорожной линии Норильск — Верхнеколымск, строительство которой планируется до 2050 г. На данных участках должны быть построены (реконструированы) автомобильные и железные дороги. Весь объем предлагается освоить до 2030 г. в четыре этапа: 1-й этап — 2017–2020 гг., 2-й — 2021–2024 гг., 3-й — 2025–2028 гг., 4-й этап — 2029–2030 гг. (рис. 2).

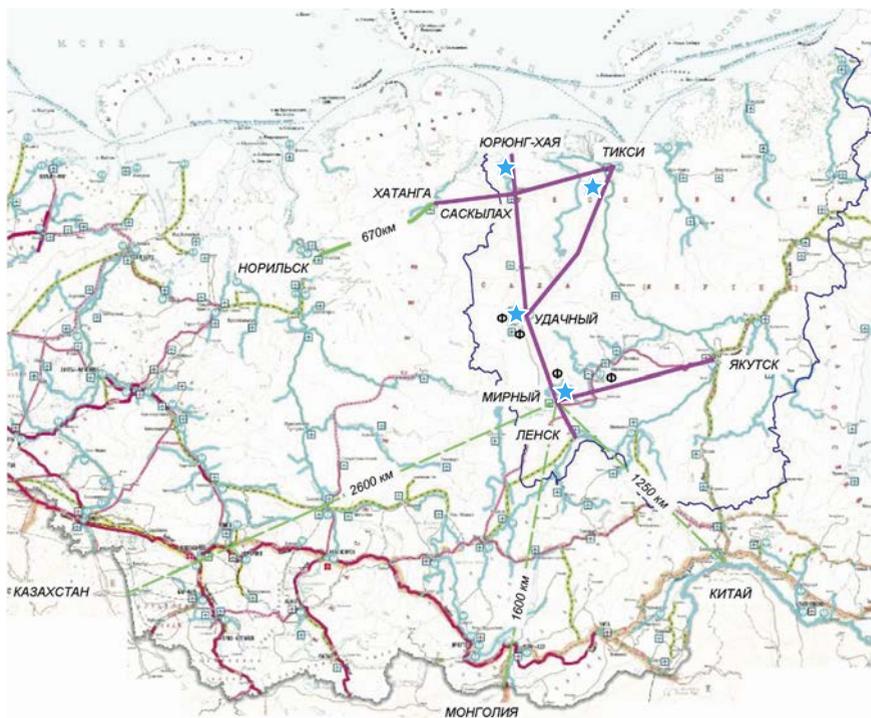


Рис. 1. Схема перспективного развития транспортных магистралей в западных районах Республики Саха (Якутия):

— проект Западно-Якутской железной дороги;
★ — месторождения алмазов; Ф — обогатительные фабрики

Таблица 1

Предлагаемые этапы строительства мультимодальных транспортных магистралей в Западной Якутии

Участок, его протяженность, км	Этапы строительства магистралей по видам транспорта			
	Железнодорожный	Автомобильный	Технологический	Прочие*
Мирный — Ленск, 230	3	3 (скоростная магистраль)	—	—
Мирный — Якутск, 1175	3	1 (реконструкция)	—	—
Мирный — Удачный, 540	1	3 (скоростная магистраль)	1	1
Удачный — Тикси, 1056	1	2	1	1
Удачный — Саскылах, 737	2	2	1	1
Саскылах — Тикси, 616	4	4	3	3
Саскылах — Юрюнг-Хая, 231	2	3	1	1
Саскылах — Хатанга, 495	3	4	2	2

* Болотоходы, судна на воздушной подушке и др.

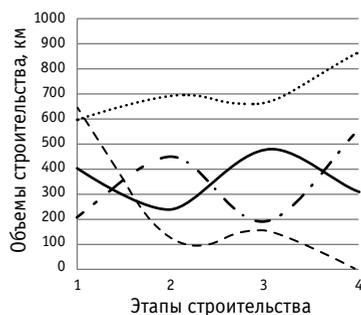


Рис. 2. Объемы строительства транспортных магистралей:

— железная дорога; - - - автомобильная дорога;
--- технологическая дорога; железные и автомобильные дороги

Опыт строительства мультимодальных транспортных систем в дальнейшем можно перенести не только на районы сосредоточения месторождений алмазов (Якутская алмазоносная провинция), но и на северные территории Западно-Сибирского и Дальневосточного федеральных округов.

Энергия, затраченная на движение транспортного потока (да и отдельного экипажа), как известно, зависит от самого экипажа, плотности потока, водителя и дороги, т.е. траектории, которая задана для движения экипажа.

Появление более совершенных автомобилей (локомотивов), замена водителя (машиниста) автоматом, применение информационных технологий и «кибернезация» процесса управления транспортным потоком — все это элементы ресурсосбережения. Остается сделать ресурсосберегающей саму дорогу.

В начале 1990-х гг. на кафедре «Изыскания и проектирование железных дорог» УрГУПС была разработана методика проектирования энергооптимального профиля, т.е. профиля, при движении по которому экипаж затрачивает минимум энергии [11]. Было доказано, что чем равномернее движение экипажа, тем затраты энергии меньше. За показатель качества движения в [12] предлагается принимать шум ускорения — среднеквадратическое отклонение ускорения. Термин «шум» в [12] используется по аналогии с шумами радиосигналов, вызывающих помехи при их приеме.

Шум ускорения (Π) зависит от качества траектории [13]. Шум при свободном движении экипажа, когда нет помех от других участников транспортного потока, назовем естественным шумом, характеризующим данную дорогу. Этот шум ускорения равен шуму на идеальной дороге с коэффициентом α , который и характеризует качество дороги, т.е. $\alpha > 1$.

Согласно [13], формула среднеквадратического отклонения от среднего ускорения на участке преобразуется в выражение

$$\Pi = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{S_k} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 \frac{dS}{V} - a^2}, \quad (1)$$

где τ — время движения по участку S_k ; с;
 V — скорость в рассматриваемый момент времени, м/с;
 a — среднее ускорение на участке S_k , м/с².

Обработка скоростемерных лент локомотивов пассажирских поездов на участке Екатеринбург — Пермь показала, что шум ускорения может изменяться от 0,037 до 0,132 м/с² [13]. Для сравнения: на хорошей дороге Ш одиночного автомобиля приблизительно равен 0,1 м/с² [12].

Шум ускорения зависит, как уже отмечалось, от качества дороги и в первую очередь от значения уклонов и доли элементов профиля.

При этом критерием оптимальности шума ускорения является минимум расхода энергии на тягу:

$$A = \int_0^{S_k} q_s dS \rightarrow \min, \quad (2)$$

где q_s — расход энергии на 1 т·км.

Исследования [11, 13] показали, что между затратами энергии (A) и шумом ускорения (Π) существует довольно тесная связь. Коэффициент корреляции между этими величинами достигает 0,8 и более.

Уравнение движения поезда можно представить в виде

$$\frac{dV}{dt} = \xi(r \pm i), \quad (3)$$

где ξ — коэффициент, показывающий изменение скорости за единицу времени при действии единицы удельной силы;

r — равнодействующая всех удельных сил, кроме уклона;
 i — уклон,

$$i = \frac{dV}{dt} = y', \quad (4)$$

где y — превышение отметки продольного профиля в рассматриваемой точке относительно начала участка.

Подставив (4) и (3) в (1), получим

$$\Pi^2 = \frac{1}{\tau} \int_0^{S_k} \xi^2 (r(S) \pm y')^2 \frac{dS}{V(S)} - a^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Решив задачу методами вариационного исчисления при критерии (5), получим

$$dy = \left[\frac{\tau C_1}{2\xi^2} V(S) \pm r(S) \right] dS, \quad (6)$$

где C_1 — постоянная интегрирования.

В [11, 13] дается выражение y и i при аппроксимации $V(S)$ и $r(S)$ прямыми и параболлами для разных типов подвижного состава. Очертания энергооптимального профиля зависят от скорости и сил в начале ($V_{\text{н}}$, $r_{\text{н}}$) и в конце участка ($V_{\text{к}}$, $r_{\text{к}}$). Для решения задачи предлагается итерационный алгоритм (рис. 3).

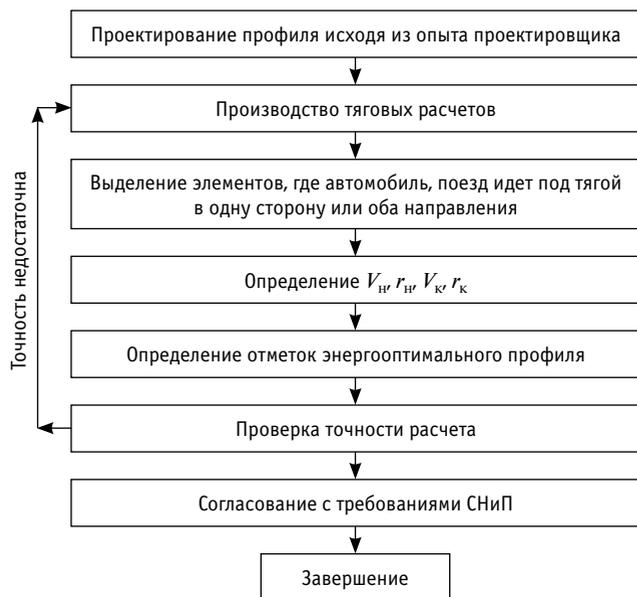


Рис. 3. Алгоритм определения энергооптимального профиля

Точность достаточна, если соблюдаются условия

$$\begin{aligned} |V_m - V_{m-1}| &\leq \Delta V \\ |r_m - r_{m-1}| &\leq \Delta r \\ |y_m - y_{m-1}| &\leq \Delta y, \end{aligned} \quad (7)$$

где ΔV , Δr , Δy — допустимая точность расчета скорости, сил и отметок;

m — номер итерации.

Опытные расчеты показали, что для получения заданной точности достаточно 2–3 итераций.

Исследования энергооптимального профиля позволили выявить следующее.

1. Изменение его отметок в зависимости от сил и скорости поезда описываются полиномом $n+1$ -й степени, где n — степень полинома, аппроксимирующая функции $V = f(S)$ и $r = \varphi(S)$.

2. Проектирование профиля прямолинейными элементами оптимально только при равномерном движении транспортного средства.

3. Разница ординат энергооптимального и прямолинейного профиля зависит от массы поезда (автомобиля) и начальной скорости: чем меньше удельная равнодействующая сила, тем меньше различие по величине ординат.

4. Время движения по энергооптимальному профилю меньше, чем по прямолинейному, а расходы энергии (топлива) сокращаются на 15 % и больше.

5. Так как рассматриваемый регион весьма неоднороден по рельефу, то использование энергооптимального профиля здесь имеет хорошие перспективы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для реализации проекта Западно-Якутской железной дороги («Алмазы России») необходимо решить следующие задачи.

1. Определить стоимостные показатели строительства полотна железных и автомобильных дорог в зависимости от допускаемой нагрузки на грунты основания и скоростей движения на различных участках.

2. Определить достаточность объемов существующих отвалов с учетом темпов строительства и темпов образования новых отвалов от переработанной руды, принимая во внимание физико-механические характеристики отвалов.

3. Скорректировать первоочередность строительства мультимодальных транспортных магистралей.

4. Разработать специальные технические условия на проектирование транспортных магистралей в районах Севера.

5. Составить бизнес-проект и определить источники финансирования с учетом заинтересованности инвесторов и этапности строительства.

Литература

1. Тарасов П. И. Освоение кимберлитовых месторождений как основа для создания новой техники и технологий, а также строительства транспортного коридора в Якутии. Екатеринбург : ООО «ДжиЛайм», 2016. 72 с.
2. Выполнить анализ альтернативных автомобильному видов транспорта руды от удаленных месторождений к обогатительным фабрикам : отчет о НИР / ИГД УрО РАН. Екатеринбург, 2012. 289 с.
3. Тарасов П. И. Развитие транспортных сетей Республики Саха (Якутия) // Арктика и Север. 2014. № 17. С. 65–77. ISSN 2221-2698.
4. Проблемы магистрального транспортирования руды от удаленных кимберлитовых месторождений / П. И. Тарасов, А. Г. Журавлев, В. А. Черепанов и др. // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 5. С. 25–31. ISSN 1816-4528.
5. Специализированная железная дорога как основа развития транспортной инфраструктуры / П. И. Тарасов, С. П. Тарасов, Е. В. Фефелов, А. П. Тарасов // Евразийское научное объединение. 2015. Т. 1. № 10. С. 64–67. ISSN 2411-1899.

References

1. Tarasov P. I. Osvoenie kimberlitovykh mestorozhdeniy kak osnova dlya sozdaniya novoy tekhniki i tekhnologiy, a takzhe stroitel'stva transportnogo koridora v Yakutii [Development of kimberlite deposits as a basis for the creation of new equipment and technologies, as well as the construction of a transport corridor in Yakutia]. Ekaterinburg : 000 «DzhiLaym», 2016. 72 s.
2. Vypolnit' analiz al'ternativnykh avtomobil'nomu vidov transporta rudy ot udalennykh mestorozhdeniy k obogatitel'nym fabrikam : otchet o NIR [Carry out an analysis of alternative types of transportation of ore from remote deposits to concentrating mills : research report] / IGD UrO RAN. Ekaterinburg, 2012. 289 s.
3. Tarasov P. I. Razvitiye transportnykh setey Respubliki Sakha (Yakutiya) [Development of transport networks of the Republic Sakha (Yakutia)] // Arktika i Sever. 2014. № 17. S. 65–77. ISSN 2221-2698.
4. Problemy magistral'nogo transportirovaniya rudy ot udalennykh kimberlitovykh mestorozhdeniy [Mainline ore transportation problems on the remote kimberlite fields] / P. I. Tarasov, A. G. Zhuravlev, V. A. Cherepanov i dr. // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2014. № 5. S. 25–31. ISSN 1816-4528.
5. Spetsializirovannaya zheleznyaya doroga kak osnova razvitiya transportnoy infrastruktury [Specialized railway as a basis for the development of transport infrastructure] / P. I. Tarasov, S. P. Tarasov, E. V. Fefelov, A. P. Tarasov // Evraziyskoe nauchnoe ob#edinenie. 2015. T. 1. № 10. S. 64–67. ISSN 2411-1899.

6. Перспективные транспортные системы для развития арктических и северных территорий РФ / В. Н. Захаров, И. В. Зырянов, М. Л. Хазин и др. // Горная промышленность. 2016. № 4 (128). С. 52–56. ISSN 1609-9192.
7. Обоснования перспективных видов транспорта для освоения арктической и северных территорий Российской Федерации / П. И. Тарасов, Е. В. Фефелов, А. П. Тарасов, А. Ю. Тихомиров // Горная промышленность. 2015. № 6 (124). С. 61–63. ISSN 1609-9192.
8. Транспортное средство на воздушной подушке / Г. И. Рябцев : пат. 2518961 Рос. Федерация. № 2012149808/11 ; заявл. 22.11.2012 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.
9. Монорельсовая транспортная система / К. В. Костенюк : пат. 2622328 Рос. Федерация. № 2016117307; заявл. 04.05.2016 ; опубл. 14.06.2017, Бюл. № 17.
10. Тарасов П. И., Журавская М. А., Голубев О. В. Развитие мультимодальных транспортных коридоров на арктических и северных территориях РФ (на примере Республики Саха (Якутия)) // Горная промышленность. 2017. № 2 (132). С. 40–42. ISSN 1609-9192.
11. Аккерман Г. Л. Влияние продольного профиля пути на качество движения поезда // Проектирование и строительство железных дорог : сб. науч. тр. УЭМИИТ. Свердловск, 1989. Рукопись деп. в ЦНИИТЭИ МПС, № 5149.
12. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Пер. с англ. М. : Транспорт, 1972. 424 с.
13. Аккерман Г. Л. Теория и практика проектирования железных дорог с учетом воздействия окружающей среды : дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 1992.
6. Perspektivnye transportnye sistemy dlya razvitiya arkticheskikh i severnykh territoriy RF [Promising transportation systems for the development of Arctic and Northern territories of the Russian Federation] / V. N. Zakharov, I. V. Zyryanov, M. L. Khazin i dr. // Gornaya promyshlennost'. 2016. № 4 (128). S. 52–56. ISSN 1609-9192.
7. Obosnovaniya perspektivnykh vidov transporta dlya osvoeniya arkticheskoy i severnykh territoriy Rossiyskoy Federatsii [Rationale for the application of advanced kinds of transport for the development of Arctic and northern territories of the Russian Federation] / P. I. Tarasov, E. V. Fefelov, A. P. Tarasov, A. Yu. Tikhomirov // Gornaya promyshlennost'. 2015. № 6 (124). S. 61–63. ISSN 1609-9192.
8. Transportnoe sredstvo na vozduшной podushke [Hovercraft] / G. I. Ryabtsev : pat. 2518961 Ros. Federatsiya. № 2012149808/11 ; yayavl. 22.11.2012 ; opubl. 10.06.2014, Byul. № 16.
9. Monorel'sovaya transportnaya sistema [Monorail transport system] / K. V. Kostenyuk : pat. 2622328 Ros. Federatsiya. № 2016117307 ; yayavl. 04.05.2016 ; opubl. 14.06.2017, Byul. № 17.
10. Tarasov P. I., Zhuravskaya M. A., Golubev O. V. Razvitie mul'timodal'nykh transportnykh koridorov na arkticheskikh i severnykh territoriyakh RF (na primere Respubliki Sakha (Yakutiya)) [Development of a multimodal transportation corridor in Arctic and Northern territories of the Russian Federation (Sakha (Yakutia) Republic case study)] // Gornaya promyshlennost'. 2017. № 2 (132). S. 40–42. ISSN 1609-9192.
11. Akkerman G. L. Vliyaniye prodol'nogo profilya puti na kachestvo dvizheniya poezda [Influence of the longitudinal track profile on the quality of train traffic] // Proektirovaniye i stroitel'stvo zheleznykh dorog : sb. nauch. tr. UEMIIIT. Sverdlovsk, 1989. Rukopis' dep. v TsNIIITEI MPS, № 5149.
12. Dryu D. Teoriya transportnykh potokov i upravleniye imi / Per. s angl. [The theory of transport flows and their management / Trans. from English]. M. : Transport, 1972. 424 s.
13. Akkerman G. L. Teoriya i praktika proektirovaniya zheleznykh dorog s uchetoм vozdeystviya okruzhayushey sredy : dis. ... d-ra tekhn. nauk [Theory and practice of designing of railways subject to the impact of the environment : DSc in Engineering Thesis]. Ekaterinburg, 1992.

УДК 621.396

Александр Михайлович Костроминов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Александр Александрович Костроминов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Олег Николаевич Тюляндин, аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РИДЕРОВ И РАДИОМЕТОК В СИСТЕМЕ ПРИВЯЗКИ К ПУТИ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

Alexander Mikhaylovich Kostrominov, DSc in Engineering, Professor, Electrical Communications Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Alexander Alexandrovich Kostrominov, PhD in Engineering, Associate Professor, Higher Mathematics Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Oleg Nikolayevich Tyulyandin, postgraduate student, Electrical Communications Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Improving the reliability of the interaction of readers and radio tags in the system of binding to the track of metro trains

Аннотация

Статья посвящена решению задачи повышения надежности функционирования системы бесконтактной привязки к пути (СБПП) поездов метрополитена. Актуальность рассматриваемого направления обусловлена несколькими случаями пропусков считывания информации с RFID-меток аппаратурой СБПП на перегонах, где преобладают сравнительно высокие скорости движения (60 км/ч и более). Авторами разработана математическая модель считывания радиочастотных меток аппаратурой СБПП поездов метрополитена, с помощью которой можно оценить вероятность пропуска меток в зависимости от скорости поезда и выбранного времени сканирования. На основании полученных результатов даны рекомендации, позволяющие снизить вероятность пропусков примерно на два порядка за счет увеличения времени сканирования меток от 1 с до предельно возможного значения 65 с, при этом реализация предлагаемого решения потребует минимальной корректировки программного обеспечения аппаратуры.

Ключевые слова: RFID, время сканирования, перегонные радиометки, система бесконтактной привязки к пути, надежность считывания, повышение надежности.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-21-25

Summary

The article is devoted to the solution of the task of increasing the reliability of the functioning of the system of non-contact binding to the track (SNCBT) of metro trains. The relevance of this direction is due to several cases of missing information from the RFID tags of the SNCBT equipment on the stretches, where relatively high speeds (60 km/h or more) predominate. The authors developed a mathematical model for reading radio frequency tags with the SNCBT equipment of metro trains, with the help of which it is possible to estimate the probability of skipping tags depending on the speed of the train and the selected scan time. On the basis of the results obtained, recommendations are given that reduce the probability of omissions by about two orders of magnitude by increasing the scanning time of tags from 1 second to the maximum possible value of 65 seconds, while implementing the proposed solution will require minimal adjustment of the software hardware.

Keywords: RFID, scanning time, stretches, radio tags, the system of non-contact binding to the track, reliability of reading, reliability increase.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации разработанной кафедрой «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения совместно с ГУП «Петербургский метрополитен» системы бесконтактной привязки к пути (СБПП) [1–4], базовой частью которой являются RFID-средства (радиометки, устанавливаемые на стенах тоннеля, и ридеры с антеннами, располагаемые на борту головных вагонов пассажирских поездов [5–7]) (рис. 1), было зафиксировано несколько случаев пропуска считывания перегонных радиометок (далее — меток). Эти немногочисленные случаи актуализировали задачу повышения надежности функционирования СБПП.

В качестве гипотезы, объясняющей причину пропуска меток, рассматривалось влияние временных характеристик при взаимодействии ридера с метками. Для исследования гипотезы возникла потребность в разработке математической модели, позволяющей оценить ожидаемую вероятность пропуска меток.

ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РИДЕРА С МЕТКОЙ

В системе бесконтактной привязки к пути ридер осуществляет поиск меток после получения соответствующей команды от вагонного контроллера. При этом команда содержит настраиваемое время сканирования (от 1 до 65 с).

В случае если RFID-антенна находится в зоне радиовидимости метки, ридер «накачивает» метку энергией, затем посылает запрос на считывание. По окончании накачки метка обрабатывает запрос и генерирует ответ согласно протоколу Gen2 [8]. После информационного обмена ридер завершает сканирование и передает считанные данные в контроллер.

Если по истечении заданного времени ни одна метка не была считана, ридер независимо от текущего состояния прекращает сканирование и информирует об этом контроллер. Обработав ответ ридера, контроллер посылает повторную команду на поиск. На этом цикл связи ридера с меткой завершается.

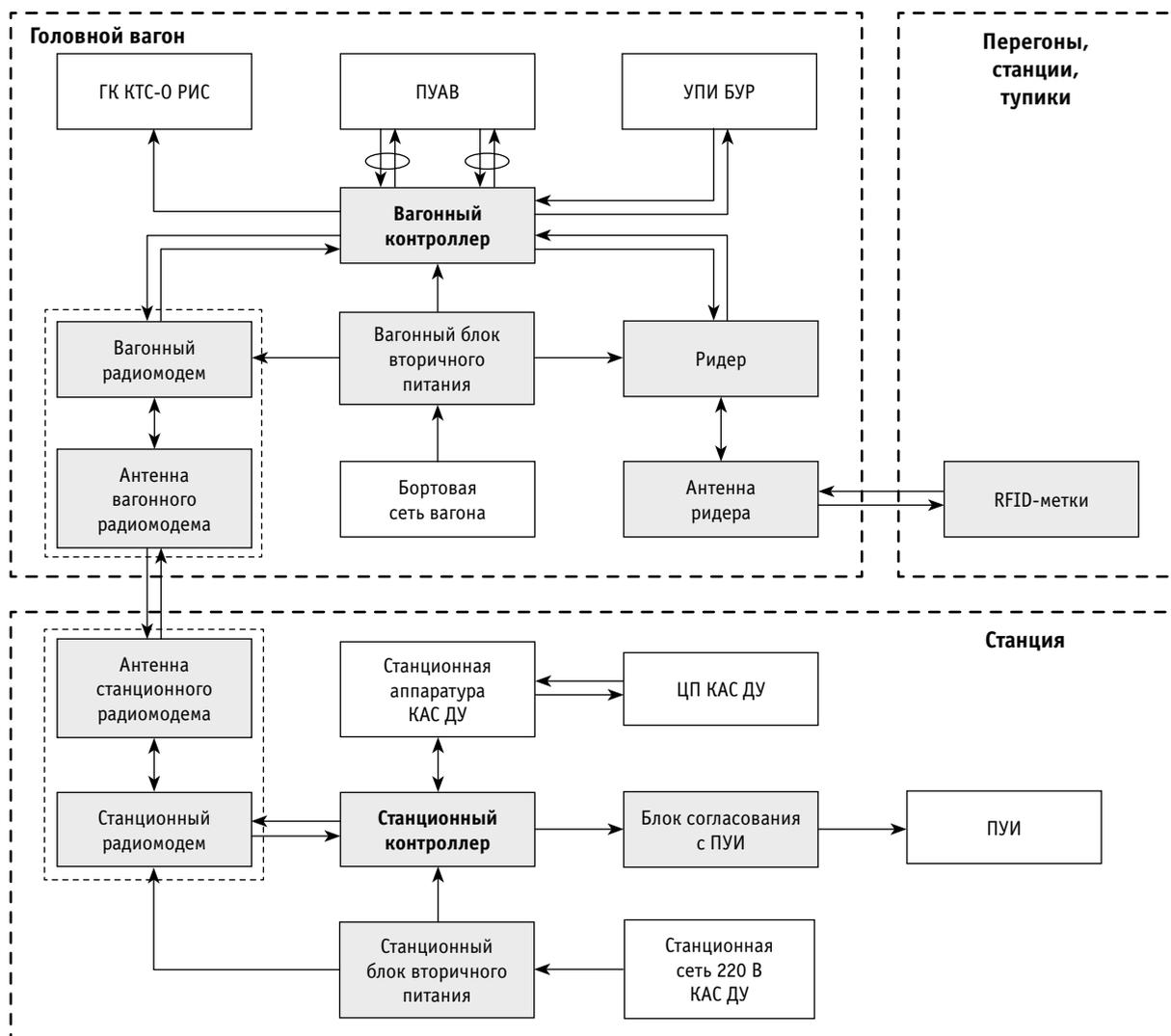


Рис. 1. Структурная схема СБПП



Согласно данным экспериментальных наблюдений, время от момента выключения сканирующего поля до очередного включения представляет собой случайную величину, имеющую нормальную плотность распределения со средним значением 40 мс и среднеквадратичным отклонением 4 мс. Время накачки и информационного обмена в рамках решаемой задачи примем детерминированной величиной, равной 40 мс.

МЕТОД ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ПРОПУСКА МЕТОК

Введем следующие условные обозначения:

t — момент времени, когда электромагнитное поле антенны ридера достигает зоны радиовидимости метки (отсчитывается от последнего запуска процесса сканирования меток ридером, величина t является случайной);

Δs — ширина зоны радиовидимости метки ридером (в рамках решаемой задачи Δs примем детерминированной величиной, равной 230 см [1]);

v — скорость поезда в окрестности зоны радиовидимости метки (случайная величина, м/с);

Δt — время от момента выключения сканирующего электромагнитного поля до очередного включения [случайная величина, $\Delta t \sim N(a = 40 \text{ мс}, \sigma = 4 \text{ мс})$];

t_0 — настраиваемое время сканирования меток (от 1 до 65 с);

τ — среднее значение времени накачки метки энергией и времени радиообмена метки и ридера (40 мс).

В качестве допущения примем, что при единичном проезде поезда с ридером на интервале сканирования, накрывающем зону радиовидимости метки, и последующем движении скорость поезда сохраняется неизменной. Однако будем полагать, что на множестве проездов поезда величина скорости варьируется и подчинена равномерному распределению в диапазоне $[v_{\min}, v_{\max}]$, где v_{\min} и v_{\max} — минимальное и максимальное значения скорости на перегоне в окрестностях зоны радиовидимости метки.

Из принципа взаимодействия ридера с метками, заложенного в СБПП, следует, что случайная величина t имеет равномерное распределение на промежутке $[0, t_0 + \Delta t]$.

Таким образом, при единичном проезде поездом метка не будет пропущена (вероятность пропуска равна нулю), если $v \cdot (\Delta t + 2\tau) \leq \Delta s$ (подчеркнем, что v — скорость движения поезда **только** в окрестности зоны радиовидимости). В другом случае, при $v \cdot (\Delta t + 2\tau) > \Delta s$, вероятность пропуска превышает нулевое значение. Метка будет пропущена с вероятностью, равной единице, только при выполнении двух условий: $t_0 - t < \tau$ и $t < t_0 + \Delta t - \frac{\Delta s}{v} + \tau$. Первое условие является очевидным, второе следует из неравенства $(t_0 + \Delta t) - t + \tau > \frac{\Delta s}{v}$, где $\frac{\Delta s}{v}$ —

время пребывания электромагнитного поля антенны ридера в зоне радиовидимости.

Соответственно пропуск метки имеет место, если случайная величина t принимает значение на промежутке

$$\left(t_0 - \tau; t_0 + \Delta t - \frac{\Delta s}{v} + \tau \right).$$

Тогда вероятность пропуска метки (событие A) при фиксированной скорости v может быть вычислена следующим образом:

$$P(A / v = x, \Delta t = y) = \begin{cases} 0, & v < v_0 \\ \frac{\left(t_0 + \Delta t - \frac{\Delta s}{v} + \tau \right) - (t_0 - \tau)}{t_0 + \Delta t}, & v \geq v_0 \end{cases} = \begin{cases} 0, & v < v_0 \\ \frac{\Delta t + 2\tau - \frac{\Delta s}{v}}{t_0 + \Delta t}, & v \geq v_0 \end{cases} \quad (1)$$

где $v_0 = \frac{\Delta s}{\Delta t + 2\tau}$.

При заданном законе распределения f_v случайной величины v вероятность события A при фиксированном Δt определяется интегралом [9]

$$P(A / \Delta t = y) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} P(A / v = x, \Delta t = y) \cdot f_v(x) dx. \quad (2)$$

Из (2) следует, что если $v_0 \geq v_{\max}$ то

$$P(A / \Delta t = y) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} 0 \cdot f_v(x) dx = 0.$$

При условии $v_{\min} < v_0 < v_{\max}$ получим

$$P(A / \Delta t = y) = \int_{v_0}^{v_{\max}} \frac{\Delta t + 2\tau - \frac{\Delta s}{v}}{t_0 + \Delta t} \cdot \frac{1}{v_{\max} - v_{\min}} dv = \frac{\Delta t + 2\tau}{t_0 + \Delta t} \cdot \left(\frac{\Delta v'}{\Delta v} - \frac{v_0}{\Delta v} \cdot \ln \left(\frac{v_{\max}}{v_0} \right) \right),$$

где $\Delta v = v_{\max} - v_{\min}$, $\Delta v' = v_{\max} - v_0$.

Если $v_0 \leq v_{\min}$ то

$$P(A / \Delta t = y) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \frac{\Delta t + 2\tau - \frac{\Delta s}{v}}{t_0 + \Delta t} \cdot \frac{1}{v_{\max} - v_{\min}} dv = \frac{\Delta t + 2\tau}{t_0 + \Delta t} \cdot \left(1 - \frac{v_0}{\Delta v} \cdot \ln \left(\frac{v_{\max}}{v_{\min}} \right) \right).$$

Окончательно получим

$$P(A / \Delta t = y) = \begin{cases} \frac{\Delta t + 2\tau}{t_0 + \Delta t} \cdot \left(1 - \frac{v_0}{\Delta v} \cdot \ln \left(\frac{v_{\max}}{v_{\min}} \right) \right), & v_0 \leq v_{\min} \\ \frac{\Delta t + 2\tau}{t_0 + \Delta t} \cdot \left(\frac{\Delta v'}{\Delta v} - \frac{v_0}{\Delta v} \cdot \ln \left(\frac{v_{\max}}{v_0} \right) \right), & v_{\min} < v_0 < v_{\max} \\ 0, & v_0 \geq v_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

Из равенства $v_0 = \frac{\Delta s}{\Delta t + 2\tau}$ следует $\Delta t = \frac{\Delta s}{v_0} - 2\tau$. Полагая, что Δt имеет нормальное распределение с параметрами $a = 40$ мс и $\sigma = 4$ мс, получим следующую формулу для вероятности события A :

$$P(A) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \frac{y+2\tau}{t_0+y} \times \left(\frac{v_{\max} - \frac{\Delta s}{y+2\tau}}{\Delta v} - \frac{\Delta s}{\Delta v \cdot (y+2\tau)} \cdot \ln \left(\frac{v_{\max} \cdot (y+2\tau)}{\Delta s} \right) \right) \times \exp \left(-\frac{(y-a)^2}{2\sigma^2} \right) dy + \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times \int_{\gamma_2}^{+\infty} \frac{y+2\tau}{t_0+y} \times \left(1 - \frac{\Delta s}{\Delta v \cdot (y+2\tau)} \cdot \ln \left(\frac{v_{\max}}{v_{\min}} \right) \right) \cdot \exp \left(-\frac{(y-a)^2}{2\sigma^2} \right) dy, \quad (4)$$

где $\gamma_1 = \frac{\Delta s}{v_{\max}} - 2\tau$, $\gamma_2 = \frac{\Delta s}{v_{\min}} - 2\tau$.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В графической форме результаты вычислений с подстановкой исходных данных приведены на рис. 2. Полученные значения соответствуют наблюдениям за работой СБПП на перегонах 4-й линии Петербургского метрополитена. Согласно результатам наблюдений, вероятность пропуска меток при времени их сканирования, равном 1 с, составляет $1,2 \cdot 10^{-4}$ (эта величина получена путем обработки контрольно-диагностических данных аппаратуры СБПП).

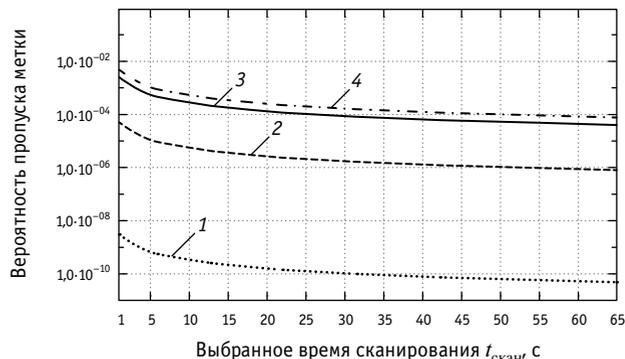


Рис. 2. Вероятности пропуска меток в зависимости от времени сканирования на различных скоростях: 1 — 60 км/ч; 2 — 65 км/ч; 3 — 70 км/ч; 4 — 75 км/ч

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования (см. рис. 2) позволяют сделать вывод о том, что при увеличении времени сканирования метки ридером от 1 с до возможного значения 65 с вероятность пропуска меток снижается примерно на два порядка для максимально допустимых в метрополитене скоростей движения поездов. Данная рекомендация дает возможность повысить надежность взаимодействия ридера с метками до приемлемого уровня, причем для ее реализации потребуется лишь незначительная простейшая корректировка программного обеспечения контроллера СБПП.

Литература

1. Костроминов А. М., Крючкова Т. В. Регрессионная модель зоны радиовидимости для системы бесконтактной привязки к пути подвижного состава метрополитена // Транспорт Урала. 2012. № 3 (34). С. 49–53. ISSN 1815–9400.
2. Костроминов А. М., Крючкова Т. В., Королев М. Ю. Алгоритм функционирования системы управления движением электроподвижного состава в метрополитене на базе RFID-технологии // Известия ПГУПС. 2014. № 2. С. 42–48. ISSN 1815–588X.
3. Контроль состояния ридер-антенного тракта аппаратуры СБПП в условиях электродепо метрополитена / А. М. Костроминов, С. А. Рахманин, Б. О. Смирнов, О. Н. Тюляндин // Известия ПГУПС. 2016. Т. 13. № 2 (47). С. 180–186. ISSN 1815–588X.
4. Применение RFID-технологий в системе автоведения поездов метрополитена / А. М. Костроминов, М. Ю. Королев, В. В. Гаврилов, Т. В. Крючкова // Известия ПГУПС. 2009. № 3. С. 91–97. ISSN 1815–588X.

References

1. Kostrominov A. M., Kryuchkova T. V. Regressionnaya model' zony radiovidimosti dlya sistemy beskontaktnoy privyazki k puti podvizhnogo sostava metropolitena [Regression model of tags radio visibility zone for the system of non-contact binding to the track of underground rolling stock] // Transport Urala. 2012. № 3 (34). S. 49–53. ISSN 1815-9400.
2. Kostrominov A. M., Kryuchkova T. V., Korolev M. Yu. Algoritm funktsionirovaniya sistemy upravleniya dvizheniem elektropodvizhnogo sostava v metropolitene na baze RFID-tekhnologii [Operational algorithm for the traffic management system of metro electric stock based on RFID-technology] // Izvestiya PGUPS. 2014. № 2 (39). S. 42–48. ISSN 1815-588X.
3. Kontrol' sostoyaniya rider-antennogo trakta apparatury SBPP v usloviyakh elektrodepo metropolitena [Control of reader-antenna link of SNCBT equipment in the conditions of metro depot] / A. M. Kostrominov, S. A. Rakhmanin, B. O. Smirnov, O. N. Tyulyandin // Izvestiya PGUPS. 2016. T. 13. № 2 (47). S. 180–186. ISSN 1815-588X.
4. Primeneniye RFID-tekhnologiy v sisteme avtovedeniya poezdov metropolitena [Application of RFID-technologies in the system of auto-con-



5. Дшхунян В. Л., Шаньгин В. Ф. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты. М. : ООО «Издательство АСТ» ; Издательство «НТ Пресс», 2004. 695 с.
6. Dobkin D. M. The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice. Newton, MA, USA : Newnes, 2007. 504 p.
7. Finkenzeller K. RFID Handbook. Fundamental and Applications in Contactless Smart Cards and Identification /2nd ed. Chichester, West Sussex, England : Willey, 2003. 427 p.
8. GS 1 EPCglobal Inc. — EPCTM Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, 2015 [Электронный ресурс]. URL: http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf (дата обращения: 11.04.2016).
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / 4-е изд. М. : Наука, 1969. 576 с.

- duct of metro trains] / A. M. Kostrominov, M. Yu. Korolev, V. V. Gavrilov, T. V. Kryuchkova // Izvestiya PGUPS. 2009. № 3. S. 91–97. ISSN 1815-588X.
5. Dshkhunyan V. L., Shan'gin V. F. Elektronnaya identifikatsiya. Beskontaktnye elektronnye identifikatory i smart-karty [Electronic identification. Contactless electronic identifiers and smart cards]. М. : ООО «Izdateľ'stvo AST» ; Izd-vo «NT Press», 2004. 695 s.
6. Dobkin D. M. The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice. Newton, MA, USA : Newnes, 2007. 504 p.
7. Finkenzeller K. RFID Handbook. Fundamental and Applications in Contactless Smart Cards and Identification /2nd ed. Chichester, West Sussex, England : Willey, 2003. 427 p.
8. GS1 EPCglobal Inc. — EPCTM Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, 2015 [Electronic resource]. URL: http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf (access date: 11.04.2016).
9. Venttsel' E. S. Teoriya veroyatnostey / 4-e izd. [Probability theory / 4th ed.]. М. : Nauka, 1969. 576 s.

УДК 629.4.01

Александр Васильевич Смольянинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ И ПАРАМЕТРОВ ПОЛУВАГОНОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ

Alexander Vasiliiyevich Smolyaninov, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Analysis of structures and parameters of open wagons used for heavy traffic

Аннотация

Появление на железных дорогах России паровозов с силой тяги на сцепном устройстве 8,7–9,5 т дало возможность водить поезда весом более 1,5 тыс. т. В то время вагонный парк состоял из нормальных двухосных вагонов, позволявших формировать составы весом до 1200 т. В целях повышения веса поезда было принято решение о создании четырехосных большегрузных вагонов. В последующие годы эффективность вагонов достигалась повышением их грузоподъемности (при ограничениях осевой нагрузки) за счет увеличения числа осей — появились шести- и восьмиосные вагоны.

Современная стратегия развития железнодорожного транспорта предполагает повышение веса поезда за счет его удлинения и роста осевых нагрузок четырехосных вагонов, что принципиально отличается от ранее проводимых мероприятий по увеличению провозной способности железных дорог. В связи с этим на вагоностроительных заводах стремятся создавать конструкции вагонов, позволяющие реализовывать заданную осевую нагрузку в ограниченных линейных размерах.

Например, проведены опытные испытания тяжеловесных поездов с четырехосными полувагонами, реализующими нагрузку от оси на рельсы 27 тс при расчетной 25 тс. Кроме того, на участке Качканар — Смычка Свердловской железной дороги проходят комплексные испытания по воздействию на путь и ИССО опытного поезда, сформированного из полувагонов производства Тихвинского вагоностроительного завода (ТВСЗ) с осевой нагрузкой 27 тс.

Ключевые слова: вагон, грузоподъемность, вес поезда, погонная нагрузка, провозная способность, осевая нагрузка, тяжеловесное движение.

Summary

The appearance on the Russian railways of engines with traction power on the coupling device of 8.7–9.5 tons made it possible to drive trains weighing more than 1,500 tons. At that time the wagons fleet consisted of normal two-axle wagons allowing the formation of trains weighing up to 1200 tons. In order to increase the weight of the train, it was decided to create four-axle heavy-duty wagons. In subsequent years, the efficiency of wagons was achieved by increasing their carrying capacity (with axial load limitations) by increasing the number of axles — appeared six- and eight-axle wagons.

The modern strategy for the development of railway transport presupposes an increase in the weight of the train due to its lengthening and the growth of axle loads of four-axle wagons, which is fundamentally different from earlier measures to increase the carrying capacity of railways. In this connection, in freight car building plants, they are trying to create rail car designs that allow to realize a given axial load in limited linear dimensions.

For example, pilot tests of heavy trains with four-axle open wagons, realizing the load from the axis to the rail of 27 tons at a design 25 tons. Besides, on the Kachkanar — Smychka section of the Sverdlovsk Railway, complex tests are carried out on the impact on the track of an experimental train formed from open wagons produced by the Tikhvin Freight Car Building Plant with an axial load of 27 tons.

Keywords: wagon, capacity, train weight, running load, carrying capacity, axle load, heavy traffic.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-26-30

ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В конце XIX в., а именно в 1890 г., на железные дороги России поступили первые паровозы серии 0 (основной: 0^В — «овечка»; 0^Д — «джойка») производства Коломенского машиностроительного завода. Паровоз имел осевую характеристику 0–4–0 весом 50–55 т и силой тяги на сцепном устройстве 8,7–9,5 тс. Такие паровозы были способны водить поезд весом 1500 т и более, состоявший из 50–60 вагонов. Нормальный русский вагон весом брутто 20 т при грузоподъемности 12,5 т давал возможность сформировать поезд весом 1200 т и общей длиной порядка 470 м, т.е. его «недовес» составлял 300 т. В то же время американский четырехосный крытый вагон грузоподъемностью 41 тс и тарой 21 т, известный русским инженерам, позволял формировать поезд весом 1500 т из 25 вагонов, при этом длина состава была чуть более 320 м. К тому же кроме полной реализации силы тяги паровоза снижалось сопротивление движению, так как число осей составляло 100 единиц против 120, не требовалось удлинять приемоотправочные пути, сокращалась стоимость постройки четырехосного вагона на тонну перевозимого груза и др.

Итогом почти десятилетнего обсуждения стал съезд инженерной службы подвижного состава, объявивший в 1899 г. конкурс на создание лучшей конструкции большегрузного вагона для российского внутреннего сообщения. С 1928 г. завод «Красное Сормово» начал строить четырехосные полувагоны грузоподъемностью 60 тс и тарой 22 т. Этот полувагон стал базовым для производства на Уральском вагоностроительном заводе (УВЗ).

В последующем повышение эффективности вагонов достигалось за счет увеличения их грузоподъемности и особенно погонной нагрузки. При ограниченной допускаемой нагрузке от оси на рельсы (1954 г. — 22 тс/ось) грузоподъемность полувагонов была увеличена за счет большего числа осей, а именно создания шести- и восьмиосных вагонов грузоподъемностью 94 и 125 т соответственно. При этом погонная нагрузка составляла 7,6 и 8,3 тс/м соответственно. С 1967 г. строительство шестиосных вагонов прекратилось, так как более перспективными были признаны восьмиосные конструкции.

Поскольку преимущества таких конструкций подробно проанализированы в работе [1], останавливаться на них не будем. Приведем лишь основной неоспоримый довод в пользу многососных вагонов: а именно то, что погонная нагрузка в 8,3 тс/м (лучшие образцы имели погонную нагрузку 9,42 тс/м) позволяет увеличить массу поезда при всех прочих равных условиях, в том числе и его длине (на той же инфраструктуре), на 35–40 % по сравнению с составом из четырехосных полувагонов и повысить провозную способность железных дорог. Однако по не до конца понятным причинам к настоящему времени выпуск восьмиосных вагонов (цистерн) прекращен.

ТЯЖЕЛОВЕСНОЕ ДВИЖЕНИЕ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ РОССИИ

Освоение растущих перевозок в решающей степени зависит от увеличения провозной и пропускной способности железных дорог, что прежде всего достигается за счет увеличения веса и скорости движения поездов.

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. и материалы краткосрочного стратегического развития предусматривают повышение провозной способности магистральных линий путем организации регулярного движения поездов весом 6000–6300 т на основных направлениях сети с постепенным увеличением веса поезда до 9000 т [2].

На сегодняшний день в качестве основных направлений тяжеловесного движения определены Кузбасс — Северо-Запад, Кузбасс — Центр, Кузбасс — Юг (максимальная масса поездов 9000 т) и Кузбасс — Дальний Восток (предельный вес грузового поезда будет увеличен до 7100 т) [3]. Нарастить массу поезда предполагается за счет использования вагонов с повышенной грузоподъемностью и увеличения их количества в одном составе.

В СТО РЖД 1.07.002–2010 устанавливаются требования к объектам инфраструктуры исходя из условия соблюдения требований к формированию поезда повышенного веса и/или длины, т.е. такой поезд должен быть сформирован из четырехосных вагонов с осевой нагрузкой до 25 тс (245,18 кН) и погонной нагрузкой до 8,2 т/м (80,42 кН/м) [4].

Следует отметить, что в Правилах технической эксплуатации [5] тяжеловесным называют «грузовой поезд, масса которого для соответствующих серий локомотивов на 100 тонн и более превышает установленную графиком движения весовую норму на участке следования этого поезда». С другой стороны, Международная ассоциация тяжеловесного движения определяет тяжеловесное движение как комплекс технологий для организации грузовых перевозок с обращением поездов массой более 5000 т при осевой нагрузке свыше 25 тс [6]. Такая формулировка исходит из назначения тяжеловесного движения: стремление перевести как можно больше однородного насыпного груза при минимизации времени перевозочного цикла и себестоимости перевозок, включая погрузку, транспортировку и разгрузку, а также содержание инфраструктуры и подвижного состава.

Сегодня также используется словосочетание «длинносоставный поезд», под которым понимают поезд длиной, превышаю-

щей нормативную для данного участка более чем на 1 условный вагон. При этом такие поезда могут быть традиционного формирования, т.е. с числом осей более 350, либо соединенными из двух или более сцепленных между собой грузовых поездов с действующими локомотивами в голове каждого поезда.

По данным [6], к середине 2016 г. на направлениях Кузбасс — порты Северо-Запада, Кузбасс — Центр организовано движение поездов весом 8000 и 9000 т, а на восточном полигоне — весом 7100 т.

С 2014 г. на участке Ковдор — Пинозеро — Мурманск (протяженность 373 км) Октябрьской железной дороги организовано подконтрольное тяжеловесное движение по доставке продукции Ковдорского ГОКа в порт Мурманск. Поезда формировались из однородных вагонов с осевой нагрузкой 23,5, 25 и 27 тс массой от 2000 до 12000 т. Осевая нагрузка 27 тс реализовывалась за счет перегруза полувагонов модели 12-2123, имеющих расчетную нагрузку 25 тс (рис. 1). Скорость движения грузовых поездов не превышала 60 км/ч, что соответствует рабочим скоростям движения грузовых поездов на «тяжеловесных ходах». Степень влияния увеличения осевой нагрузки вагонов на накопление расстройств пути определялась уровнем вертикальных сил, действующих на рельс. Среднее значение вертикальных сил составило 12,36 тс (при $p_0 = 23,5$ тс); 13,43 тс (при $p_0 = 25$ тс); 14,47 тс (при $p_0 = 27$ тс). Полные результаты подконтрольных испытаний приведены в работе [7].



Рис. 1. Полувагон модели 12-2123 (ЗАО «Промтрактор-Вагон»)

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ТЯЖЕЛОВЕСНОЕ ДВИЖЕНИЕ

В табл. 1 и 2 приведены параметры полувагонов, реализующих тяжеловесное движение на рассматриваемых полигонах железных дорог общего пользования.

Следует отметить, что полувагоны с осевой нагрузкой 23,5 тс составляют основную часть вагонного парка России. Важнейшим прогрессивным решением является увеличение объема кузова за счет увеличения высоты стен на 305 мм (2365 мм у модели 12-132 против 2060 мм у модели 12-119). Что касается полувагонов с осевой нагрузкой 25 тс, то они при прочих равных условиях позволяют повысить грузоподъемность на 6 т. Однако при сохранении объема кузова 88 м³ удельный объем составляет 1,17 м³/тс, что недостаточно для реализации трафаретной грузоподъемности при перевозке угля. Поэтому следующий этап — это доведение объема кузова до 94–95 м³ в том же габарите (переход от модели 12-196 к модели 12-196-02) (рис. 2а).

Таблица 1

Параметры полувагонов с нагрузкой от оси на рельсы 23,5 тс

Нагрузка от оси на рельсы, кН (тс)	230,54 (23,5)					
Модель полувагона	12-141 (УВЗ)	12-132 (УВЗ)	12-132-03 (УВЗ)	12-296-01 (АВЗ)	12-9761 (ТВСЗ)	12-9833 (ТВСЗ)
Специализация вагона	Универсальный					
Грузоподъемность, тс	71	70	70	70	69,5	71,5
Объем кузова, м ³	77	88	88	83	88	92,0
Удельный объем кузова, м ³ /тс	1,08	1,26	1,26	1,114	1,27	1,29
Погонная нагрузка брутто, тс/м	6,75	6,75	6,75	6,71	6,75	6,75
Длина по осям сцепления, мм	13920	13920	13920	13920	13920	13920
Тара, т	23	24	24	24	23,5–24,5	21,9–22,5
Габарит по ГОСТ 9238–2013	0-ВМ	1-ВМ	1-ВМ	1-Т	1-ВМ	1-ВМ
Модель тележки по ГОСТ 9246–2013	18-100, тип 2	18-100, тип 2	18-578, тип 2	18-100М, тип 2	18-9810, тип 2	18-9810, тип 2
Срок службы, лет	22	22	22	22	22	22

Таблица 2

Параметры полувагонов с нагрузкой от оси на рельсы 25 и 27 тс

Нагрузка от оси на рельсы, кН (тс)	245,25 (25)						265 (27)
Модель полувагона	12-196-01/02 (УВЗ)	12-5190, с глухим кузовом (УВЗ)	12-2142 (АВЗ)	12-9853 (ТВСЗ)	12-9869, с глухим кузовом (ТВСЗ)	12-2123 («Промтрактор-Вагон»)	12-9548-01 (ОВК, ТВСЗ)
Специализация вагона	Универсальный						
Грузоподъемность, тс	75/75	77	75	75	77	76	83
Объем кузова, м ³	88/94	95	94	88	92	89	108
Удельный объем кузова, м ³ /тс	1,17/1,25	1,23	1,253	1,17	1,19	1,17	1,3
Погонная нагрузка брутто, тс/м	7,183	7,183	7,183	7,183	7,183	8,26	7,76
Длина по осям сцепления, мм	13920	13920	13920	13920	13920	12100	13920
Тара, т	25,5–26,5, 24–25	22,5	24,5–25	24–25	22–23	23–24	25
Габарит по ГОСТ 9238–2013	1-Т	1-ВМ	1-ВМ	1-ВМ	1-ВМ	Т _{пр}	Т _{пр}
Модель тележки по ГОСТ 9246–2013	18-194-1, тип 3	18-194-1, тип 3	18-194-1, тип 3	18-9855, тип 3	18-9855, тип 3	18-9800, тип 3	18-6863, тип 4
Срок службы, лет	32	32	32	32	32	22	40



Рис. 2. Лучшие образцы современных полувагонов: а — модель 12-196-02 (УВЗ); б — модель 12-9548 (ТВСЗ)

Полувагон модели 12-2123 производства ЗАО «Промтрактор-Вагон» (см. табл. 2) имеет параметр погонной нагрузки 8,26 тс/м. Такое увеличение получено за счет применения габарита $T_{пр}$, что позволило уменьшить линейные размеры вагона по базе (7880 мм против 8650 мм) и осям сцепления (12100 мм против 13920 мм). Этот параметр лучший среди всех рассматриваемых и позволяет при той же длине поезда иметь на 15 % больше груза. Снижение тары вагона при одновременном увеличении его грузоподъемности достигается в конструкциях с глухим кузовом (модели 12-5190 и 12-9869).

Материалы научно-технического совета ОАО «РЖД» [8] предусматривают проведение подконтрольной эксплуатации полувагонов с осевой нагрузкой 27 тс модели 12-9548 (см. табл. 2). Полувагон имеет объем кузова 108 м³, что обеспечено за счет применения габарита $T_{пр}$. Нормированная величина погонной нагрузки 8,2 тс/м может быть достигнута за счет снижения тары вагона, как в лучших образцах аналогичных конструкций (см. рис. 2б).

С июня 2017 г. на участке Смычка — Качканар Свердловской железной дороги в составе поездов начали курсировать первые 72 вагона с повышенной нагрузкой на ось 27 тс. Испытания проводятся для получения объективной информации о состоянии инфраструктуры: воздействие вагонов на путь, земляное полотно, искусственные сооружения, в том числе мосты. В ходе подконтрольной эксплуатации будет отработана технология содержания пути в условиях использования таких вагонов. Также будет проведен анализ ходовых и динамических характеристик подвижного состава. На первом этапе вагоны проходят обкатку с осевой нагрузкой 23,5 тс и последующим увеличением до 25 тс. В дальнейшем планируется постепенный рост загрузки вагона до номинальной грузоподъемности 83 т.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ МИРА

Важнейшая особенность организации тяжеловесного движения — специализация железной дороги на данный вид деятельности и использование для перевозок однотипного подвижного состава, приспособленного для быстрой погрузки и выгрузки вагонов. Опыт наиболее развитых в этом направ-

лении стран мира показывает (табл. 3) [9], что обычно такие железные дороги предназначены только для грузового движения и на них используются специально спроектированные вагоны для перевозки одного рода груза (руда, каменный уголь).

Проиллюстрируем это на нескольких примерах. Так, на железной дороге FMG (Австралия) к ноябрю 2014 г. осевая нагрузка вагонов была увеличена до 42 тс, а сейчас рассматривается возможность выпуска на линию вагонов с осевой нагрузкой 43,5 тс. Масса тары каждого вагона составляет 23 т, полезный объем — 69 м³. Рост осевой нагрузки объясняется стремлением снизить транспортную составляющую в себестоимости тонны руды. Например, в 2011 г. максимальная цена сухой тонны железной руды достигала 187 долл., в 2015 г. она снизилась до 51,5 долл. и, по оценке финансовых аналитиков, к 2018 г. может опуститься до 38 долл.

В этом же регионе для железной дороги Roy Hill китайская корпорация CSR поставила 1196 вагонов с осевой нагрузкой 40 тс и полезным объемом кузова 70 м³, опирающегося на тележки с регулируемой подвеской.

На железной дороге Union Pacific (США) для организации тяжеловесного движения использовались стальные открытые вагоны-хопперы и полувагоны грузоподъемностью 90,7 т с осевой нагрузкой 25 тс. После появления вагонов из алюминиевых сплавов с массой тары 18,9 т и грузоподъемностью 110,8 т была реализована нагрузка от оси на рельсы 32,425 тс.

ВЫВОДЫ

1. Руководство ОАО «РЖД» считает, что развитие тяжеловесного движения — это взаимосвязанный комплекс вопросов по подготовке инфраструктуры, подвижного состава, построению эффективной технологии перевозочного процесса, что в конечном счете позволит увеличить объем перевозимых грузов. Альтернатива решению этой задачи только одна — осваивать прогнозируемый объем перевозок за счет значительных вложений в развитие инфраструктуры. Поэтому именно повышение веса поезда — наиболее выгодный вариант не только для компании, но и для российской экономики в целом [8].

2. Повышение веса поезда будет достигаться за счет увеличения нагрузки от оси на рельсы и за счет увеличения его длины.

Таблица 3

Некоторые сведения о мировом тяжеловесном движении

Страна	Железная дорога	Ширина колеи, мм	Специализация железной дороги	Протяженность, км	Перевезено грузов, млн т брутто/год	Масса поезда, тыс. т	Число вагонов	Нагрузка от оси на рельсы, тс
Австралия	Пилбара, FMG	1435	Специализированная (железная руда)	256	58	38,4	240	40
США	Union Pacific	1435	Специализированная	201	376	16,5	120	32,4
Бразилия	CVRD/EFC (Каражас — Сан-Луис)	1600	Специализированная (железная руда)	892	60	25,5	206	31,5
ЮАР	Transnet (Сишен — Салдьян-Бей)	1067	Специализированная	860	46,2	41,0	342	30
Россия	РЖД (участки направления Кузбасс — Находка)	1520	Смешанное движение: а) уголь и др. грузы; б) грузовые и пассажирские перевозки	5900	80	6,3 9,0	70 100	23,5

Литература

1. Параметры и конструктивное исполнение высокопроизводительного подвижного состава / А. В. Смольянинов, В. Н. Филиппов, И. В. Козлов, А. Н. Давыдов // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 46–49. ISSN 1815–9400.
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р [Электронный ресурс]. URL: http://strategy2030.midural.ru/sites/default/files/files/strategiya_razvitiya_zheleznodorozhnogo_transporta_v_rossiyskoy_federacii_do_2030_goda.pdf (дата обращения: 04.10.2017).
3. ОАО «РЖД» скорректировало программу развития тяжеловесного движения [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gudok.ru/freighttrans/?ID=1302199> (дата обращения: 04.10.2017).
4. СТО РЖД 1.07.002–2010. Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 25.11.2010 г. № 2412р.
5. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России от 21.12.2010 г. № 286, в ред. приказов Минтранса России от 04.06.2012 г. № 162, от 13.06.2012 г. № 164. Екатеринбург : Урал Юр Издат, 2013.
6. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / Пер. с англ. ; под ред. С. М. Захарова и В. М. Богданова. М. : Интекст, 2002. 408 с.
7. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой / В. В. Третьяков, И. Б. Петропавловская, В. О. Певзнер и др. // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 4. С. 233–238. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-233-238>. ISSN 2223–9731.
8. Материалы заседания Научно-технического совета ОАО «Российские железные дороги» от 27.07.2016 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://yadi.sk/d/Odt40jW5thtw9> (дата обращения: 04.10.2017).
9. Захаров С. М., Шенфельд К. П. Развитие тяжеловесного движения в мире // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 4. С. 9–17. ISSN 2223–9731.

References

1. Parametry i konstruktivnoe ispolnenie vysokoproizvoditel'nogo podvizhnogo sostava [Parameters and design of high-performance rolling stock] / A. V. Smolyaninov, V. N. Filippov, I. V. Kozlov, A. N. Davydov // Transport Urala. 2013. № 1 (36). S. 46–49. ISSN 1815-9400.
2. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda : rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 17.06.2008 g. № 877-r [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 : Order of the Government of the Russian Federation on 17.06.2008 No. 877-r]. [Electronic resource]. URL: http://strategy2030.midural.ru/sites/default/files/files/strategiya_razvitiya_zheleznodorozhnogo_transporta_v_rossiyskoy_federacii_do_2030_goda.pdf (access date: 04.10.2017).
3. ОАО «РЖД» skorrektirovalo programmu razvitiya tyazhelovesnogo dvizheniya [JSC Russian Railways adjusted the heavy weight development program]. [Electronic resource]. URL: <http://www.gudok.ru/freighttrans/?ID=1302199> (access date: 04.10.2017).
4. СТО «РЖД» 1.07.002-2010. Infrastruktura zheleznodorozhnogo transporta na uchastkakh obrascheniya gruzovykh poezdov povyshennogo vesa i dliny. Tekhnicheskie trebovaniya : utv. rasporyazheniem ОАО «РЖД» ot 25.11.2010 g. № 2412r [Infrastructure of railway transport on the areas of circulation of freight trains of increased weight and length. Technical requirements : approved by the order of JSC Russian Railways on 25.11.2010 No. 2412r].
5. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii : utv. prikazom Mintransa Rossii ot 21.12.2010 g. № 286, v red. prikazov Mintransa Rossii ot 04.06.2012 g. № 162, ot 13.06.2012 g. № 164 [Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation : approved by the order of the Ministry of Transport of Russia on 21.12.2010 No. 286, in red. orders of the Ministry of Transport of Russia on 04.06.2012 No. 162, on 13.06.2012 No. 164]. Ekaterinburg : Ural Yur Izdat, 2013.
6. Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya koleasa i rel'sa [Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues] / Per. s angl. ; pod red. S. M. Zakharova i V. M. Bogdanova. M. : Intekst, 2002. 408 s.
7. Vozdeystvie na put' vagonov s povyshennoy osevoy nagruzkoy [Impact on railway track of cars with increased axle load] / V. V. Tretyakov, I. B. Petropavlovskaya, V. O. Pevzner i dr. // Vestnik VNIIZhT. 2016. T. 75. № 4. S. 233–238. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-233-238>. ISSN 2223-9731.
8. Materialy zasedaniya Nauchno-tekhnicheskogo soveta ОАО «Rossiyskie zheleznye dorogi» ot 27.07.2016 g. [Materials of the meeting of the Scientific and Technical Council of JSC Russian Railways on 27.07.2016]. [Electronic resource]. URL: <https://yadi.sk/d/Odt40jW5thtw9> (access date: 04.10.2017).
9. Zakharov S. M., Shenfel'd K. P. Razvitie tyazhelovesnogo dvizheniya v mire [Global development of heavy-haul railway traffic] // Vestnik VNIIZhT. 2013. № 4. S. 9–17. ISSN 2223-9731.

УДК 658.5.011

Дмитрий Андреевич Банников, аспирант кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Александр Геннадьевич Галкин, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Нина Фридриховна Сирина, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОРГАНИЗАЦИИ СЕРВИСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПАССАЖИРСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Dmitriy Andreyevich Bannikov, postgraduate student, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexander Gennadyevich Galkin, DSc in Engineering, Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nina Fridrikhovna Sirina, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Calculation algorithm of organization of service technical maintenance and repair of passenger rolling stock

Аннотация

В настоящее время научное обеспечение системы технического обслуживания и ремонта не позволяет достаточно точно оценить готовность пассажирского подвижного состава (ППС) к эксплуатации. В том числе отсутствует возможность прогнозировать готовность ППС при установленных лимитах финансирования, а также уровень пассажиропотоков и интенсивность отказов.

В статье предлагается алгоритм математического моделирования, позволяющий оценить параметры, которые характеризуют качество сервисного технического обслуживания и ремонта ППС: определение мест дислокации сервисных центров, коэффициент исправности пассажирского подвижного состава, показатели вероятности эффективности эксплуатации, затраты на техническое обслуживание и ремонт. При разработке алгоритма система сервисного технического обслуживания и ремонта представлена как многоканальная система массового обслуживания.

Ключевые слова: алгоритм расчета, математическое моделирование, модель сервисного обслуживания, оптимизационная модель, интенсивность отказов, интенсивность восстановления.

Summary

The current scientific support of the system of service technical maintenance and repair does not provide precise estimates of the operational readiness of the passenger rolling stock (PRS). There lacks an opportunity to forecast the level of operational readiness of PRS by current financing limits, passenger traffic and failure rate.

The algorithm of mathematic modeling which allows estimating the parameters, which characterize the quality of the service technical maintenance and repair of PRS: allocation of service centers, readiness ratio of the passenger rolling stock, probability indicators of operational efficiency, cost of technical maintenance and repair are submitted in the article. To create an algorithm, the system of service maintenance and repair is presented as multichannel system of mass service.

Keywords: calculation algorithm, mathematic modeling, service maintenance model, optimisation model, failure rate, repair rate.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-31-35

Математическое моделирование позволяет решать задачи различной сложности, просчитывая многообразие процесса с различным количеством элементов объекта, и эффективно применяется в исследованиях систем сложной структуры для поиска оптимального решения [1–3].

Вместе с тем существующие логистические модели и методики управления техническими системами [4–6] не используют комплексную оценку эффективности управления и не увязаны в одну модель функционирования системы.

Следует отметить, что наиболее широко математическое моделирование используется в теории массового обслуживания. Причем в последние годы область его применения выходит за рамки задач, связанных с «обслуживающими организациями» в буквальном смысле слова [7]. Соответственно разработка оптимального алгоритма расчета сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава (ППС), основанного на теории массового обслуживания, позволит еще до начала строительства сервисных центров или реконструкции существующих предприятий оценить показатели эффективности их работы: проанализировать вводимые изменения, их влияние на систему технического обслуживания и ремонта, а также определить рациональное место проведения как ремонта, так и технического обслуживания ППС.

Формализованную запись модели сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава представим как

$$M(K_{\Gamma}, \Psi) = C_0, \quad (1)$$

где $K_{Г}$ — коэффициент готовности ППС;

Ψ — модель, описывающая систему технического обслуживания и ремонта ППС;

$C_{О}$ — стоимость технического обслуживания и ремонта ППС.

Стоимость технического обслуживания и ремонта находится в прямой зависимости от стоимости закупочной цены ППС. Следовательно, совокупные затраты на техническое обслуживание и ремонт пассажирского подвижного состава, эксплуатируемого по определенным сценариям (параметры системы технического обслуживания и ремонта, материально-технического снабжения, интенсивность отказов, наработка на отказ и т.д.), должны быть сведены к минимуму.

Тогда постановка задачи принимает вид

$$M[(K_{Г}, L, P_m, T, V, P_t) + C_{ПР}] \rightarrow \min, \quad (2)$$

где L — расположение сервисного центра;

P_m — поставщики расходных материалов;

T — способы транспортировки;

V — вид пассажирского подвижного состава;

P_t — статистические данные пассажиропотока;

$C_{ПР}$ — стоимость приобретения ППС.

Предлагаемая модель организации сервисного технического обслуживания и ремонта ППС установит взаимосвязь между требуемой готовностью подвижного состава и необходимыми для этого затратами. Структура модели представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура модели сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава

Поскольку состав входных данных сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава имеет сложную структуру и достаточно велик, в качестве таковых используются:

статистические данные об интенсивности отказов узлов и частей пассажирского подвижного состава;

данные, содержащие сведения о видах технического обслуживания и ремонта, а также информацию о распределении уровня и вида работ.

Состав объектов информационной модели сервисного технического обслуживания (рис. 2) включает в себя базу данных компании — владельца подвижного состава (выделено зеленым цветом) и базу данных сервисного центра (выделено синим цветом).

Обобщенная схема разрабатываемого алгоритма (рис. 3) представляет собой взаимодействие имитационного моделирования и оптимизационной модели с получением оптимального решения.

Рассмотрим алгоритм моделирования системы сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава (рис. 4) при заданном интервале T (времени моделирования). Установим, что состояние моделируемой системы подвергается проверке в промежутке Δt . Интенсивность отказов λ характеризуется случайной последовательностью.

Алгоритм моделирования содержит следующие блоки и циклы.

Первый цикл — блоки 2–3, 8–9, управляющие последовательностью моделирования системы сервисного технического обслуживания и ремонта. В этом цикле происходит поиск оптимального варианта параметров системы.

Второй цикл (промежуточный) — блоки 3–8. В этом цикле идет многократное повторение расчета, что позволяет после статистической обработки оценивать характеристики модели.

Третий цикл — блок 7, охватывающий предыдущий цикл. Он является основным и реализует процесс вычисления функционирования модели на интервале времени T .

Четвертый цикл — блок 10, проверяет соответствие полученных оценок элементов системы сервисного технического обслуживания и ремонта, а также рассматривает, найден ли наилучший вариант системы.

Формирование алгоритма моделирования характеризуется возможностью организации различных уровней ремонта и технического обслуживания для разнообразных видов состояния вагона (рис. 5), а также требуемой производственной мощностью, технико-экономическими показателями выполнения технического обслуживания и ремонта.

Функция интенсивности отказов представляет собой импульсную функцию с параметрами η и τ , интенсивность потока пассажирских вагонов, подлежащих ремонту компанией-изготовителем, имеет следующий вид:

$$\lambda_S(t) = \alpha \cdot \lambda + \eta \cdot \delta(t - k\tau), \quad (3)$$

где α — доля подвижного состава, ремонтируемого компанией-изготовителем (компанией-оператором);

λ — общая интенсивность отказов;

$\delta(t - k\tau)$ — импульсная функция.

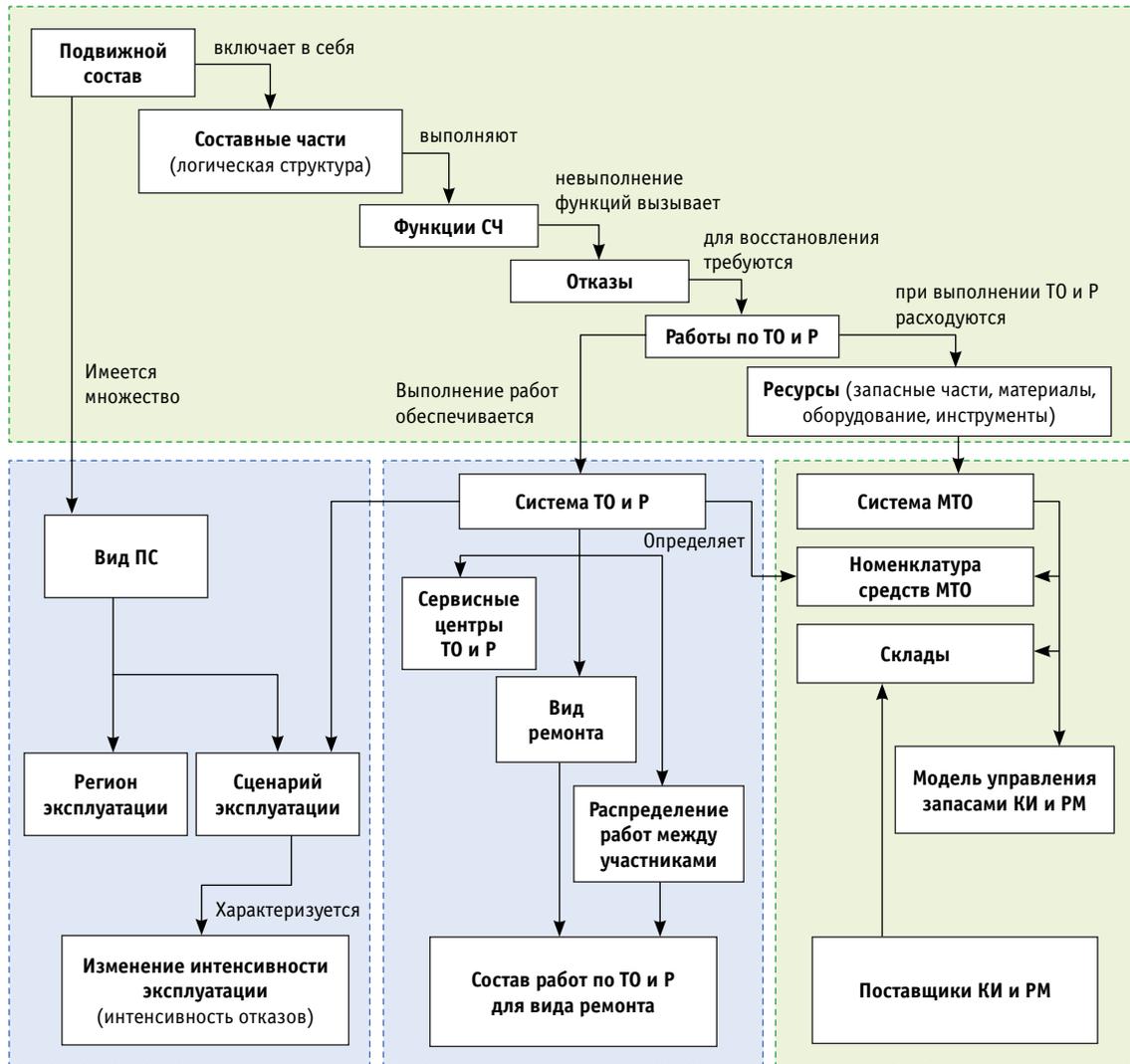


Рис. 2. Структура информационной модели сервисного технического обслуживания и ремонта

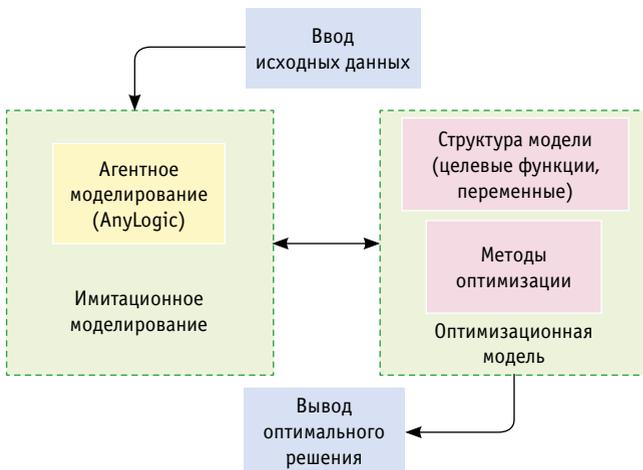


Рис. 3. Обобщенная схема алгоритма

Динамика вероятностей $P_k(t)$ состояний системы сервисного технического обслуживания и ремонта описывается системой дифференциальных уравнений [2]

$$\begin{cases} \frac{dP_k}{dt} = -(\lambda + k\mu)P_k + \lambda P_{k-1} + (k+1)\mu P_{k+1} \\ 0 \leq k \leq n \\ \frac{dP_k}{dt} = -(\lambda + k\mu)P_k + \lambda P_{k-1} + n\mu P_{k+1} \\ 0 \leq k \leq s \end{cases} \quad (4)$$

Для среднего количества пассажирских вагонов, находящихся в различных состояниях системы технического обслуживания и ремонта, система дифференциальных уравнений примет вид

$$\begin{cases} \frac{dn_0(t)}{dt} = -\lambda_{01}n_0(t) + \mu_{10}n_1(t) - \\ -\lambda_{02}n_0(t) + \mu_{20}n_2(t) - \lambda_{03}n_0(t) + \\ + \mu_{30}n_3(t) - \lambda_{04}n_0(t) + \mu_{40}n_4(t) - \\ - \lambda_{05}n_0(t); n_0(0) = N_0; \\ \frac{dn_1(t)}{dt} = \lambda_{01}n_0(t) - \mu_{10}n_1(t); n_1(0) = N_1; \\ \frac{dn_2(t)}{dt} = \lambda_{02}n_0(t) - \mu_{20}n_2(t); n_2(0) = N_2; \\ \frac{dn_3(t)}{dt} = \lambda_{03}n_0(t) - \mu_{30}n_3(t); n_3(0) = N_3; \\ \frac{dn_4(t)}{dt} = \lambda_{04}n_0(t) - \mu_{40}n_4(t); n_4(0) = N_4; \\ \frac{dn_5(t)}{dt} = \lambda_{05}n_0(t); n_5(0) = N_5; \\ n_0(t) + n_1(t) + n_2(t) + n_3(t) + \\ + n_4(t) + n_5(t) = N(t). \end{cases} \quad (5)$$

Функция интенсивности восстановления (ремонта) подвижного состава записывается как

$$\mu(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\bar{T}_p} & , \\ t > t_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

где β — коэффициент увеличения интенсивности восстановления ($\beta \geq 1$);

\bar{T}_p — среднее время ремонта;

t_{\min} — минимальное время ремонта.

При этом минимальное время ремонта определяется типом неисправности подвижного состава, а коэффициент увеличения интенсивности восстановления зависит не только от типа неисправности, но и от условий проведения ремонта ППС [8].

Для расчета нестационарных потоков интенсивность отказов и интенсивность восстановления усредняются на интервале времени T . В данном случае в системе дифференциальных уравнений (5) используются средние значения интенсивности отказов и интенсивности восстановления:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda(t) dt; \quad (7)$$

$$\bar{\mu} = \frac{1}{T} \int_0^T \mu(t) dt. \quad (8)$$

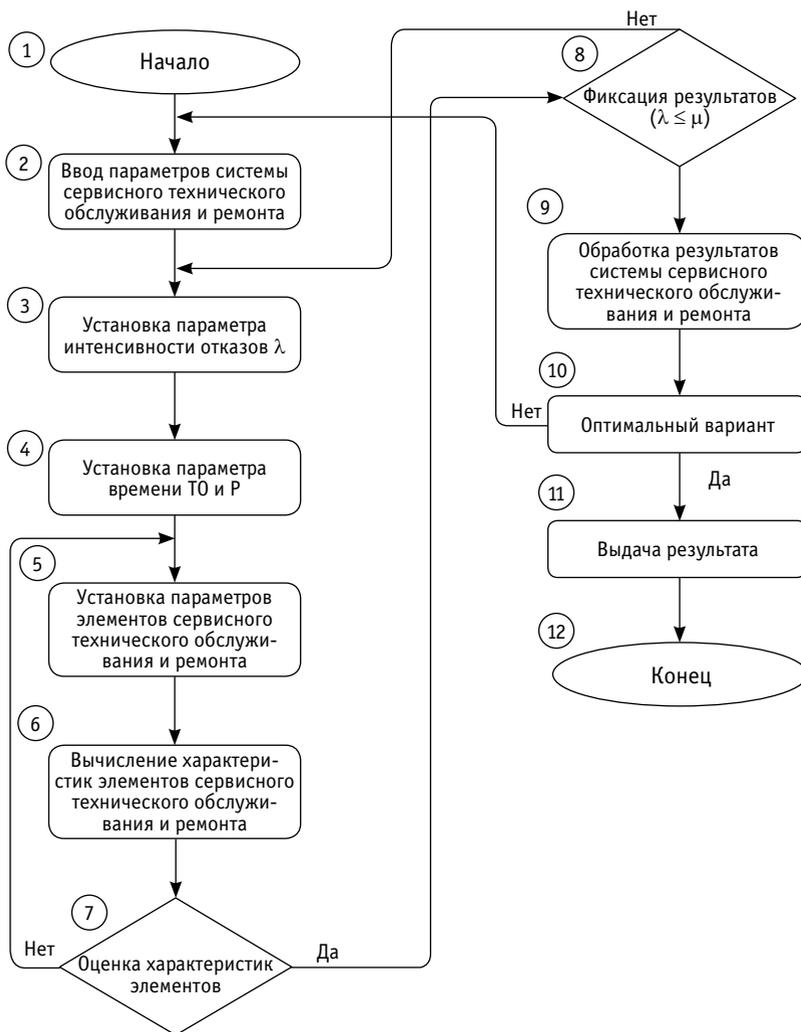


Рис. 4. Алгоритм моделирования системы сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава

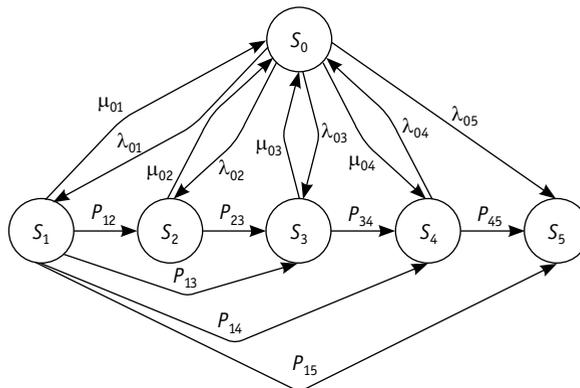


Рис. 5. Граф состояний вагона в системе технического обслуживания и ремонта:

S_0 — исправное работоспособное; S_1 — неисправное работоспособное; S_2 — неработоспособное неисправное; S_3 — предельное, восстанавливаемое при текущем ремонте; S_4 — предельное, восстанавливаемое при деповском и капитальном ремонте; S_5 — предельное невосстанавливаемое; P_i — вероятность состояний вагона; λ — интенсивность отказов; μ — интенсивность восстановления

Для оптимального варианта моделирования системы сервисного технического обслуживания и ремонта предусматривается источник потока заявок (поток интенсивности отказов, плановые виды ремонта ППС), а также поток обслуженных заявок (интенсивность восстановления). В целях достоверности расчетов при моделировании будет осуществляться статистическая обработка данных.

Таким образом, разработанный алгоритм расчета с учетом оптимизационной модели позволит определить изменение затрат на техническое обслуживание и ремонт ППС при внедрении нового решения, а также оценить эффективность сервисного технического обслуживания. Кроме того, он даст возможность выбрать оптимальный вариант работы и упростить моделирование реальной системы.

Литература

1. Сирина Н. Ф. Методологические основы формирования адаптивных механизмов организации вагоноремонтного комплекса : дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2009. 295 с.
2. Сирина Н. Ф., Цыганов В. В. Интегрированные механизмы организации вагоноремонтного предприятия // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM — 2009) : тр. 9-й междунар. конф., 2009. С. 108–110.
3. Сирина Н. Ф. Моделирование управления вагоноремонтным комплексом // Вестник УрГУПС. 2009. № 1–2. С. 12–20. ISSN 2079–0392.
4. Инженерная логистика: логистически-ориентированное управление жизненным циклом продукции : учеб. для вузов / Под ред. Л. Б. Миротина и И. Н. Омел'ченко. М. : Горячая линия-Телеком, 2011. 644 с.
5. Клочков В. В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты : моногр. М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 124 с.
6. Сирина Н. Ф., Юшков М. Е., Галкин А. Г. Интегральная оценка малодействительных железнодорожных линий ОАО «РЖД» как основа эффективного и обоснованного использования их инфраструктуры в транспортной сети региона // Экономика региона. 2015. № 1 (41). С. 270–281. ISSN 2072–6414.
7. Фурина К. О., Осеchkina Т. А. Математическая модель одноканальной системы массового обслуживания с ограниченной очередью // Наука и современность. 2014. № 2 (2). С. 102–109. DOI: 10.17117/ns.2014.02.102. ISSN 2411–2127.
8. Bannikov D. A., Sirina N. F., Smolyaninov A. V. Model of the maintenance and repair system in service maintenance management // IX Int. Sci. Conf. & VI Int. Symposium of Young Researches «Transport Problems' 2017» : Conference Proceedings. Katowice : Silesian University of Technology. Faculty of Transport. 2017. P. 60–65.

References

1. Sirina N. F. Metodologicheskie osnovy formirovaniya adaptivnykh mekhanizmov organizatsii vagonoremontnogo kompleksa: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methodological framework of formation of adaptive mechanisms of rolling stock repair: DSc in Engineering Thesis]. Ekaterinburg, 2009. 295 s.
2. Sirina N. F., Tsyganov V. V. Integrirovannyye mekhanizmy organizatsii vagonoremontnogo predpriyatiya [Integrated mechanisms to get repair plant] // Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta (CAD/CAM/PDM — 2009): tr. 9-y mezhdunar. konf., 2009. S. 108–110.
3. Sirina N. F. Modelirovanie upravleniya vagonoremontnym kompleksom [Modelling of car-repair complex management] // Vestnik UrGUPS. 2009. № 1–2. S. 12–20. ISSN 2079–0392.
4. Inzhenernaya logistika: logisticheski-orientirovannoe upravlenie zhiznennym tsiklom produktsii : ucheb. dlya vuzov / Pod red. L. B. Mirotina i I. N. Omel'chenko [Engineering logistics: logistically oriented management of the product life cycle : a textbook / Ed. by L. B. Mirotin and I. N. Omel'chenko]. M. : Goryachaya liniya-Telekom, 2011. 644 s.
5. Klochkov V. V. CALS-tehnologii v aviatsionnoy promyshlennosti: organizatsionno-ekonomicheskie aspekty : monogr. [CALS-technologies in aviation industry: organizational and economic aspects : a monograph]. M. : GOU VPO MGUL, 2008. 124 s.
6. Sirina N. F., Yushkov M. E., Galkin A. G. Integral'naya otsenka malodeyatel'nykh zheleznodorozhnykh liniy ОАО «RZhD» kak osnova effektivnogo i obosnovannogo ispol'zovaniya ikh infrastruktury v transportnoy seti regiona [Integral assessment of inactive rail lines JSC «Russian Railways» as the basis for effective and reasonable use of their infrastructure in the regional transport network] // Ekonomika regiona. 2015. № 1 (41). S. 270–281. ISSN 2072–6414.
7. Furina K. O., Osechkina T. A. Matematicheskaya model' odnokanal'noy sistemy massovogo obsluzhivaniya s ogranichennoy ochered'yu [A mathematical model of a single-channel queuing system with limited queue] // Nauka i sovremennost'. 2014. № 2 (2). S. 102–109. DOI: 10.17117/ns.2014.02.102. ISSN 2411–2127.
8. Bannikov D. A., Sirina N. F., Smolyaninov A. V. Model of the maintenance and repair system in service maintenance management // IX Int. Sci. Conf. & VI Int. Symposium of Young Researches «Transport Problems' 2017» : Conference Proceedings. Katowice : Silesian University of Technology. Faculty of Transport. 2017. P. 60–65.

УДК 656.073

Александр Эрнстович Александров, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Елена Николаевна Тимухина, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Игорь Александрович Ковалев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЛЬЦЕВЫХ МАРШРУТОВ

Alexander Ernstovich Alexandrov, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Elena Nikolaevna Timukhina, DSc in Engineering, Professor, Head of Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Igor Alexandrovich Kovalev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Optimization model of the transportation process with the use of unit trains

Аннотация

В статье рассматривается вопрос оптимальной организации кольцевых маршрутов с использованием математической модели перевозочного процесса. Предлагается метод решения, основанный на сведении динамической транспортной задачи с задержками к транспортной задаче линейного программирования в сетевой постановке. Снимается ограничение, накладываемое конфигурацией полигона обращения кольцевых маршрутов на период расчета плана.

Ключевые слова: кольцевой маршрут, маршрутизация, автоматизированная система, оптимизационная модель, транспортная задача, динамическая транспортная задача.

Summary

The article deals with the question of the optimal unit trains movement organization at the expense of optimization models of transportation process. The article proposes the method of solution, based on reducing the dynamic transportation problem with delays to the linear programming transportation problem in the network statement, that allows to remove the restriction imposed by the service area structure on a calculation period.

Keywords: unit train, traffic routing, automated system, optimization model, transportation problem, dynamic transportation problem.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-36-39

INTRODUCTION

Traffic routing on the railway transport represents the way of organizing the car flows into trains, reducing the handling of cars in transit at technical stations. A unit train in the organization of car flows is considered as the type of train, corresponding to the method of its formation. Circular traffic routing assumes constant composed train sets turn between stations of loading and unloading. Transportation of bulk cargo by unit trains contributes to a more sustainable supply of consignors by rolling stock, greatly increases the safety of transported cargo, reduces the time for shunting work and preparation of cars for loading. The effectiveness of the organization of unit trains is achieved primarily by reducing handling time at the loading station from the arrival to feeding for loading. Although the mileage of rolling stock is increasing, this form of transportation is often the only possible on condition of ensuring the necessary level of reliability of transport services.

The process of freight transportation by unit trains is characterized by a high degree of irregularity. The affecting factors include:

- non-uniformity of filling requests for transportations;
- complexity of the spatial-temporal structure of the service area;
- not the multiplicity of the length of the service area to the length of loaded and empty trips of unit trains.

The influence of these factors complicates the task of control when the unit trains turn between a dozen of consignors and several dozen of receivers. Based on his own experience and intuition, the dispatcher is unable to plan the selection of the empty and the loaded assignments online.

There is a need to have in circulation the additional number of trains needed to compensate for uneven production and transport processes. To improve operational and economic indicators, the reserve must be reduced. This can be done through effective control. The usual practice of dispatching control in manual mode is to try to select the optimal assignment by turns and separately for each unit train. It is known that this approach does not allow to optimize the process as a whole. In theory and in practice some compromise choice for each unit train will be optimal. This choice will be optimal for all unit trains in the aggregate at a certain time interval. This approach to the problem solution can only be realized using an automated system with the possibility to calculate the plan with the help of optimization mathematical model. The use of mathematical apparatus greatly increases the variety of possible solutions, from which the rational one is chosen. This will allow reasonable decisions to be made in matters of transport service of suppliers and consumers, and to ensure the process of cargo delivery with the minimum cost. A feature of operational control in this area is that the search for the most rational decisions is carried out subject to strict time limits.

MEANINGFUL PROBLEM STATEMENT FEATURES

The variety of transport problem statements is reviewed by many scientists in their studies. Their disadvantages are that loaded and empty trips of unit trains are considered as different problems with different calculation period. The results of the calculation of the previous plans are the original data for the next plans. There is a need of manual linking of such plans with each other. The duration of the planning period is limited by the minimum turnover of the unit train between stations. The limit is imposed by the structure of the service area and available information at the time of calculation.

The proposed statement of the problem:

eliminates the need of manual information transmission between the different phases of the calculation of loaded and empty trips;

removes the limitation imposed by the service area structure on the duration of the calculation.

As a mathematical apparatus we use the dynamic transportation problem with delays, which has found a wide application for the solution of practical problems on the railway transport [1–16]. Statement of the problem in a special way is adapted to the constraints, which allows describing several turns of a unit train for the calculation period. This makes possible to find the optimal plan of the unit trains circulation considering all the elements of their turnover. The result is the timely supply of cargo to consumers, but also the distribution of empty unit trains by the loading points. The following is the most significant part of the mathematical formulation of dynamic transportation problem with delays, which includes functional and balance sheet constraints that describe the conditions of flow conservation.

MATHEMATICAL FORMULATION OF THE PROBLEM

Optimization of traffic flows is solved by minimizing the objective function:

$$\Omega = \sum_{i=1}^9 \Omega_i \rightarrow \min;$$

$$\begin{aligned} \Omega = & \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in \theta_{gs}}^T P_{gs}^{load}(t - \theta_{gs}) \cdot C_{gs}^{load} + \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in \theta_{gs}}^T V_{gs}^{unload}(t - \theta_{gs}) \cdot C_{gs}^{unload} + \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=0}^T X_{gs}^{cargo}(t) \cdot C_{gs}^{cargo} + \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=0}^T X_{gs}^{load.tr}(t) \cdot C_{gs}^{load.tr} + \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=0}^T X_{gs}^{empt.tr}(t) \cdot C_{gs}^{empt.tr} + \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} U_{gs_1 s_2}^{empt.tr}(t) \cdot C_{gs_1 s_2}^{empt.tr} + \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} U_{gs_1 s_2}^{load.tr}(t) \cdot C_{gs_1 s_2}^{load.tr} + \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} H_{gs}(t) \cdot C_{gs}^H + \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} K_{gs}(t) \cdot C_{gs}^K \rightarrow \min, \end{aligned}$$

where $\sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in \theta_{gs}}^T P_{gs}^{load}(t - \theta_{gs}) \cdot C_{gs}^{load}$ — the total cost for loading all types of cargo;

$\sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in \theta_{gs}}^T V_{gs}^{unload}(t - \theta_{gs}) \cdot C_{gs}^{unload}$ — the total cost of unloading all types of cargo;

$\sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=0}^T X_{gs}^{cargo}(t) \cdot C_{gs}^{cargo}$ — the total cost of storing all types of cargo;

$\sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=0}^T X_{gs}^{load.tr}(t) \cdot C_{gs}^{load.tr}$ — the total cost of storing all loaded train sets;

$\sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t=0}^T X_{gs}^{empt.tr}(t) \cdot C_{gs}^{empt.tr}$ — the total cost of storing all the empty train sets;

$\sum_{g \in G} \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} U_{gs_1 s_2}^{empt.tr}(t) \cdot C_{gs_1 s_2}^{empt.tr}$ — total transportation costs of all empty train sets;

$\sum_{g \in G} \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} U_{gs_1 s_2}^{load.tr}(t) \cdot C_{gs_1 s_2}^{load.tr}$ — the total cost of transportation of all loaded train sets;

$\sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} H_{gs}(t) \cdot C_{gs}^H$ — the total cost of producing excessive load;

$\sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} K_{gs}(t) \cdot C_{gs}^K$ — the overall cost of failure to deliver all types of cargo.

Here Ω specifies the total cost of performing the transportation plan. The optimality criterion is the minimum total cost of storage and transportation of loaded and empty train sets, storage costs, loading and unloading of the cargo, failure to supply and under-consumption.

Circular trips of a unit train are described using the balance sheet constraint:

— of the cargo at the loading station

$$(X_{gs}^{cargo}(t) - X_{gs}^{cargo}(t+1)) + a_{gs}(t) - H_{gs}(t) - P_{gs}^{load}(t) = 0;$$

— of the cargo at the unloading station

$$(X_{gs}^{cargo}(t) - X_{gs}^{cargo}(t+1)) - b_{gs}(t) + K_{gs}(t) + V_{gs}^{unload}(t - \theta_{gs}) = 0;$$

— of loaded train sets at the loading station

$$(X_{gs}^{load.tr}(t) - X_{gs}^{load.tr}(t+1)) - \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{load.tr}(t) + P_{gs}^{load}(t - \theta_{gs}) = 0;$$

— of loaded train sets at the unloading station

$$(X_{gs}^{load.tr}(t) - X_{gs}^{load.tr}(t+1)) + \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{load.tr}(t) - V_{gs}^{unload}(t) = 0;$$

— of loaded train sets at the transit station

$$(X_{gs}^{load.tr}(t) - X_{gs}^{load.tr}(t+1)) - \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{load.tr}(t) + \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{load.tr}(t - t_s) = 0;$$

— of empty train sets at the loading station

$$(X_{gs}^{empt.tr}(t) - X_{gs}^{empt.tr}(t+1)) + \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{empt.tr}(t - \theta_{gs_1s_2}) - P_{gs}^{load}(t) = 0;$$

— of empty train sets at the unloading station

$$(X_{gs}^{empt.tr}(t) - X_{gs}^{empt.tr}(t+1)) - \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{empt.tr}(t) + V_{gs}^{unload}(t - \theta_{gs}) = 0;$$

— of empty train sets at the transit station

$$(X_{gs}^{empt.tr}(t) - X_{gs}^{empt.tr}(t+1)) - \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{empt.tr}(t) + \sum_{s \in S} U_{gs_1s_2}^{empt.tr}(t - t_s) = 0.$$

The full set of constraints used in the formulation additionally includes restrictions on nonnegative variables and throughput.

The main differences of the proposed formulation are the following:

full turnover of the unit trains are optimized in a single task; several types of product (cargo, loaded and empty train sets) are used as transported items;

the same node serves as a supplier of one product and the consumer of another.

To the start of loading at the station there must be an empty set and the cargo. In the end of loading a new product — loaded train set — appears. It should be transported to the unloading station. After the arrival it is unloaded, that means the separation of the loaded train set into two products — cargo and empty train set.

Solution method is based on reducing the dynamic transportation problem with delays to the transportation problem in the network statement according to the known algorithm by Ford — Fulkerson [17–20].

CONCLUSION

When using dynamic transportation problem with delays in a circular setting for planning the transportation by unit trains in the dynamics there is no need to select the calculation period and planning periods for suppliers and consumers. The duration of the calculation period is limited to hardware and depends on the dimension of the problem. There is the experience of solving large scale problems — 50,000 variables and 60,000 constraints on a personal computer.

Литература

1. Козлов П. А., Миловидов С. П. Распределительная динамическая транспортная задача с управляемыми задержками в сетевой постановке // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1983. № 5.
2. Козлов П. А., Миловидов С. П. Метод динамического согласования производства и транспорта // Сб. науч. тр. ИКТП. 1984. Вып. 105. С. 156–163.
3. Попов А. Т. Оптимизация взаимодействия технологического железнодорожного транспорта : дис. ... канд. техн. наук. М., 1984. 223 с.

References

1. Kozlov P. A., Milovidov S. P. The distribution of the dynamic transportation problem with controlled delays in the network statement [Raspredelitel'naya dinamicheskaya transportnaya zadacha s upravlyaemymi zaderzhkami v setevoy postanovke] // Proceedings of Academy of Sciences of the USSR. Technical cybernetics. 1983. No. 5.
2. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Method for dynamic coordination of production and transport [Metod dinamicheskogo soglasovaniya proizvodstva i transporta] // Proc. scientific. of Institute of Complex Transport Problems. 1984. Vol. 105. Pp. 156–163.
3. Popov A. T. Optimization of the interaction of the technological railway transport : PhD in Engineering Thesis [Optimizatsiya vzaimodeystviya tekhn-

4. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии : дис. ... д-ра техн. наук. Липецк : ЛПИ, 1986. 377 с.
5. Журавин С. Г. Взаимодействие производственных подразделений и промышленного железнодорожного транспорта в условиях интенсификации : дис. ... канд. техн. наук. М., 1987. 268 с.
6. Трофимов С. В. Выбор оптимальных методов оперативного управления работой промышленного железнодорожного транспорта : дис. ... канд. техн. наук. М., 1990. 201 с.
7. Александров А. Э., Якушев Н. В. Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления // Управление большими системами. 2006. Вып. 12–13. С. 5–14. ISSN 1819-2440.
8. Александров А. Э. Математическая модель в автоматизированной системе управления согласованной доставкой грузов // Транспорт: наука, техника, управление. 2006. № 11. С. 37–39. ISSN 0236-1914.
9. Александров А. Э., Новиков П. А. Принципы и модели оптимизации взаимодействия железнодорожного и морского транспорта // Транспорт: наука, техника, управление. 2008. № 9. С. 14–17. ISSN 0236-1914.
10. Александров А. Э., Шавзис С. С. Модель расчета оптимальной укрупненной структуры узла // Математическое программирование и приложения. 1999. № 8. С. 16–17.
11. Тимухина Е. Н., Окулов Н. Е. Оптимальный подвод грузов при наличии случайных факторов : матер. X Междунар. науч.-практ. конф. «Aktualni vymozenosti vedy — 2014». Прага : Publishing House «Education and Science», 2014. Т. 16. Технологии. С. 46–49.
12. Козлов П. А., Владимирская И. П. Построение систем автоматизированного управления потоками вагонов разных собственников // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 6. С. 8–11. ISSN 2223-9731.
13. Козлов П. А., Владимирская И. П., Тушин Н. А. Модель оптимизации управления парками вагонов разных собственников // Вестник РГУПС. 2010. № 3 (39). С. 93–98. ISSN 0201-727X.
14. Козлов П. А., Владимирская И. П. Метод оптимизации структуры транспортной системы // Мир транспорта. 2009. Т. 7. № 2 (26). С. 84–87. ISSN 1992-3252.
15. Козлов П. А., Осокин О. В., Тушин Н. А. Организационные подходы и модели оптимизации // Мир транспорта. 2011. Т. 9. № 5 (38). С. 18–23. ISSN 1992-3252.
16. Козлов П. А., Осокин О. В. Разработка модели автоматизированного расчета схемы оборота поездных локомотивов // Наука и техника транспорта. 2012. № 4. С. 58–61. ISSN 2074-9325.
17. Форд Л. Р., Фалкерсон Д. Р. Потoki в сетях. М. : Мир, 1966. 276 с.
18. Гольштейн Е. Г., Юдин Д. Б. Задачи линейного программирования транспортного типа. М. : Наука, 1969. 384 с.
19. Муртаф Б. Современное линейное программирование. М. : Мир, 1984. 224 с.
20. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М. : Мир, 1985. 509 с.
- logicheskogo zheleznodorozhnogo transporta : dis. ... kand. tekhn. nauk]. M., 1984. 223 p.
4. Kozlov P. A. Theoretical basis, organizational forms, methods of optimization of flexible transport service methods at ferrous metallurgy plants : DSc in Engineering Thesis [Teoreticheskie osnovy, organizatsionnye formy, metody optimizatsii gibkoy tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya zavodov chernoy metallurgii : dis. ... d-ra tekhn. nauk]. Lipetsk : LPI, 1986. 377 p.
5. Zhuravin S. G. Interaction of production units and industrial railway transport in the conditions of intensification : PhD in Engineering Thesis [Vzaimodeystvie proizvodstvennykh podrazdeleniy i promyshlennogo zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh intensifikatsii : dis. ... kand. tekhn. nauk]. M., 1987. 268 p.
6. Trofimov S. V. The choice of optimal methods of operational management of industrial railway transport : PhD in Engineering Thesis [Vyor optimal'nykh metodov operativnogo upravleniya raboty promyshlennogo zheleznodorozhnogo transporta : dis. ... kand. tekhn. nauk]. M., 1990. 201 p.
7. Aleksandrov A. E., Yakushev N. V. Stochastic formulation of the dynamic transportation problem with delays with the random variation in the time of delivery and time consumption [Stokhasticheskaya postanovka dinamicheskoy transportnoy zadachi s zaderzhkami s uchetoм sluchaynogo razbrosa vremeni dostavki i vremeni potrebleniya] // Management of large systems. 2006. Issue 12–13. Pp. 5–14. ISSN 1819-2440.
8. Aleksandrov A. E. The mathematical model in the automated control system of the coordinated delivery of cargoes [Matematicheskaya model' v avtomatizirovannoy sisteme upravleniya soglasovannoy dostavkoy грузов] // Transport. Science, equipment, management. 2006. No. 11. Pp. 37–39. ISSN 0236-1914.
9. Aleksandrov A. E., Novikov P. A. Principles and models of optimizing sea and railway transport interaction [Printsipy i modeli optimizatsii vzaimodeystviya zheleznodorozhnogo i morskogo transporta] // Transport. Science, equipment, management. 2008. No. 9. Pp. 14–17. ISSN 0236-1914.
10. Aleksandrov A. E., Shavzis S. S. Model for calculating the optimal aggregate structure of the node [Model' rascheta optimal'noy ukрупnennoy struktury uzla] // Mathematical programming and applications. 1999. No. 8. Pp. 16–17.
11. Timukhina E. N., Okulov N. E. Optimal supply of cargo in the presence of random factors [Optimal'nyy podvod грузов pri nalichii sluchaynykh faktorov] : Proceedings of the X International scientific-practical conference «Aktualni vymozenosti vedy — 2014». Prague : Publishing House «Education and Science». 2014. Vol. 16. Technology. Pp. 46–49.
12. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. Forming-up systems of automated management of different owner's car flows [Postroenie sistem avtomatizirovannogo upravleniya potokami vagonov raznykh sobstvennikov] // Vestnik of the Railway Research Institute. 2009. No. 6. Pp. 8–11. ISSN 2223-9731.
13. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P., Tushin N. A. The model for control optimization of different freight cars owners [Model' optimizatsii upravleniya parkami vagonov raznykh sobstvennikov] // Vestnik RGUPS. 2010. No. 3 (39). Pp. 93–98. ISSN 0201-727X.
14. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. A method of optimization of structure of transport system [Metod optimizatsii struktury transportnoy sistemy] // World of transport and transportation. 2009. Vol. 7. No. 2 (26). Pp. 84–87. ISSN 1992-3252.
15. Kozlov P. A., Osokin O. V., Tushin N. A. Organizational approach and optimization models [Organizatsionnye podkhody i modeli optimizatsii] // World of transport and transportation. 2011. Vol. 9. No. 5 (38). Pp. 18–23. ISSN 1992-3252.
16. Kozlov P. A., Osokin O. V. Development of a model for automated calculation scheme of the train locomotives turnover scheme [Razrabotka modeli avtomatizirovannogo rascheta shemy oborota poezdnykh lokomotivov] // Science and technology in transport. 2012. No. 4. Pp. 58–61. ISSN 2074-9325.
17. Ford L. R., Fulkerson D. R. Flows in networks [Potoki v setyakh]. M. : World, 1966. 276 p.
18. Gol'shtein E. G., Yudin D. B. Transport type linear programming problem [Zadachi lineynogo programmirovaniya transportnogo tipa]. M. : Science, 1969. 384 p.
19. Murtagh B. Modern linear programming [Sovremennoe lineynoe programmirovaniye]. M. : World, 1984. 224 p.
20. Gill P., Murray W., Wright M. Practical optimization [Prakticheskaya optimizatsiya]. M. : World, 1985. 509 p.

УДК 656.257

Николай Николаевич Романов, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник 25 НИО Научно-исследовательского института (Военно-системных исследований МТО ВС РФ) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева (ВА МТО), Санкт-Петербург, Россия,

Михаил Геннадьевич Яшин, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Восстановление автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах» Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева, ВИ (ЖДВ и ВОСО) ВА МТО, Санкт-Петербург, Россия,

Роман Анатольевич Пантелеев, преподаватель кафедры «Восстановление автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах» Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева, ВИ (ЖДВ и ВОСО) ВА МТО, Санкт-Петербург, Россия

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФАКТОРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Nikolay Nikolayevich Romanov, DSc in Engineering, Professor, Senior Researcher, Railway Forces Research Institute (Military System Studies MART MT RF), General of the Army A. V. Khrulev Military Academy for Logistics, St. Petersburg, Russia,

Mikhail Gennadyevich Yashin, PhD in Engineering, Associate Professor, Doctoral Candidate, Railway Automation, Telemechanics and Communication Recovery Department, Military Institute (Military Troops and Military Communications), General of the Army A. V. Khrulev Military Academy for Logistics, St. Petersburg, Russia,

Roman Anatolyevich Panteleev, Lecturer, Railway Automation, Telemechanics and Communication Recovery Department, Military Institute (Military Troops and Military Communications), General of the Army A. V. Khrulev Military Academy for Logistics, St. Petersburg, Russia

Assessment of capacity of the railway directions with use of experimental factorial mathematical model

Аннотация

Анализируются свойства транспортной системы по выполнению ее основной функции, связанной с пропуском поездов. В действующих методиках пропускная способность железнодорожных участков определяется в одинаковых по массе и длине расчетных грузовых поездах по ограничивающим перегонам. Однако применяемые для ее оценки аналитические и графоаналитические методы не в состоянии учесть всей полноты особенностей, возникающих при функционировании железнодорожной транспортной системы. Для учета многообразных факторов, воздействующих на пропускную способность, принято использовать аппарат математического моделирования. В статье предлагается новый подход к оценке пропускной способности железнодорожных направлений, основанный на экспериментальной факторной математической модели, которая позволяет учесть множество факторов, стохастически влияющих на показатели пропускной способности.

Ключевые слова: пропускная способность, железнодорожное направление, экспериментальная факторная математическая модель.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-40-48

Summary

The properties of the transport system are analyzed to perform its basic function related to the train handling. In current methods, the capacity of railway sections is determined in the same weight and length of the estimated freight trains along the limiting distances. However, the analytical and graphoanalytical methods used for its evaluation are not able to take into account the fullness of the features that arise in the functioning of the railway transport system. To take into account the diverse factors affecting the capacity, it is customary to use the mathematical modeling apparatus. The article proposes a new approach to assessing the capacity of railway lines, based on an experimental factorial mathematical model that allows to take into account a number of factors stochastically affecting the capacity indicators.

Keywords: capacity, railway direction, experimental factorial mathematical model.

ВВЕДЕНИЕ

Пропускная способность железных дорог — основная характеристика, отражающая перевозочные возможности железнодорожного направления (ЖДН), знание которой позволяет точнее планировать грузовые перевозки и эффективнее использовать инфраструктуру и подвижной состав. На сегодняшний день разработано множество методик, предназначенных для расчета пропускной способности объектов ЖДН, которые отличаются большим числом и значительной сложностью формул и использование которых требует больших затрат и вычислительных ресурсов. Для расчета значения пропускной способности применяются аналитические методы, параметрические модели, имитационное моделирование. В настоящей статье предпринята попытка оценить пропускную способность на основе экспериментальной факторной математической модели.

Цель исследования — реализовать новый подход к оценке пропускной способности железнодорожного направления, что позволит учитывать многообразие воздействующих факторов и, как следствие, принимать оптимальные решения по эксплуатации транспортной системы в целом.

Объектом исследования является пропускная способность ЖДН. В исследовании использованы методы системного анализа, теории вероятности и математического моделирования.

Материалы статьи будут полезны работникам железнодорожных служб при планировании грузовых и пассажирских перевозок.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

В последнее время при исследовании проблемных вопросов функционирования сложных организационно-технических систем широко используются экспериментальные факторные математические модели (ЭФММ) [1], которые характеризуются простотой, ясностью и малой трудоемкостью расчетных операций.

В общем виде ЭФММ представляет собой систему взаимосвязанных уравнений, обеспечивающих адекватное описание выходных характеристик объекта в зависимости от динамики изменения значений его внешних и внутренних параметров. ЭФММ может быть сформирована и построена с помощью эксперимента, проводимого на самом техническом объекте (физический эксперимент), или вычислительного эксперимента с использованием математической модели, реализуемой на ЭВМ.

В нашем случае целесообразно использовать вычислительный эксперимент на основе комплекса теоретических моделей, определяющих работу различных железнодорожных объектов.

При построении ЭФММ объект исследования целесообразно представить в виде «черного ящика», на вход которого подаются переменные X и Z , характеризующие параметры исследуемого объекта, а на выходе фиксируются выходные функциональные переменные Y , определяющие эффективность и качество работы данного объекта (рис. 1) [2, 3].

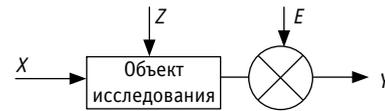


Рис. 1. Модельное представление объекта исследования

При проведении эксперимента переменными X можно управлять, изменяя их величину по заданному закону. Переменные Z — неуправляемые, принимающие случайные значения, а переменные $E = (E_1, E_2, \dots, E_k)$ — неуправляемые, влияющие на результат функционирования.

Переменные X и Z принято называть факторами.

Пространство факторов X и Z образует факторное пространство [4, 5].

Выходная переменная Y представляет собой вектор зависимых переменных моделируемого объекта. Ее называют откликом, а зависимость Y от X и Z — функцией отклика [6].

Переменная E действует в процессе эксперимента бесконтрольно.

В вычислительных экспериментах объектом исследования является математическая модель, под которой понимается вид математических соотношений между факторами X, Z и откликом Y . Задача решается методами регрессионного анализа [1].

Регрессионную модель нашей задачи можно представить выражением

$$Y = \varphi(X, Z, B), \quad (1)$$

где B — вектор параметров факторной модели.

Такая модель описывает поведение объекта, характеризует его основные свойства, которые в полной мере проявляются лишь при многократном повторении опытов.

При активном эксперименте значения факторов задают и поддерживают их неизменными на заданных уровнях в каждом опыте в соответствии с планом эксперимента. Однако в активном эксперименте постоянно действует аддитивная погрешность E , тогда реализации функций отклика Y представляют собой случайные величины, хотя варьируемые факторы X детерминированы. Тогда предлагаемая регрессионная модель описывает поведение объекта, характеризует его основные свойства, которые в полной мере проявляются лишь при многократном повторении опытов.

Следовательно, реализация ЭФММ требует статистической обработки результатов опытов, получаемых в ходе имитационного моделирования.

В [7] под пропускной способностью железнодорожной линии предлагается понимать наибольшие размеры движения (в поездах или вагонах), которые могут быть выполнены на этой линии в течение определенного периода (суток или часа) в зависимости от имеющихся постоянных (стационарных) устройств, типа и мощности тяговых средств, рода вагонов и способа организации движения (типа графика).

К основным элементам технических устройств, определяющим пропускную способность, относятся:

по перегонам — число главных путей, длина перегонов, профиль пути, устройства сигнализации, централизации

и блокировки (СЦБ), путевое развитие промежуточных раздельных пунктов, тип локомотива, вес поезда, род вагонов, устройства энергоснабжения;

по станциям — приемо-отправочные пути, стрелочные горловины, а также тип системы СЦБ (другими словами, способ централизации, применяемый на станции).

В соответствии с принципами имитационного моделирования разработка модели железнодорожного направления предполагает определение состава, структуры и существенных причинно-следственных связей, от которых зависит пропускная способность объектов ЖДН.

Процесс пропуска поездопотока по железнодорожному направлению характеризуется такими параметрами, как продолжительность хода поезда (пары поездов) между пунктами, станционными интервалами, интервалами между попутными поездами, а также продолжительность технических операций по обработке поездов на приемо-отправочных путях. Значимость каждого из указанных параметров подтверждается результатами ряда работ [8–13]. Каждый из них находится в тесной взаимосвязи с другими параметрами и реагирует на любые конструктивные и технологические изменения (табл. 1).

Таблица 1

Взаимосвязь технических и эксплуатационных характеристик элементов направления

Характеристики производственной мощности	Показатели	Элементы технического оснащения
Время хода между раздельными пунктами t_x		1. Тип верхнего строения пути 2. План и профиль 3. Тип и серия локомотивов 4. Расстояние между раздельными пунктами
Интервал между попутными поездами J		1. Число блок-участков, разграничивающих поезда (при автоблокировке) 2. Расстояние между раздельными пунктами
Продолжительность нахождения поездов на технической станции $t_{ст}$	Время обработки поездов t_o	1. Количество приемо-отправочных путей 2. Количество бригад ПТО 3. Средства управления стрелками и сигналами
Станционные интервалы τ		1. Способ осуществления централизации между стрелками и сигналами 2. Число станционных путей

Пропускную способность определяют для участков железнодорожных линий с одинаковыми на всем протяжении участка техническим оснащением и мощностью грузопотока. Начальными и конечными пунктами таких участков являются сортировочные и участковые станции, а иногда также промежуточные станции зарождения и погашения грузопотоков от правительских маршрутов [10, 13, 14, 15].

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве входных параметров имитационной модели примем технические параметры, характеризующие пропускную способность железнодорожных направлений (табл. 2).

Таблица 2

Входные параметры имитационной модели

№ п/п	Входные параметры модели	Граничные значения
Участковая станция		
1	Путевое развитие станции τ , ед.	3–6
2	Количество бригад ПТО P , ед.	1–3
Участок		
1	Протяженность перегонов $l_{пер}$ км	6–12
2	Количество путей на участке d , ед.	1–2
3	Тип СЦБ τ , ед.	1–3
4	Тип профиля (расчетный уклон) i_p , ‰	1–2
5	Количество путей на раздельных пунктах c , ед.	2–5

Взаимосвязи входных и выходных факторов целесообразно представить в виде математической модели процесса движения поездов по элементам направления.

Влияние приведенных факторов на результаты оценки пропускной способности железнодорожной линии к настоящему времени достаточно подробно исследовано [10, 15–20]. Вместе с тем, особенно с учетом наличия на участке объектов краткосрочного или временного восстановления и обладающих некоторыми дефектами (малые радиусы кривой, излишняя деформативная осадка, некоторое несоответствие уровня рельсов и др.), пропускная способность участка будет заметно ниже результата, полученного согласно рекомендациям [7].

В общем виде решение задачи по оценке пропускной способности участка (перегона) сводится к исследованию функциональной зависимости

$$N_p = f(l_{пер}, d, i_p, \tau, c, k_{КВ}, k_{ВВ}), \quad (2)$$

где $l_{пер}$ — протяженность перегона, км;
 d — количество путей на участке, ед.;
 i_p — тип профиля местности в полосе дороги, ‰;
 τ — способ интервального регулирования движения поездов на перегонах;

c — количество путей на раздельных пунктах, ед.;
 $k_{КВ}, k_{ВВ}$ — соответственно коэффициенты снижения пропускной способности объекта после его восстановления по требованиям краткосрочного и временного восстановления.

Анализ работ, выполненных ранее в области оценки пропускной способности железнодорожных объектов, показывает, что в качестве расчетной при определении показателя N_p целесообразно использовать зависимость вида



$$N_P = \frac{1440}{(t'_x + t''_x + t_{p,3} + \sum \tau_{ст}) + (\alpha_n - 1)(J' + J'')} \cdot K, \quad (3)$$

где t'_x, t''_x — перегонные времена хода поезда с установленной для данного участка массой, мин;

$t_{p,3}$ — время на разгон и замедление, мин;

$\sum \tau_{ст}$ — продолжительность станционных интервалов, мин;

α_n — коэффициент пакетности;

J', J'' — станционные интервалы, зависящие от способа маршрутизации передвижений на станции, мин;

K — число поездов (пар поездов) в периоде графика.

Величина $t'_x + t''_x + t_{p,3} + \sum \tau_{ст}$ представляет собой продолжительность занятия перегона группой поездов (период графика T), мин.

Перегонное время хода поезда определяется по зависимости $t'_x(t''_x) = \frac{l_{пер}}{V_x}$, мин. Вполне естественно, что пользование данной формулой предусматривает учет рельефа местности в полосе дороги, вес поезда, динамические свойства локомотива и другие факторы. В работе [13] с целью упрощения расчетов для равнинного профиля местности предлагается формула

$$t_x = 0,2 \frac{l_{пер}}{V_P} + 0,8 \frac{l_{пер}}{90}, \quad (4)$$

где V_P — усредненная скорость продолжительного режима локомотива, км/ч.

Для холмистого типа профиля перегонное время рекомендуется рассчитывать по формуле

$$t_x = 0,2 \frac{l_{пер}}{V_P} + 0,7 \frac{l_{пер}}{90} + 0,1 \frac{l_{пер}}{40}. \quad (5)$$

Время на разгон t_p и замедление t_3 определяется тяговыми характеристиками локомотива в зависимости от массы поезда и может задаваться детерминированно ($t_{p,3} = 1-2$ мин).

Для установления продолжительности станционных интервалов необходимо суммарно учитывать интервалы одновременного прибытия поездов на однопутных участках $\tau_{нп}$ и интервалы скрещения $\tau_{ск}$. Их продолжительность для различных типов блокировки приведена в табл. 3.

Таблица 3

Продолжительность станционных интервалов

Способ интервального регулирования движения на перегоне	Интервалы, мин	
	скрещения $\tau_{ск}$	неодновременного прибытия $\tau_{нп}$
АБ	1	3
ПАБ и другие средства	3	5

Влияние на пропускную способность и взаимозависимость таких параметров, как число приемо-отправочных путей на смежных промежуточных станциях, способ интервального регулирования движения поездов на перегоне, может быть вы-

ражено через коэффициент пакетности α_n и значение межпоездных интервалов J . При числе приемо-отправочных путей $c = 1$ значение $\alpha_n = 1$, при $c \geq 1$ величина $\alpha_n = 2$.

В этом случае при наличии автоблокировки значение межпоездного интервала J можно определить из выражения

$$J = \frac{3l_{бл} + l_{п}}{V_x}, \quad (6)$$

где $l_{бл}$ — длина блок-участка;

$l_{п}$ — средняя длина поезда.

На участках, не оборудованных автоматической блокировкой, $J = t_x + \tau_{пс}$.

Вместе с тем продолжительность станционных интервалов может быть подвержена колебаниям в связи с неравномерностью прибытия и проследования поездов.

Суммарная продолжительность операций по приему, отправлению или пропуску поездов через промежуточную станцию определяется зависимостью

$$\tau_{ск} + \tau_{нп} = \sum t_{оп} \pm 3\sigma_{t_{оп}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{t_{оп}}$ — среднее квадратическое отклонение продолжительности операций.

Следовательно, диапазон времени занятия перегона парой поездов T определяется зависимостью

$$T = \bar{t}'_x \pm 3\sigma(t'_x) + \bar{t}''_x \pm 3\sigma(t''_x) + \bar{t}_p + \bar{t}_3 + \bar{\tau}_{нп} \pm 3\sigma_{\tau_{нп}} + \bar{\tau}_{ск} \pm 3\sigma_{\tau_{ск}}. \quad (8)$$

Аналогичная последовательность вычисления параметра T в расчетном периоде T_p может быть распространена и на двухпутные участки.

В соответствии с инструкцией [17] значение пропускной способности определяется для каждого пути в отдельности:

$$N_P = \frac{1440}{J}. \quad (9)$$

В свою очередь, межпоездной интервал составляет, мин,

$$J = \frac{3l_{бл} + l_{п}}{V_{oc} \pm 3\sigma_{V_x}}, \quad (10)$$

где σ_{V_x} — среднее квадратическое отклонение ходовой скорости, км.

Тогда величина J на оборудованном автоматической блокировкой двухпутном участке может быть выражена как

$$J = \bar{J} \pm 3\sigma_J. \quad (11)$$

На не оборудованных автоблокировкой участках

$$J = \bar{t}'_x \pm 3\sigma t'_x + \tau_{пс}. \quad (12)$$

Условием надежного функционирования железнодорожного направления является недопущение скопления поездопотоков на подходах к станциям. При пропуске транзитного поездопотока к таким элементам относятся горловина и приемо-отправочные пути.

В [17] расчетная формула для оценки пропускной способности станции имеет вид

$$N_P = \frac{1440 \cdot n}{t_o}, \quad (13)$$

где n — число путей для приема грузовых поездов, ед.;

t_o — продолжительность операций технологического цикла.

Вместе с тем в общем виде пропускную способность станции можно определить из выражения

$$N_P = \frac{n}{k}, \quad (14)$$

где n — число транзитных поездов, поступающих на станцию, ед.;

k — коэффициент использования пропускной способности,

$$k = \frac{T}{1440 \cdot n - \sum t_{\text{пост}}}, \quad (15)$$

где T — общее время работы станции, мин;

n — количество приемо-отправочных путей, ед.;

$\sum t_{\text{пост}}$ — продолжительность операций по текущему обслуживанию, снегоуборке и др., мин.

Общее время работы станции, затрачиваемое на обработку поступающего транзитного поездопотока, можно определить по формуле

$$T = n \cdot t_{\text{обр}} \cdot (1 + \rho) \cdot (1 + \gamma), \quad (16)$$

где ρ — коэффициент, учитывающий внутрисуточную неравномерность поступления поездов на станцию и занятость горловин; для двухпутных линий $\rho = 0,15-0,25$, для однопутных $\rho = 0,35-0,55$;

γ — коэффициент, учитывающий неравномерность занятости горловин отправляющимися со станции поездами, а также влияние на производственную мощность станции поездопотока, следующего без обработки. Для средств управления стрелками и сигналами (ЭЦ, МРЦ) он принимается равным 0,1, при ручном способе управления — равным 0,15–0,2.

Продолжительность обработки поезда $t_{\text{обр}}$ целесообразно определять по зависимости

$$t_{\text{обр}} = \frac{\tau \cdot m}{b}, \quad (17)$$

где τ — продолжительность осмотра одного вагона (0,8–1,0 мин);

m — среднее число вагонов в составе поезда, ед.;

b — количество групп в бригадах ПТО, ед.

Анализ статистических данных продолжительности нахождения поездов под операциями технологического цикла на одной из станций Октябрьской дороги показал, что время осмотра целесообразно характеризовать параметрами $\overline{t_{\text{обр}}}$ и $\sigma(t_{\text{обр}})$.

С учетом того что подача локомотива под состав $t_{\text{см}}$ предполагается после окончания осмотра состава поезда,

$$t_o = (\overline{t_{\text{обр}}} \pm 3\sigma(t_{\text{обр}})) + t_{\text{см}}. \quad (18)$$

В сформированном виде продолжительность процессов приема, обслуживания и отправления поезда в приемо-отправочном (транзитном) парке t_o представляется в виде

$$t_o = (t_M + t_{\text{вх}} + (\overline{t_{\text{обр}}} \pm 3\sigma(t_{\text{обр}})) + t_{\text{см}} + t_M + t_{\text{вых}}). \quad (19)$$

Таким образом, определена совокупность зависимостей, позволяющих комплексно подойти к вопросу оценки пропускной способности станции с учетом всех элементов, входящих в технологическую линию обработки транзитного поездопотока.

По окончании периода моделирования производится расчет среднего значения, среднеквадратического отклонения пропускной способности станции и вероятности освоения поездопотока в последовательности, аналогичной последовательности вычислительных процедур на участке.

Процедура имитации пропуска группы поездов осуществляется по каждому перегону и каждой станции участка. Выполняется расчет пропускной способности участка по K объектам, и результаты сводятся в массив переменной информации. В массиве выбирается имитирующий элемент по условию

$$N_P = \left\{ N_{P_i}^{\text{пер}} \right\}_{i=1}^{i=m}. \quad (20)$$

После окончания вычислений производится обработка статистических данных и устанавливается математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение поездов, пропущенных по участку за расчетный период T_p . Затем осуществляется расчет числовых характеристик участковой скорости и продолжительности следования поезда по участку.

Таким образом, рассмотрены все составляющие пропускной способности железнодорожного участка и определены математические зависимости, позволяющие комплексно описать процесс функционирования участка ЖДН и оценить его пропускную способность.

На практике при планировании активных экспериментов принято использовать следующие основополагающие принципы [1]: отказ от полного перебора всех возможных состояний объекта; постепенное усложнение структуры математической модели; сопоставление результатов эксперимента с величиной случайных помех; оптимальное планирование эксперимента.

При планировании вычислительного эксперимента необходимо соблюдать определенный комплекс требований. Например, при активном эксперименте факторы должны быть [1]: управляемыми (установка заданных значений и поддержание постоянными в процессе опыта); совместными (их взаимное



влияние не должно нарушать процесс функционирования объекта); независимыми (уровень любого фактора должен устанавливаться независимо от уровней остальных); однозначными (одни факторы не должны быть функцией других); непосредственно влияющими на выходные параметры.

Функции отклика должны быть: численно измеряемыми; иметь четкий физический смысл; однозначными (характеризовать только одно свойство объекта); информативными (полностью характеризовать определенное свойство объекта); статистически эффективными (измеряться с достаточной точностью с целью сокращения числа опытов).

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФАКТОРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Для четкого проведения активного эксперимента возникает необходимость в разработке определенного плана варьирования факторов, т. е. эксперимент необходимо заранее планировать.

План эксперимента представляет собой совокупность данных, определяющих число, условия и порядок реализации опытов.

В активном эксперименте все факторы могут принимать только фиксированные значения, которые принято называть уровнем фактора.

Проведение активного эксперимента включает следующие этапы [1].

1. Формулировка целей эксперимента и обоснование гипотезы. Обычно выдвигается гипотеза в виде модели. Анализ показал, что при формировании факторных экспериментальных моделей оценки пропускной способности элементов ЖДН (участков, станций и др.) целесообразно использовать планы полного факторного эксперимента с построением линейных регрессионных моделей. Кроме того, анализ позволил выдвинуть обоснованную гипотезу относительно состава влияющих факторов и формы связи функции отклика с факторами.

2. Определение методики проведения эксперимента.

3. Обоснование совокупности определяющих факторов и установление пределов их варьирования. Анализ существующих методов оценки пропускной способности элементов железных дорог, исследование условий и факторов, определяющих пропускную способность железнодорожных объектов, обоснование и разработка имитационной модели функционирования ЖДН позволили установить совокупность основных факторов, определяющих пропускную способность железных дорог (табл. 4).

В качестве определяющих факторов были приняты: X_1 — протяженность перегона с пределами варьирования $X_{1min} = 8$ км и $X_{1max} = 15$ км; X_2 — тип профиля ($X_{2min} = 1$ — равнинный, $i_{max}^1 \leq 7\%$; $X_{2max} = 2$ — холмистый, $i_{max}^2 \leq 11\%$); X_3 — число путей для скрещения на раздельном пункте ($X_{3min} = 1$; $X_{3max} = 3$); X_4 — СЦБ на станции ($X_{4min} = 4$ мин — электрическая централизация; $X_{4max} = 8$ мин — ручной способ управления стрелками и сигналами); X_5 — число путей в приемо-отправочном парке ($X_{5min} = 3$; $X_{5max} = 5$); X_6 — мощности подсистемы технического обслуживания ПТО ($X_{6min} = 1$; $X_{6max} = 2$).

4. Формирование планов эксперимента, которые принято представлять в матричной форме. Матрица спектра плана имеет вид

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_i \\ \dots \\ X_{m-1} \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11}, & X_{12}, & \dots & X_{1j}, & \dots & X_{1n} \\ X_{21}, & X_{22}, & \dots & X_{2j}, & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1}, & X_{i2}, & \dots & X_{ij}, & \dots & X_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m-1,1}, & X_{m-1,2}, & \dots & X_{m-1,j}, & \dots & X_{m-1,n} \\ X_{m1}, & X_{m2}, & \dots & X_{mj}, & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_i \\ \dots \\ Y_{m-1} \\ Y_m \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где X_i — вектор, определяющий нормированные значения координат точки плана в i -м опыте;

X_{ij} — нормированное значение j -го фактора в i -м опыте;

Y_i — значение функции отклика в i -м опыте.

С целью определения повторяемости опытов использована зависимость $m = \left(\frac{V}{Pm}\right)^2$, где V — вариационный коэффициент испытаний, а Pm — максимальное значение показателя точности [21]. В нашем эксперименте вполне достаточно принять $V = 12\%$, а $Pm = 3\%$. Тогда m составит 16 реализаций для каждого опыта.

Анализ показал, что при оценке пропускной способности элементов ЖДН целесообразно использовать формулу полного факторного эксперимента, где число точек N спектра плана определяется по зависимости

$$N = U^n, \quad (22)$$

где U — число уровней варьирования факторов;
 n — количество факторов.

Таблица 4

Определяющие факторы

Элементы направления	Протяженность перегона, км	Тип профиля, ‰	Число путей на раздельных пунктах, ед.	СЦБ на перегонах	Число путей в приемо-отправочном парке, ед.	Мощности ПТО
Однопутный участок	X_1	X_2	X_3	X_4		
Двухпутный участок	X_1	X_2		X_4		
Техническая станция					X_5	X_6

Для получения линейной регрессии достаточно варьировать факторы на двух уровнях, т.е. $U = 2$. Тогда число точек спектра плана будет определяться формулой $N = 2^n$. Такой план принято обозначать ПФЭ 2^n .

Рассмотрим порядок составления матрицы спектра плана для обоснования экспериментальной факторной модели оценки пропускной способности элементов железнодорожного направления (табл. 5–7).

Таблица 5

Однопутный перегон участка ЖДН

№ опытов	Значения факторов				Математическое ожидание функции отклика
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	8	1	1	4	38,4
2	15	1	1	4	27,9
3	8	2	1	4	35,4
4	15	2	1	4	25,7
5	8	1	3	4	59,4
6	15	1	3	4	54,1
7	8	2	3	4	57,9
8	15	2	3	4	50,4
9	8	1	1	8	30,7
10	15	1	1	8	29,3
11	8	2	1	8	30,4
12	15	2	1	8	29,0
13	8	1	3	8	54,7
14	15	1	3	8	44,4
15	8	2	3	8	50,4
16	15	2	3	8	39,9

Таблица 6

Двухпутный перегон участка ЖДН

№ опытов	Значения факторов			Математическое ожидание функции отклика
	X_1	X_2	X_4	
1	8	1	4	147,6
2	15	1	4	111,4
3	8	2	4	125,6
4	15	2	4	92,5
5	8	1	8	105,9
6	15	1	8	66,4
7	8	2	8	83,7
8	15	2	8	45,7

Таблица 7

Техническая станция

№ опытов	Значения факторов		Математическое ожидание функции отклика
	X_5	X_6	
1	3	1	42,7
2	5	1	63,2
3	3	2	59,9
4	5	2	79,6

С целью получения по экспериментальным данным математической факторной модели проводится регрессионный анализ, который включает три основных этапа [4, 21]:

- 1) статистический анализ результатов натурального или вычислительного эксперимента;
- 2) получение оценок искомых коэффициентов регрессии β ;
- 3) оценку адекватности и работоспособности полученной экспериментальной факторной модели сложной организационно-технической системы.

Исходными данными для получения оценок параметров регрессионных моделей пропускной способности элементов ЖДН (т.е. оценок b искомых коэффициентов регрессии β) является информация о значениях управляемых факторов X и функции отклика Y . Здесь $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im})$ — строка значений факторов в i -м опыте; X_{ij} — значение j -го фактора в i -м опыте; n — количество факторов; m — количество опытов; \bar{Y}_i — математическое ожидание значения функции отклика в i -м опыте.

Уравнение регрессии устанавливает зависимость между оценкой математического ожидания функции отклика \bar{Y} и факторами $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$. Вид данной зависимости можно описать выражением

$$\bar{Y} = \sum_{k=0}^d b_k \cdot f_k(X). \quad (23)$$

Для данной модели система базисных функций очевидна и имеет вид

$$f_0(x) = 1, 0; f_1(x) = x_1; f_2(x) = x_2, \dots, f_n(x) = x_n.$$

В результате посредством полного факторного эксперимента представилось возможным построить простейшую линейную факторную модель оценки пропускной способности основных элементов ЖДН в виде уравнения

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n. \quad (24)$$

Значения коэффициентов зависимости оценивались по методике, детально изложенной в [1].

В результате выполненных расчетов получены простейшие линейные факторные модели оценки пропускной способности основных элементов железнодорожного направления (табл. 8).

Таблица 8

Линейные факторные модели оценки пропускной способности элементов ЖДН

№ п/п	Элементы ЖДН	Общий вид простейшей линейной модели	Линейное уравнение регрессии
1	Однопутный перегон участка	$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$	$N_P^1 = \frac{96}{x_1} + \frac{8}{x_2} + 9x_3 + \frac{40}{x_4}$
2	Двухпутный перегон участка	$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_4x_4$	$N_P^2 = \frac{689,6}{x_1} - 22x_2 + \frac{333,6}{x_4}$
3	Техническая станция	$Y = b_0 + b_5x_5 + b_6x_6$	$N_P^{CT} = 10,5x_5 + 11,2x_6$

Таким образом, в результате регрессионного анализа экспериментальных данных определены приближенные уравнения связи пропускной способности элементов железнодорожного направления с их основными техническими параметрами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что они дают возможность правильно оценивать живучесть и устойчивость ЖДН с точки зрения оценки выполнения транс-

портной системой своих функций, а именно пропуска поездопотоков с требуемой пропускной способностью, и принимать оптимальные решения по эксплуатации железнодорожных направлений.

Полученная экспериментальная факторная математическая модель позволяет с достаточной точностью оценивать пропускную способность исследуемого участка ЖДН и значительно упрощает оценку живучести и устойчивости функционирования участков (объектов) после их восстановления, а также в процессе эксплуатации.

Литература

1. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем : учеб. для вузов. Минск : Дизайн ПРО, 2004. 640 с.
2. Бусленко Н. П., Калашников Н. Н., Коваленко И. Н. Лекции по теории сложных систем : учеб. пособие. М. : Советское радио, 1973. 440 с.
3. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М. : Наука, 1978. 400 с.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / 4-е изд. М. : Наука, 1969. 576 с.
5. Коробейников А. А. Методика оценки эффективности функционирования системы разминирования в процессе восстановления железных дорог в операциях : дис. ... канд. воен. наук. СПб., 1998. 232 с.
6. Подиновский В. В. Математическая теория выработки решений в сложных ситуациях. М. : МО СССР, 1981. 212 с.
7. Боровикова М. С. Организация движения на железнодорожном транспорте : учеб. М. : Маршрут, 2003. 368 с.
8. Добкин В. М. Системный анализ в управлении. М. : Химия, 1984. 224 с.
9. Каретников А. Д., Воробьев Н. А. График движения поездов. М. : Транспорт, 1969. 280 с.
10. Кизляк О. П. Маршрутная пропускная способность железных дорог на направлениях воинских перевозок: прогнозирование и выбор рациональных мероприятий по ее повышению : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004. 200 с.
11. Лисенков В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов. М. : ВНИТИ РАН, 1999. 332 с.
12. Основные положения по организации воинских железнодорожных перевозок в 2001 году. М. : ЦУП ВОСО, 2000.

References

1. Tarasik V. P. Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem : ucheb. dlya vuzov [Mathematical simulation of technical systems : a textbook for universities]. Minsk : Dizayn PRO, 2004. 640 s.
2. Buslenko N. P., Kalashnikov N. N., Kovalenko I. N. lektzii po teorii slozhnykh sistem : ucheb. posobie [Lectures on the theory of difficult systems : a textbook]. M. : Sovetskoe radio, 1973. 440 s.
3. Buslenko N. P. Modelirovanie slozhnykh sistem [Simulation of difficult systems]. M. : Nauka, 1978. 400 s.
4. Venttsel' E. S. Teoriya veroyatnostey / 4-e izd. [Probability theory / 4th ed.]. M. : Nauka, 1969. 576 s.
5. Korobeynikov A. A. Metodika otsenki effektivnosti funktsionirovaniya sistemy razminirovaniya v protsesse vosstanovleniya zheleznodorozhnykh dorog v operatsiyakh : dis. ... kand. voen. nauk [Methodology of an assessment of efficiency of functioning of system of mine clearing in the course of restoration of the railways in operations : PhD in Military Thesis]. SPb., 1998. 232 s.
6. Podinovskiy V. V. Matematicheskaya teoriya vyrabotki resheniy v slozhnykh situatsiyakh [The mathematical theory of framing of decisions in difficult situations]. M. : MO SSSR, 1981. 212 s.
7. Borovikova M. S. Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte : ucheb. [The organization of movement on railway transport : a textbook]. M. : Marshrut, 2003. 368 s.
8. Dobkin V. M. Sistemnyy analiz v upravlenii [System's analysis in control]. M. : Khimiya, 1984. 224 s.
9. Karetnikov A. D., Vorobyev N. A. Grafik dvizheniya poezdov [Train schedule]. M. : Transport, 1969. 280 s.
10. Kizlyak O. P. Marshrutnaya propusknaya sposobnost' zheleznodorozhnykh dorog na napravleniyakh voinskiikh perevozok: prognozirovaniye i vybor ratsional'nykh meropriyatiy po ee povysheniyu : dis. ... kand. tekhn. nauk [Route capacity of the railways on the directions of military transportations: prediction and choice of rational actions for its increase : PhD in Engineering Thesis]. SPb., 2004. 200 s.
11. Lisenkov V. M. Statisticheskaya teoriya bezopasnosti dvizheniya poezdov [Statistical theory of traffic safety of trains]. M. : VINITI RAN, 1999. 332 s.
12. Osnovnyye polozheniya po organizatsii voinskiikh zheleznodorozhnykh perevozok v 2001 godu [Basic provisions on the organization of military railways transportation in 2001]. M. : TsUP VOSO, 2000.

13. Прогнозирование пропускной способности железных дорог и выбор рациональных способов по ее повышению : отчет о НИР / Н. Н. Романов и др. СПб. : ВТУ ЖДВ, 2004. 200 с.
14. Левин Д. Ю. Оптимизация потоков поездов. М. : Транспорт, 1988. 175 с.
15. Кочнев Д. В. Концептуальные основы теории и обеспечения устойчивости эксплуатационной работы магистральных железных дорог : дис. ... д-ра техн. наук. Петергоф, 2013. 312 с.
16. Вдовиченко В. Н. Способы усиления пропускной способности однопутных железных дорог. М. : Трансжелдориздат, 1951. 196 с.
17. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. М. : Транспорт, 1991. 302 с.
18. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог № ЦПЗУ/3954. М. : Транспорт, 1981. 274 с.
19. Козлов И. Т. Пропускная способность транспортных систем. М. : Транспорт, 1985. 213 с.
20. Яшин М. Г., Пантелеев Р. А. Восстановление регулирования движения поездов на железных дорогах в современных условиях // Национальные приоритеты России. Сер. 1 : Наука и военная безопасность. 2016. № 1 (4). С. 75–81. ISSN 2412–5326.
21. Зайцев Г. Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М. : Наука, 1984. 424 с.
13. Prognozirovanie propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog i vybor ratsional'nykh sposobov po ee povysheniyu : otchet o NIR [Prediction of capacity of the railways and a choice of rational methods on its increase : research report] / N. N. Romanov i dr. SPb. : VTU ZhDV, 2004. 200 s.
14. Levin D. Yu. Optimizatsiya potokov poezdov [Optimization of flows of trains]. M. : Transport, 1988. 175 s.
15. Kochnev D. V. Kontseptual'nye osnovy teorii i obespecheniya ustoychivosti ekspluatatsionnoy raboty magistral'nykh zheleznykh dorog : dis. ... d-ra tekhn. nauk [Conceptual foundation of the sustainability of the operation of mainline railways : DSc in Engineering Thesis]. Petergof, 2013. 312 s.
16. Vdovichenko V. N. Sposoby usileniya propusknoy sposobnosti odnoputnykh zheleznykh dorog [Methods of gain of capacity of the single-line railways]. M. : Transzheldorizdat, 1951. 196 s.
17. Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog [Instruction on calculation railways capacity]. M. : Transport, 1991. 302 s.
18. Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog № TsPEU/3954 [Instruction on calculation railways capacity TsPEU/3954]. M. : Transport, 1981. 274 s.
19. Kozlov I. T. Propusknaya sposobnost' transportnykh system [Capacity of transport systems]. M. : Transport, 1985. 213 s.
20. Yashin M. G., Panteleev R. A. Vosstanovlenie regulirovaniya dvizheniya poezdov na zheleznykh dorogakh v sovremennykh usloviyakh [Reconstruction of train traffic control on the railways in modern conditions] // Natsional'nye prioriteti Rossii. Ser. 1 : Nauka i voennaya bezopasnost'. 2016. № 1 (4). S. 75–81. ISSN 2412-5326.
21. Zaytsev G. N. Matematicheskaya statistika v eksperimental'noy botanike [Mathematical statistics in the experimental botany]. M. : Nauka, 1984. 424 s.

УДК 656.212.5

Евгений Николаевич Ахмаев, начальник Инской дистанции сигнализации, централизации и блокировки, Новосибирск, Россия,

Сергей Анатольевич Бессоненко, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия,

Виктор Вадимович Борисов, главный инженер Инской дистанции сигнализации, централизации и блокировки, Новосибирск, Россия,

Константин Ильич Корниенко, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОТЦЕПА В СОРТИРОВОЧНОМ ПАРКЕ

Evgeniy Nikolayevich Akhmaev, Head of Inskaya Distance of Signalization, Centralization and Blocking Devices, Novosibirsk, Russia,

Sergey Anatolyevich Bessonenko, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia,

Viktor Vadimovich Borisov, Chief Engineer, Inskaya Distance of Signalization, Centralization and Blocking Devices, Novosibirsk, Russia,

Konstantin Ilyich Kornienko, postgraduate student, Operations Management Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

Investigation of car movement in a sorting park

Аннотация

Статья посвящена исследованию движения отцепов в сортировочном парке. Эта проблема очень актуальна, поскольку сегодня большинство коммерческих браков происходят именно в сортировочном парке — при соударении вагонов с превышением скорости. Рассмотрены примеры зависимости скоростей движения хороших и плохих бегунов от пройденного расстояния. Также сделан вывод о возможности движения отцепа назад в сторону горба горки после остановки. Этот вопрос непосредственно влияет на безопасность движения, но до сих пор не до конца изучен.

Ключевые слова: сортировочная горка, замедлители, плохой бегун, хороший бегун, удельное сопротивление движению, профиль, имитационное моделирование, расчетный бегун, точка полной остановки.

Summary

The article is devoted to the investigation of the movement of the car in the sorting park. This problem is very urgent, because today most commercial marriages take place in the sorting park — when the cars collide with speeding. Examples of the dependence of the speed of the movement of good and bad runners on the distance traveled are considered. It was also concluded that the car can move back towards the hump of the hill after a stop. This issue directly affects the safety of traffic, but has not yet been fully explored.

Keywords: hump, retarders, bad runner, good runner, resistivity to movement, profile, simulation, rated runner, full stop point.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-49-53

В последние годы для сферы железнодорожных перевозок характерна тенденция к существенному сокращению времени доставки грузов. Важными аспектами данного процесса являются правильное и быстрое формирование поездов и снижение времени на переработку составов в пути следования [1]. Для этих целей применяются, в частности, сортировочные горки различной мощности, при организации работы которых следует добиваться повышения как перерабатывающей способности, так и безопасности роспуска.

Решить первую задачу можно путем сокращения горочного интервала или времени на повторную сортировку вагонов. Для того чтобы сократить горочный интервал, необходимо прежде всего увеличить скорость надвига и снизить временные издержки на осаживания за счет меньшего количества «окон» между отцепами. В свою очередь, повышение скорости надвига может повлечь за собой снижение безопасности роспуска и рост количества коммерческих браков, которые в основном возникают в сортировочном парке.

Увеличить безопасность роспуска возможно за счет уменьшения скорости движения отцепов, но это может привести к образованию «окон» и, как следствие, к снижению перерабатывающей способности из-за увеличения времени на осаживания [2, 3].

Следует отметить, что теория расчета и проектирования сортировочных горок непрерывно развивается [4–6]. Однако некоторые проблемы до сих пор остаются нерешенными. Например, в сортировочных парках бывают случаи движения вагонов назад после остановки. Если отцеп покатится назад, то

скорость следующего отцепа, направленного на данный путь, должна быть меньше, чтобы соударение произошло с допустимой скоростью (по требованиям ПТЭ вагоны должны соударяться со скоростями не более 1,5 м/с [7]). Самопроизвольное начало движения вагонов — это нарушение безопасности.

Таким образом, одним из главных условий эффективного функционирования сортировочной горки является точное определение места остановки отцепов. Большое влияние на скорость движения отцепов и безопасность роспуска оказывает профиль пути. Однако в настоящее время профиль путей сортировочного парка по ряду причин не выдерживается в нужных проектных решениях [8–10].

Данная статья посвящена исследованию того, как изменение профиля влияет на скорость движения отцепов в сортировочном парке и на безопасность роспуска. В исследовании применялся метод имитационного моделирования скорости движения отцепа в сортировочном парке [11, 12]. Сортировочный путь рассматривался в границах от парковых тормозных позиций до тормозных башмаков в выходной горловине. Моделирование выполнялось с шагом 1 м. При моделировании использовалась шарнирно-осевая модель движения отцепа. Для этого определялся эквивалентный уклон по формуле, разработанной ДИИТОм:

$$i_i = \sum_{j=1}^4 q_j \cdot \sum_{k=1}^4 i_k, \quad (1)$$

где q_j — удельная нагрузка на ось вагона (для одиночного 4-осного отцепа принимается равной 0,25);

i_k — действительный уклон, по которому движется k -я ось отцепа на перемещении.

Далее вычислялось суммарное удельное сопротивление движению отцепа:

$$w_i = w_o + w_{св} + w_{иr} \quad (2)$$

где w_o — основное удельное сопротивление движению вагонов;

$w_{св}$ — сопротивление отцепа от среды и ветра;

$w_{иr}$ — сопротивление движению вагонов от снега и инея (для нашего исследования принималось равным 0).

Затем рассчитывалась скорость движения отцепа в каждой точке [8, 13]:

$$v_{кон} = \sqrt{v_{нач}^2 + 2 \cdot g' \cdot \sum_{i=1}^n (l_i \cdot (i_i - w_i))}, \quad (3)$$

где $v_{нач}$ — начальная скорость отцепа, м/с;
 g' — ускорение силы тяжести с учетом инерции вращающихся частей отцепа, м/с²;

l_i — длина участка, м.

Моделирование заканчивалось при достижении конечной точки или при полной остановке отцепа. Результат моделирования выводился на экран в виде графиков.

Для оценки скорости движения вагонов приведен пример реального профиля пути подгорочного парка одной из сортировочных станций (рис. 1, табл. 1).

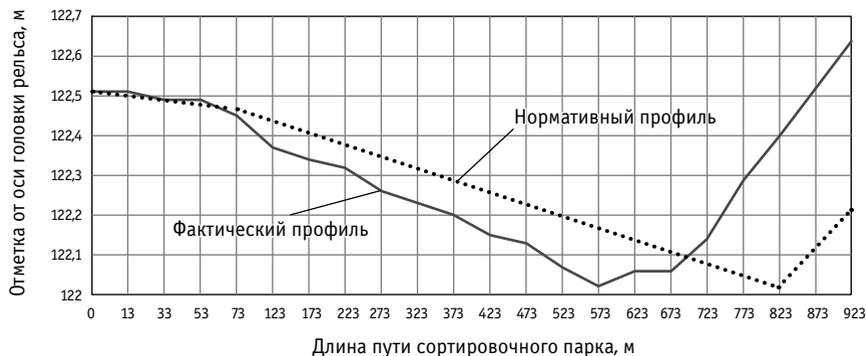


Рис. 1. Профиль пути сортировочного парка

Таблица 1

Длина и уклоны профиля пути сортировочного парка

Номер участка	Длина, м	Уклон, ‰	
		фактический	нормативный
1	12,5	0	0,6
2	20	1	0,6
3	20	0	0,6
4	20	2	0,6
5	50	1,6	0,6
6	50	0,6	0,6
7	50	0,4	0,6
8	50	1,2	0,6
9	50	0,6	0,6
10	50	0,6	0,6
11	50	1	0,6
12	50	0,4	0,6
13	50	1,2	0,6
14	50	1	0,6
15	50	-0,8	0,6
16	50	0	0,6
17	50	-1,6	0,6
18	50	-3	0,6
19	50	-2,2	0,6
20	50	-2,4	-2
21	50	-2,4	-2

Таблица 2

Сопrotивление движению отцепов

Бегун	Род вагона	m , т	$w_{ор}$, Н/кН	$w_{ир}$, Н/кН	c_x	S , м ²
Плохой	Полувагон	20	1,349	0	1,36	8,5
Хороший	Полувагон	80	0,776	0	1,36	8,5

Примечание. m — масса вагона; c_x — коэффициент воздушного сопротивления одиночных вагонов; S — площадь поперечного сечения одиночного вагона в отцепе.

Как видно из рис. 1, на расстоянии 573 м от начальной точки наблюдается понижение профиля, после чего идет противоклон, длина которого составляет 350 м, отметка конца пути отличается от нормативной на 0,42 м.

Исследование включало расчет скорости двух отцепов (хорошего и плохого бегунов) для следующих условий: средней температуры окружающего воздуха для марта 5 °С и скорости ветра 0 м/с.

При моделировании движения отцепов величина основного удельного сопротивления выбиралась равной случайному значению по принципу, описанному в «Правилах и нормах проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм» [14]. Основные характеристики рассматриваемых отцепов приведены в табл. 2.

На рис. 2 представлен график зависимости скорости движения отцепов от пройденного расстояния (при выпуске отцепов из ЗТП со скоростью, равной 4 м/с).

Анализ рис. 2 позволяет сделать следующие выводы.

1. Профиль путей сортировочного парка оказывает очень сильное влияние и на хороший, и на плохой бегун.

2. В начале пути оба бегуна движутся со скоростью, превышающей расчетную, соответствующую нормативному профилю. На расстоянии 573 м скорость снижается, так как в данной точке начинается противоклон. После этого скорость непрерывно падает, и отцепы останавливаются. Плохой бегун — на расстоянии 724 м, не докатываясь до точки остановки, соответствующей нормативному профилю (105 м), т.е. между отцепами образуется «окно». Хороший бегун останавливается в точке 880 м. При нормативном профиле скорость хорошего бегуна в конце сортировочного пути составит 2,5 м/с, следовательно, отцеп не остановится в конце пути. При этом скорость хорошего бегуна от начала сортировочного пути до отметки 850 м будет выше 1,5 м/с. Следует отметить, что хорошие бегуны необходимо распускать с горки с особой осторожностью, так как из-за их низкого основного удельного сопротивления они могут в сортировочном парке набирать скорость.

График, представленный на рис. 3, иллюстрирует зависимость скорости выхода отцепов из ЗТП от расстояния, которое этот отцеп должен пройти в сортировочном парке.

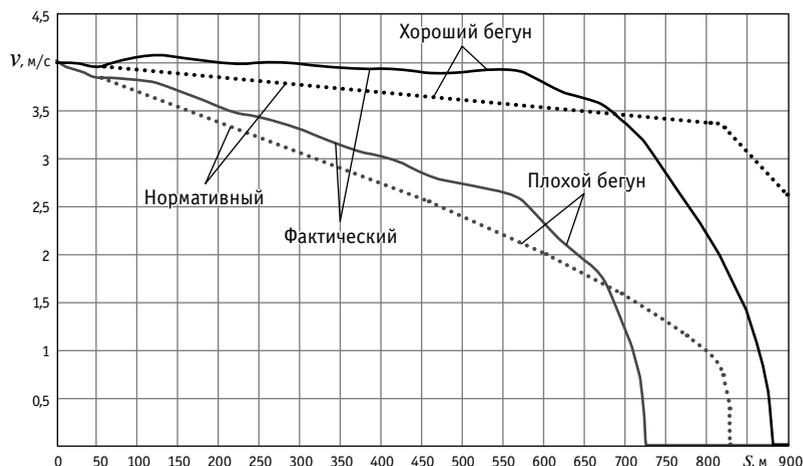


Рис. 2. Зависимость скорости движения отцепов от пройденного расстояния для нормативного и фактического профиля

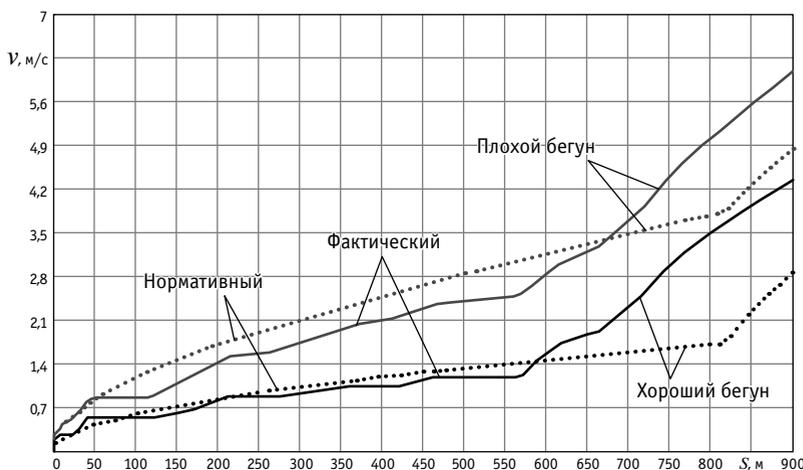


Рис. 3. Зависимости скорости выхода отцепов с ЗТП от расстояния, которое должен пройти отцеп в сортировочном парке, для нормативного и фактического профиля

Как видно из рис. 3, разброс скорости выхода в диапазоне 0,7 м/с (2,1–2,8 м/с) приведет к тому, что место остановки отцепов будет находиться в пределах отметок 380–600 м. Следует отметить, что в настоящее время систе-

мы регулирования скорости движения отцепов автоматизированных сортировочных горок не обеспечивают выпуск отцепов точнее чем 1 м/с, поэтому погрешность в точке остановки может достигать 200 м.

Результаты натурных наблюдений позволяют сделать вывод, что немаловажным фактором в обеспечении безопасности является движение отцепов назад после остановки. В том случае, если отцеп покатится назад, это может привести к тому, что следующий отцеп соударится с ним с большой скоростью. Уравнение, которое описывает условие трогания отцепа [15–17], имеет вид

$$i_{\text{ук}} \geq w + w_{\text{тр}}, \quad (4)$$

где $i_{\text{ук}}$ — уклон участка, на котором остановился отцеп, ‰;

$w_{\text{тр}}$ — сопротивление троганию отцепа с места, Н/кН.

Соответственно в (4) производится сравнение суммы суммарного удельного сопротивления движению отцепа и сопротивления троганию с места с уклоном пути, на котором данный отцеп остановился. В том случае, если уклон превысит значение суммы, отцеп начнет движение назад в сторону горба горки.

Физический смысл сопротивления троганию с места заключается в застывании смазки в роликовых подшипниках при стоянии вагона на месте. В том случае, если с момента остановки отцепа прошло меньше 1 мин, этим сопротивлением можно пренебречь [15–17].

На рис. 4 представлен график выполнения условия (4) для хорошего и плохого бегунов.

Из рис. 4 видно, что после точки 670 м условие трогания отцепов выполняется и для хорошего, и для плохого бегуна. Причем на расстоянии 750 м находится наибольший противоклон, и если остановка произойдет на этом противоклоне, то высока вероятность скатывания отцепа по направлению к спускной части. Следовательно, при роспуске необходимо учитывать вероятность обратного движения отцепа после остановки, зависящую от точки, на которой он остановился.

На рис. 5 представлен график движения по фактическому профилю в случае остановки хорошего и плохого бегуна соответственно в точках 880 и 725 м с учетом возможности скатывания. Непрерывной линией показана скорость при движении вперед, пунктирной — при движении назад.

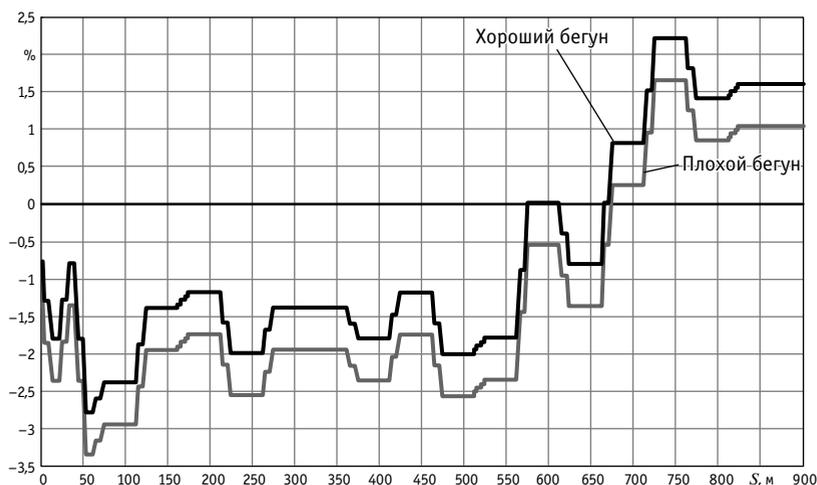


Рис. 4. Выполнение условия самопроизвольного начала движения отцепа в сортировочном парке

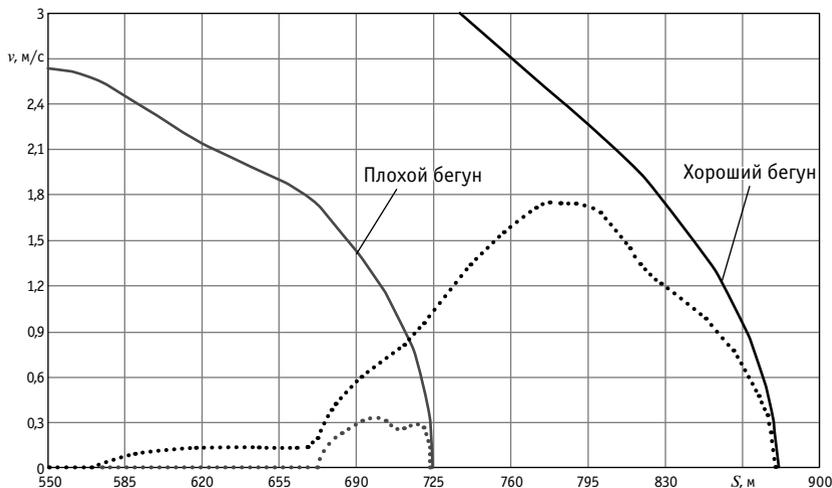


Рис. 5. График изменения скорости движения отцепа при трогании в сторону горба горки

Анализ рис. 5 показывает, что после остановки на расстоянии 880 м хороший бегун начинает движение назад в сторону спускной части горки. При этом в точке 780 м его скорость достигает максимального значения 1,8 м/с. В случае роспуска на данный путь следующего отцепа скорость их соударения будет выше допустимой. На расстоянии 570 м отцеп полностью останавливается, так как противоклон сменяется уклоном. Следовательно, основной точкой остановки данного отцепа необходимо считать 570 м. Плохой бегун также после остановки в точке 725 м начинает движение в сторону спускной части горки. При этом он доезжает до точки в 670 м и останавливается.

Согласно статистике, реальные точки остановки отцепов отличаются от расчетных на 200–300 м, если путь свободен и не произошло соударения со следующими отцепами.

ВЫВОДЫ

1. Искажение профиля оказывает сильное влияние на скорость движения отцепов, что увеличивает эксплуатационные затраты.

2. Из-за несовершенства аппаратуры и искажений профиля невозможно точно вычислить точку остановки отцепа в сортировочном парке. Поэтому необходимо переходить от точек остановки к вероятности остановки отцепа

в определенных точках сортировочного парка.

3. Большие значения противоуклона в конце пути могут привести к тому, что отцеп покатится назад. При этом чем выше противоуклон, тем больше вероятность движения отцепа назад, а значит, в случае роспуска следующего отцепа на

данный путь может произойти их соударение с повышенной скоростью. Таким образом, неправильное определение точки остановки отцепов напрямую влияет не только на перерабатывающую способность, но и на безопасность роспуска.

4. При роспуске отцепов на свободный путь нужно учитывать вероятность

движения отцепа назад после остановки. Если известны скорость выхода отцепа из тормозной позиции и его характеристики, то можно рассчитать полную точку остановки, а следующий отцеп необходимо выпускать со скоростью, при которой соударение в сортировочном парке произойдет с допустимой скоростью.

Литература

1. Югрин О. П., Чечулина Ю. А., Казанцева Л. С. Методика определения взаимосвязи показателей эксплуатационной работы с доставкой груза «точно в срок» // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». 2014. Т. 1. № 1 (56). С. 29.
2. Имитация процесса заполнения пути накопления вагонов в сортировочном парке / В. И. Жуков, С. В. Карасев, О. В. Куценко // Совершенствование эксплуатационной работы железных дорог : сб. науч. тр. Новосибирск, 2002. С. 119–129.
3. Старостина Т. И. Анализ особенностей конструкции продольного профиля сортировочных путей действующих сортировочных станций // Инновационные технологии нового тысячелетия : сб. статей Междунар. науч.-практ. конф., 5 мая 2016 г., Киров ; в 3 ч. Ч. 2. Уфа : Аэтерна, 2016. С. 81–83.
4. Бессоненко С. А. Вероятностный подход к расчету сортировочных горок // Транспорт: наука, техника, управление. 2010. № 3. С. 23–25. ISSN 0236–1914.
5. Шабельников А. Н. Совершенствование технологии работы сортировочных станций // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 2. С. 2–4. ISSN 0005–2329.
6. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Исследование движения вагона в стрелочной зоне сортировочной горки при умеренных климатических условиях // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 13–17. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-13-17. ISSN 1815–9400.
7. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. М., 2012. 190 с.
8. Корниенко К. И. Исследование влияния профиля горки на скорость движения отцепов в сортировочном парке при встречном ветре // Наука и молодежь СГУПС в третьем тысячелетии. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2017. № 6. С. 104–111.
9. Исследование влияния профиля горки на скорость движения отцепов в сортировочном парке при попутном ветре / Е. А. Ахмаев, С. А. Бессоненко, В. В. Борисов, К. И. Корниенко // Вестник СГУПС. 2017. № 1 (40). С. 13–18. ISSN 1815–9265.
10. Корниенко К. И. Исследование опасности образования противоуклона в сортировочном парке // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 80–83.
11. Корниенко К. И. Программа для имитационного моделирования скорости движения отцепа в сортировочном парке «СортПарк» // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». 2017. № 6 (97). С. 54.
12. Корниенко К. И. Алгоритм расчета точки остановки отцепа в сортировочном парке // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 11. С. 36–40. ISSN 0236–1914.
13. Пособие по применению правил и норм проектирования сортировочных устройств / Ю. А. Муха, Л. Б. Тишков, В. П. Шейкин и др. М. : Транспорт, 1994. 220 с.
14. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. М. : Техинформ, 2003. 168 с.
15. Пособие по проектированию промышленных железнодорожных станций. М. : Стройиздат, 1990. 199 с.
16. Кузьмич В. Д., Руднев В. С., Френкель С. Я. Теория локомотивной тяги : учеб. для вузов ж.-д. трансп. М. : Маршрут, 2005. 448 с.
17. Бабичков А. М., Гурский П. А., Новиков А. П. Тяга поездов и тяговые расчеты : учеб. для вузов ж.-д. трансп. М. : Транспорт, 1971. 280 с.

References

1. Yugrina O. P., Chechulina Yu. A., Kazantseva L. S. Metodika opredeleniya vzaimosvyazi pokazateley ekspluatatsionnoy raboty s dostavkoy gruzha «tochno v srok» [Methodology for determining the interaction between the indicators of operational work with the delivery of goods «exactly in time»] // Khroniki ob#edinennogo fonda elektronnykh resursov «Nauka i obrazovanie». 2014. T. 1. № 1 (56). S. 29.
2. Imitatsiya protsessa zapolneniya puti nakopleniya vagonov v sortirovochnom parke [Simulation of the process of filling the way of accumulation of cars in the sorting park] / V. I. Zhukov, S. V. Karasev, O. V. Kutsenko // Sovershenstvovanie ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog : sb. nauch. tr. Novosibirsk, 2002. S. 119–129.
3. Starostina T. I. Analiz osobennostey konstruktсии prodol'nogo profilya sortirovochnykh putey deystvuyushchikh sortirovochnykh stantsiy [Analysis of the structural features of the longitudinal profile of the existing sorting stations] // Innovatsionnye tekhnologii novogo tysyacheletiya : sb. statey Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 5 maya 2016 g., Kirov ; v 3 ch. Ch. 2. Ufa : Aeterna, 2016. S. 81–83.
4. Bessonenko S. A. Veroyatnostnyy podkhod k raschetu sortirovochnykh gorok [Probabilistic approach to the calculation of sorting humps] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2010. № 3. S. 23–25. ISSN 0236-1914.
5. Shabel'nikov A. N. Sovershenstvovanie tekhnologii raboty sortirovochnykh stantsiy [Improvement of the technology of sorting stations] // Avtomatika, svyaz', informatika. 2011. № 2. S. 2–4. ISSN 0005-2329.
6. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Issledovanie dvizheniya vagona v strelochnoy zone sortirovochnoy gorki pri umernnykh klimaticheskikh usloviyakh [Research of railway car movement in the points area of the hump in moderate climatic conditions] // Transport Urala. 2016. № 4 (51). S. 13–17. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-13-17. ISSN 1815-9400.
7. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii [Rules of technical operation of the Russian Federation railways]. M., 2012. 190 s.
8. Kornienko K. I. Issledovanie vliyaniya profilya gorki na skorost' dvizheniya ottsepov v sortirovochnom parke pri vstrechnom vetre [Study of the effect of the profile of the hump on the speed of cars movement in the sorting park under headwind] // Nauka i molodezh' SGUPSa v tretyem tysyacheletii. Novosibirsk : Izd-vo SGUPS, 2017. № 6. S. 104–111.
9. Issledovanie vliyaniya profilya gorki na skorost' dvizheniya ottsepov v sortirovochnom parke pri poputnom vetre [The impact of the falling gradient of classification tracks on the car speed under favoring wind] / E. A. Akhmaev, S. A. Bessonenko, V. V. Borisov, K. I. Kornienko // Vestnik SGUPS. 2017. № 1 (40). S. 13–18. ISSN 1815-9265.
10. Kornienko K. I. Issledovanie opasnosti obrazovaniya protivouklona v sortirovochnom parke [Investigating the dangers of forming an anti-slope in a sorting park] // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2017. T. 1. S. 80–83.
11. Kornienko K. I. Programma dlya imitatsionnogo modelirovaniya skorosti dvizheniya ottsepa v sortirovochnom parke «SortPark» [The program for simulation of the speed of the car movement in the sorting park «SortPark»] // Khroniki ob#edinennogo fonda elektronnykh resursov «Nauka i obrazovanie». 2017. № 6 (97). S. 54.
12. Kornienko K. I. Algoritm rascheta tochki ostankovki ottsepa v sortirovochnom parke [Algorithm for calculating the stopping point of the trailer in the sorting park] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2017. № 11. S. 36–40. ISSN 0236-1914.
13. Posobie po primeneniyu pravil i norm proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv [Manual on the application of rules and norms for the design of sorting devices] / Yu. A. Mukha, L. B. Tishkov, V. P. Sheykin i dr. M. : Transport, 1994. 220 s.
14. Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm [Rules and regulations for design of sorting devices on 1520 mm railways tracks]. M. : Tekhinform, 2003. 168 s.
15. Posobie po proektirovaniyu promyshlennykh zheleznodorozhnykh stantsiy [Manual for the design of industrial railway stations]. M. : Stroyizdat, 1990. 199 s.
16. Kuz'mich V. D., Rudnev V. S., Frenkel' S. Ya. Teoriya lokomotivnoy tyagi : ucheb. dlya vuzov zh.-d. transp. [Theory of locomotive traction : a textbook for railway universities]. M. : Marshrut, 2005. 448 s.
17. Babichkov A. M., Gurskiy P. A., Novikov A. P. Tyaga poezdov i tyagovye raschety : ucheb. dlya vuzov zh.-d. transp. [Train traction and traction calculations : a textbook for railway universities]. M. : Transport, 1971. 280 s.

УДК 504.054

Владимир Григорьевич Булаев, доктор технических наук, заведующий центром «Экологическая безопасность» Института дополнительного профессионального образования Уральского государственного университета путей сообщения (ИДПО Ургупс), Екатеринбург, Россия

ПРИРОДООХРАННАЯ СЛУЖБА КАК ИНСТРУМЕНТ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Vladimir Grigorievich Bulaev, DSc in Engineering, Head of Environmental Safety Centre, Institute of Further Professional Education, Ural State University of Railway Transport (IFPE USURT), Ekaterinburg, Russia

Environmental service as an instrument of environmental safety of the railway enterprise

Аннотация

В статье проанализированы изменения, происходящие в российском экологическом законодательстве и нормативной документации по защите окружающей среды. Показано, что на многих предприятиях ОАО «РЖД» разрабатывается и внедряется система экологического менеджмента с перспективой получения международного сертификата на соответствие стандарту ISO 14001:2015. Это вызывает необходимость создания (укрепления) служб охраны окружающей среды и укомплектования их высококвалифицированными кадрами. Сформулированы основные требования к экологу предприятия и обозначен круг обязанностей, которые он должен выполнять. Особое внимание уделено подготовке специалистов экологического профиля, а также обучению знаниям по экологической безопасности руководителей, ответственных за принятие решений, которые оказывают или могут оказать негативное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: экологическая служба предприятия, охрана окружающей среды, обращение с опасными отходами, природопользователь, система экологического менеджмента.

Summary

The article analyzes the changes taking place in the Russian environmental legislation and normative documentation for environmental protection. It is shown that many enterprises of JSC Russian Railways develop and implement an environmental management system with the prospect of obtaining an international certificate for compliance with the ISO 14001:2015 standard. This calls for the creation (strengthening) of environmental protection services and their staffing with highly qualified personnel. The basic requirements to the ecologist of the enterprise are formulated and the terms of duties that it must fulfill are outlined. Particular attention is paid to the training of specialists in the environmental profile, as well as to training in environmental safety of decision-makers.

Keywords: environmental service of the enterprise, environmental protection, management of hazardous wastes, nature user, environmental management system.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-54-59

В последние годы в экологическом законодательстве и нормативных документах по защите окружающей среды происходят значительные изменения. В частности, вводятся новые нормы по экологическим платежам, меняются требования к инвентаризации источников загрязнения атмосферы, производственному контролю, лицензированию, но больше всего нововведений появляется в сфере обращения с опасными отходами. Многие компании разрабатывают и внедряют систему экологического менеджмента (СЭМ). Соответственно на предприятиях резко повышается роль служб (отделов) охраны окружающей среды, что требует их укомплектования квалифицированными кадрами и оснащения экологических лабораторий современным оборудованием.

Сегодня в Российской Федерации действует более 40 федеральных законов и 140 ГОСТов, в которых в той или иной мере отражены вопросы охраны окружающей среды и которые формируют для предприятий нормативную базу, учитывая меняющиеся экологические условия при соблюдении социально-экономических интересов. Большое количество нормативно-правовых документов в области природопользования может поставить экологическую службу предприятия в затруднительное положение, однако следует помнить, что многие из этих документов не имеют юридической силы и носят лишь рекомендательный характер (например, письма и разъяснения органов исполнительной власти).

Назовем основные законы, которыми должны руководствоваться специалисты экологической службы:

- «Об охране окружающей среды» [1];
- «Об охране атмосферного воздуха» [2];
- «Об отходах производства и потребления» [3];
- «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [4];
- «Об экологической экспертизе» [5];
- «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» [6].

Вместе с тем действующая законодательная база в области природопользования не лишена недостатков. В частности, отдельные законы могут противоречить друг другу. Так, согласно ст. 1 закона «О техническом регулировании» его действие не распространяется на экологическое нормирование [7]. В то же время соблюдение требований ГОСТов при экологическом нормировании вполне правомерно, что подтверждается ст. 37 закона «Об охране окружающей среды» [1] (в ред. от 13.07.2015 г.), которая вводит обязательную проверку утвержденных проектов на соответствие требованиям технических регламентов в области охраны окружающей среды.

Современные условия диктуют необходимость создавать на предприятиях экологические службы и (или) назначать должностных лиц, занимающихся вопросами охраны окружающей среды. Однако на практике руководители предприятий часто или не понимают важность экологической безопасности, или пытаются оптимизировать структуру компании за счет упразднения экологической службы, передавая ее обязанности другим подразделениям (например, службам охраны труда и промышленной безопасности, наличие которых в соответствии с Трудовым кодексом Российской Федерации в ред. от 03.07.2016 г. является обязательным).

Не добавили ясности и изменения, внесенные в ст. 67 закона «Об охране окружающей среды» [1]. Если в ранней редакции этой статьи (от 10.01.2002 г.) говорилось, что «субъекты хозяйственной и иной деятельности обязаны представлять сведения о лицах, ответственных за проведение производственного экологического контроля, об организации экологических служб на объектах хозяйственной и иной деятельности, а также результаты производственного экологического контроля в соответствующий орган государственного надзора», то последняя редакция (от 03.07.2016 г.) таких положений не содержит, соответственно это дает возможность многим предприятиям не создавать экологические службы.

Но, с другой стороны, действующая ст. 67 закона № 7-ФЗ содержит более конкретные требования к производственному экологическому контролю (ПЭК):

производственный экологический контроль «осуществляется в целях обеспечения выполнения в процессе хозяйственной и иной деятельности мероприятий по охране окружающей среды, рациональному использованию и восстановлению природных ресурсов, а также в целях соблюдения требований в области охраны окружающей среды, установленных законодательством в области охраны окружающей среды» [1];

предприятия, «осуществляющие хозяйственную и (или) иную деятельность на объектах I, II и III категорий, разрабатывают и утверждают программу производственного экологического контроля, осуществляют производственный экологический контроль в соответствии с установленными требованиями, документируют информацию и хранят данные, полученные по результатам осуществления производственного экологического контроля» [1];

программа ПЭК содержит сведения об инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, сбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, отходов производства и потребления и объектов их размещения [1].

Кроме того, в соответствии с установленными законом требованиями природопользователь обязан осуществлять ПЭК, организовывать подразделение и назначать должностных лиц, ответственных за осуществление ПЭК, до завершения разработки программы ПЭК.

Закон «Об охране атмосферного воздуха» (п. 1 ст. 25 в ред. от 13.07.2015 г.) тоже предусматривает обязанность предприятия назначать лиц, ответственных за проведение ПЭК за охраной атмосферного воздуха и (или) организовывать экологические службы [2].

В соответствии с п. 1 ст. 19 закона «Об отходах производства и потребления» [3] (в ред. от 03.07.2016 г.) предприятия должны вести в установленном порядке учет образовавшихся, утилизированных, обезвреженных, передаваемых другим лицам или полученных от других лиц, а также размещенных отходов. Согласно п. 6 Порядка учета в области обращения с отходами, утвержденного Приказом Минприроды России от 01.09.2011 г. № 721 (в ред. от 25.06.2014 г.) ведение соответствующей документации возлагается на сотрудника, отвечающего за образование и движение отходов на предприятии [8].

Формулировки вышеупомянутых законов весьма размыты, но даже в таком виде они позволяют сделать вывод о необходимости создания на предприятиях экологических служб.

Тем не менее в Российской Федерации до сих пор отсутствует нормативно-правовой акт, регламентирующий обязательное наличие в штатном расписании экологов. Однако министерство труда и социальной защиты приказом от 31.10.2016 г. № 591н утвердило и ввело в действие профессиональный стандарт «Специалист по экологической безопасности (в промышленности)» [9]. Стандарт зарегистрирован в Минюсте России 25.11.2016 г. № 44450 (т.е. подлежит неукоснительному исполнению) и вступил в силу 10.12.2016 г.

Необходимость организации экологических служб на предприятиях ОАО «РЖД» обусловлена деятельностью компании по разработке и внедрению СЭМ с перспективой получения международного сертификата на соответствие стандарту ISO 14001:2015 (его аналог в России — ГОСТ ИСО 14001–2016 [10]).

Следует отметить, что пока в России сертификация предприятий на соответствие международному стандарту ISO 14001 идет значительно медленнее, чем в других странах, где с момента принятия первого варианта стандарта (1996 г.) началось бурное развитие этого процесса (рис. 1). Так, согласно данным ISO, на начало 2016 г. по стандарту СЭМ 14001 сертифицировано 319 324 компании из 170 стран. Три первых места в мире занимают Китай — 114 303 компании, Япония — 26 069, Италия — 22 350, в странах СНГ — Россия (1156), Беларусь (430) и Казахстан (136). В ОАО «РЖД» сертифицировано более 80 предприятий, что, безусловно, недостаточно для такой крупной компании.

Поскольку новая версия международного стандарта ISO 14001:2015 по сравнению с двумя первыми версиями (1996 и 2004 гг.) содержит значительные изменения, рассмотрим основные из них.

Одно из важных нововведений стандарта — приведение структуры СЭМ в соответствие с циклом PDCA аналогично ISO 9001:2015 (рис. 2). То есть все процессы системы экологического

менеджмента должны рассматриваться и выполняться так же, как и процессы системы менеджмента качества. Это усовершенствование сделано для удобства интегрированного применения стандартов на системы менеджмента и предусматривает управление предприятием по единому порядку с учетом требований в области качества, экологии, безопасности и т. д. В контексте охраны окружающей среды это может распространяться на единый порядок документооборота, соблюдение природоохранных требований при выборе поставщиков и подрядчиков или при обучении персонала.

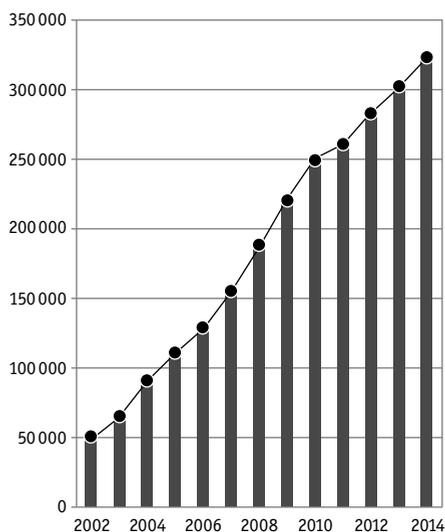


Рис. 1. Количество сертификатов ISO 14001:2004, выданных в мире в 2002–2014 гг. (по данным ISO)

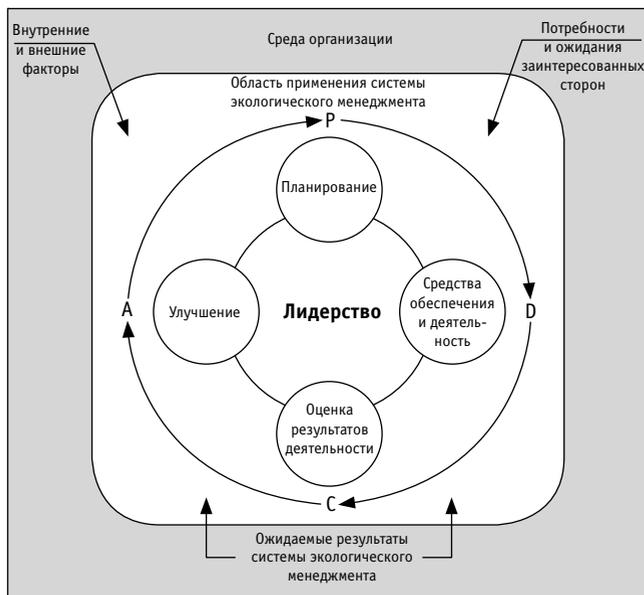


Рис. 2. Взаимосвязь между моделью PDCA и структурой ISO 14001:2015

Внесены принципиальные изменения по сравнению с предыдущим стандартом ISO 14001:2004. Например, ранее выданные сертификаты теперь должны переоформляться в течение ближайших трех, а не полутора лет, как было прежде. Отсчет начат с четвертого квартала 2015 г. и продлится до 2018 г. Коснется эта работа и предприятий ОАО «РЖД», которые сертифицированы по стандарту ISO 14001:2004.

Кроме того, в стандарте ISO 14001:2015 появились изменения в терминологии, касающиеся СЭМ: стратегический экологический менеджмент (strategic environmental management), лидерство, защита окружающей среды, экологические показатели (environmental performance), мышление, ориентированное на жизненный цикл (lifecycle thinking), коммуникация и документация.

Также введено новое понятие — контекст (окружение) организации. Организация существует в определенном контексте, т. е. среде, которая должна соответствовать как интересам организации, так и интересам окружающего мира. В соответствии с новыми требованиями организация должна уделять особое внимание вопросам, которые могут повлиять на ее контекст.

В стандарте ISO 14001:2015 расширены требования к защите окружающей среды. Если в предыдущей версии стандарта акцент был сделан только на намерениях, то в последней версии — на конкретных результатах снижения негативного воздействия выбросов и сбросов на природу. В соответствии с ISO 14001:2015 организация должна уделять внимание предотвращению загрязнений, сокращению использования природных ресурсов, влиянию выбросов на изменение климата, защите биоразнообразия и экосистем и пр.

Следует отметить принципиальное отличие системы экологического менеджмента от производственного экологического контроля, которое состоит в том, что теперь ответственность за охрану окружающей среды возлагается не только на экологическую службу, но и на каждого сотрудника предприятия, будь то монтер пути или руководитель компании.

Предприятиям ОАО «РЖД», которые разрабатывают и внедряют СЭМ с дальнейшей перспективой сертификации по ISO 14001:2015, потребуется персонал, прошедший обучение для выполнения этих работ, что является дополнительным аргументом в пользу создания экологической службы. В первую очередь к обучению нужно привлекать руководителей предприятий, на которых возлагается ответственность за разработку и внедрение СЭМ.

Современный руководитель должен осознавать, что лучше иметь в штате квалифицированного эколога, чем платить далеко не малые штрафы, наложенные после проверки надзорными органами. В частности, в соответствии со ст. 8.2 КоАП (в ред. от 07.03.2017 г.) [11] «несоблюдение экологических и санитарно-эпидемиологических требований при сборе, накоплении, использовании, обезвреживании, транспортировании, размещении и ином обращении с отходами производства и потребления, веществами, разрушающими озоновый слой, или иными опасными веществами влечет наложение административного штрафа»:

- на граждан — от 1000 до 2000 руб.;
- на должностных лиц — от 10000 до 30000 руб.;

на юридических лиц — от 100000 до 250000 руб. или административное приостановление деятельности на срок до 90 сут.

В сложившейся ситуации, в период обострения экологических проблем, можно прогнозировать в среднесрочной перспективе рост спроса на инженеров-экологов, а российские компании должны подготовиться к расширению штата «зеленых» сотрудников.

В настоящее время в вузах есть несколько специальностей, выпускники которых уже подтвердили свою профессиональную пригодность для такой работы. Это «Техносферная безопасность» (код специальности 20.03.01), магистратура (код специальности 20.04.01), аспирантура (код специальности 20.03.01).

Специалистов экологического профиля начали готовить в последней четверти минувшего века — этого требовал Квалификационный справочник. В тот период общепризнанной в нашей стране для выпускников вузов была квалификация «инженер», в современном понимании — «специалист». В настоящее время большое количество высших учебных заведений выпускает специалистов экологического профиля по двум направлениям — бакалавр (на базе среднего общего или среднего профессионального образования) и магистр (на базе бакалавриата). Причем не имеет большого значения, в каком вузе получено базовое экологическое образование, это не ограничивается законом «О высшем и послевузовском профессиональном образовании» [12].

В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 30.12.2009 г. № 1136 специальности, непосредственно связанные с охраной окружающей среды и обеспечением экологической безопасности, относятся к группе «Безопасность жизнедеятельности» (код направления 280000) [13].

Остановимся на том, что входит в круг обязанностей эколога на предприятии.

Прежде всего, эколог должен постоянно следить за всеми изменениями в федеральных законах, а также подзаконных актах. В повседневной работе рекомендуется использовать действующие нормативно-технические документы (ГОСТы, ОСТы, ТУ, РТМ, РД, нормы расхода сырья и материалов и т.д.), различные формы статистической отчетности, отраслевые материальные балансы по видам производства и эксплуатационных служб, отраслевые справочники по образованию отходов производства, что особенно важно для предприятий, которые решили вводить СЭМ с последующей сертификацией по международному стандарту ISO 14001:2015. Следует отметить, что последнее является добровольным решением предприятия.

Поскольку законодательные инициативы чаще всего направлены на усиление контроля, а поэтому увеличивают документооборот, мы рекомендуем прописать ключевые документы, за составление и достоверность которых отвечает эколог, в должностной инструкции.

Далее, эколог должен взаимодействовать с природоохранными структурами, что включает в себя участие в проверках (плановых, по результатам предписаний, внеплановых) и регулярную отчетность. Таким образом, эколог представляет и защищает (обосновывает) перед контролирующими структурами отчеты, расчеты и иную документацию. Безусловно, чтобы

выполнять эти обязанности, необходимо хорошо разбираться в законодательстве, уметь правильно интерпретировать законодательные нормы, защищать интересы предприятия и его законные права.

В сферу деятельности эколога на предприятии входит работа по договорам с другими организациями (например, подрядными). Причем часть договоров находится в непосредственном ведении специалиста-эколога (например, вывоз отходов, инструментальный контроль за загрязнением атмосферы, воды, уровнем шума, разработка нормативов ПДВ, НДС, ПНООЛР).

Соответствия требованиям законодательства желательно добиваться максимально эффективным путем, ведь известно, что лучше предотвращать негативные воздействия, чем бороться с их последствиями. Таким образом, эколог анализирует природоохранную деятельность на предприятии, выявляет наиболее затратные процессы (например, исходя из рассчитываемой суммы платежей за негативное воздействие на окружающую среду). На этой основе он составляет план мероприятий по охране окружающей среды, участвует в обосновании природоохранных инвестиций, сопровождает внедрение разработанных мероприятий, а также отвечает за планирование и бюджетирование в сфере своей компетенции.

В должностной инструкции должен быть отдельный пункт, посвященный функциям эколога в нестандартных ситуациях. В зависимости от организационной структуры предприятия это может быть и оценка экологической ситуации, и участие в составе штаба руководства операциями по ликвидации аварий (ШРО), и др.

Безусловно, для того чтобы выполнять все эти обязанности, эколог должен иметь право получать доступ к необходимой информации, принимать участие в совещаниях, контролировать производственные процессы, вносить предложения по их совершенствованию, подписывать и визировать документы в пределах своих полномочий и, наконец, ставить вопрос о рассмотрении возможности повышения своей компетентности.

Эколог, как лицо, официально отвечающее за охрану окружающей среды на предприятии, может привлекаться к ответственности как должностное и физическое лицо (в пределах, указанных действующим гражданским и уголовным законодательством РФ) за невыполнение должностных обязанностей и правонарушения, совершенные в процессе осуществления своей деятельности.

Кадровое обеспечение службы охраны окружающей среды, в том числе необходимое число штатных сотрудников, — один из самых актуальных вопросов для экологов, работающих на предприятиях, в том числе и на железнодорожных. В настоящее время квалифицированные экологи необходимы для внедрения СЭМ на предприятиях ОАО «РЖД». Без их подготовительной работы и положительного заключения ни одно подразделение не сможет приступить к внедрению СЭМ. Более того, каждое предприятие должно вести деятельность под контролем инженеров-экологов.

В соответствии с российским экологическим законодательством требования в отношении знаний по охране окружающей среды предъявляются при назначении на должность

руководителей и специалистов, т.е. наряду со специалистами по охране окружающей среды руководство предприятия (генеральный директор, главный инженер, главные специалисты — механик, энергетик, технолог и другие должностные лица преимущественно технического профиля) должно обладать знаниями по экологической безопасности. Кроме того, современными экологическими знаниями должны владеть все руководители предприятий, ответственные за принятие решений при осуществлении хозяйственной или иной деятельности, которая оказывает или может оказывать негативное воздействие на окружающую среду [14].

Необходимость экологического обучения руководителей предприятия и ответственных лиц определена ст. 73 закона «Об охране окружающей среды» [1], а необходимость обучения

лиц, допущенных к работе с опасными отходами I–IV класса, — ст. 15 закона «Об отходах производства и потребления» [3].

Как показывает практика обучения по обращению с опасными отходами производства и потребления в центре «Экологическая безопасность» ИДПО УргУПС, руководители, прошедшие обучение, осознают необходимость внедрения на предприятии мероприятий по охране окружающей среды, понимают, что нельзя игнорировать экологические требования, и начинают ценить работу специалиста-эколога. А экологическая служба, в свою очередь, должна доказывать руководителям предприятий, что свободная рыночная экономика может хорошо уживаться с экономическими требованиями и ограничениями, а это предполагает получение конкурентных преимуществ за счет мер по минимизации ущерба окружающей среде.

Литература

1. Об охране окружающей среды : федер. закон Рос. Федерации от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ (в ред. от 03.07.2016 г.).
2. Об охране атмосферного воздуха : федер. закон Рос. Федерации от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ (в ред. от 13.07.2015 г.).
3. Об отходах производства и потребления : федер. закон Рос. Федерации от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ (в ред. от 29.06.2015 г.).
4. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения : федер. закон Рос. Федерации от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ (в ред. от 13.07.2015 г.).
5. Об экологической экспертизе : федер. закон Рос. Федерации от 23.11.1995 г. № 174-ФЗ (в ред. от 13.07.2015 г.).
6. О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля : федер. закон Рос. Федерации от 26.12.2008 г. № 294-ФЗ (в ред. от 01.01.2017 г.).
7. О техническом регулировании : федер. закон Рос. Федерации от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ.
8. Порядок учета в области обращения с отходами : утв. приказом Минприроды России от 01.09.2011 г. № 721 [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/2175554/#ixzz50vx8HIQH> (дата обращения: 14.03.2017 г.).
9. Профессиональный стандарт. Специалист по экологической безопасности (в промышленности) : утв. приказом Министерства труда и социальной защиты Рос. Федерации от 31.10.2016 г. № 591н.
10. ГОСТ Р ИСО 14001–2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. М. : Стандартинформ, 2016.
11. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 г. № 195-ФЗ (в ред. от 07.03.2017 г.).

References

1. Ob okhrane okruzhayushey sredy : feder. zakon Ros. Federatsii ot 10.01.2002 g. № 7-FZ (v red. ot 03.07.2016 g.) [On the protection of the environment : Federal law of the Russian Federation on 10.01.2002 No. 7-FZ (as amended dated 03.07.2016)].
2. Ob okhrane atmosfernogo vozdukh : feder. zakon Ros. Federatsii ot 04.05.1999 g. № 96-FZ (v red. ot 13.07.2015 g.) [On the protection of atmospheric air : Federal law of the Russian Federation on 04.05.1999 No. 96-FZ (as amended dated 13.07.2015)].
3. Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya : feder. zakon Ros. Federatsii ot 24.06.1998 g. № 89-FZ (v red. ot 29.06.2015 g.) [On wastes of production and consumption : Federal law of the Russian Federation on 24.06.1998 No. 89-FZ (as amended dated 29.06.2015)].
4. O sanitarno-epidemiologicheskoy blagopoluchii naseleniya : feder. zakon Ros. Federatsii ot 30.03.1999 g. № 52-FZ (v red. ot 13.07.2015 g.) [On the sanitary and epidemiological welfare of the population : Federal law of the Russian Federation on 30.03.1999 No. 52-FZ (as amended dated 13.07.2015)].
5. Ob ekologicheskoy ekspertize : feder. zakon Ros. Federatsii ot 23.11.1995 g. № 174-FZ (v red. ot 13.07.2015 g.) [On environmental impact assessment : Federal law of the Russian Federation on 23.11.1995 No. 174-FZ (as amended dated 13.07.2015)].
6. O zaschite prav yuridicheskikh lits i individual'nykh predprinimateley pri osuschestvlenii gosudarstvennogo kontrolya (nadzora) i municipal'nogo kontrolya : feder. zakon Ros. Federatsii ot 26.12.2008 g. № 294-FZ (v red. ot 01.01.2017 g.) [On the protection of the rights of legal entities and individual entrepreneurs in the exercise of state control (supervision) and municipal control : Federal law of the Russian Federation on 26.12.2008 No. 294-FZ (as amended dated 01.01.2017)].
7. O tekhnicheskoy regulirovaniy : feder. zakon Ros. Federatsii ot 27.12.2002 g. № 184-FZ [On technical regulation : Federal law of the Russian Federation on 27.12.2002 No. 184-FZ].
8. Poryadok ucheta v oblasti obrascheniya s otkhodami : utv. prikazom Minprirody Rossii ot 01.09.2011 g. № 721 [The order of accounting in the field of waste management : approved by order of the Ministry of Natural Resources of Russia on 01.09.2011 No. 721]. [Electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/2175554/#ixzz50vx8HIQH> (access date: 14.03.2017).
9. Professional'nyy standart. Spetsialist po ekologicheskoy bezopasnosti (v promyshlennosti) : utv. prikazom Ministerstva truda i sotsial'noy zaschity Ros. Federatsii ot 31.10.2016 g. № 591n [Professional standard. Specialist on environmental safety (in industry) : approved by order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation on 31.10.2016 No. 591n].
10. GOST R ISO 14001–2016. Sistemy ekologicheskogo menedzhmenta. Trebovaniya i rukovodstvo po primeneniyu [Systems of ecological management. Requirements and guidance for use]. M. : Standartinform, 2016.
11. Kodeks Rossiyskoy Federatsii ob administrativnykh pravonarusheniyakh ot 30.12.2001 g. № 195-FZ (v red. ot 07.03.2017 g.) [Code of the Rus-

12. О высшем и послевузовском профессиональном образовании : федер. закон Рос. Федерации от 22.08.1996 г. № 125-ФЗ (в ред. от 03.12.2011 г.).
13. Об утверждении перечня направлений подготовки (специальностей) высшего профессионального образования, по которым установлены иные нормативные сроки освоения основных образовательных программ высшего профессионального образования (программ бакалавриата, программ подготовки специалиста или программ магистратуры) и перечня направлений подготовки (специальностей) высшего профессионального образования, подтверждаемого присвоением лицу квалификации (степени) «специалист» : постановление Правительства Рос. Федерации от 30.12.2009 г. № 1136 [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/197076/#ixzz50vvhz2J2e> (дата обращения: 14.03.2017 г.).
14. Алымова В. А. Экологической службе быть! // Справочник эколога. 2016. № 10. ISSN 2309–6268.
- sian Federation on administrative offenses on 30.12.2001 No. 195-FZ (as amended dated 07.03.2017)].
12. O vysshem i poslevuzovskom professional'nom obrazovanii : feder. zakon Ros. Federatsii ot 22.08.1996 g. № 125-FZ (v red. ot 03.12.2011 g.) [On higher and postgraduate professional education : Federal law of the Russian Federation on 22.08.1996 No. 125-FZ (as amended dated 03.12.2011)].
13. Ob utverzhdenii perechnya napravleniy podgotovki (spetsial'nostey) vysshego professional'nogo obrazovaniya, po kotorym ustanovleny inye normativnye sroki osvoeniya osnovnykh obrazovatel'nykh programm vysshego professional'nogo obrazovaniya (programm bakalavriata, programm podgotovki spetsialista ili programm magistratury) i perechnya napravleniy podgotovki (spetsial'nostey) vysshego professional'nogo obrazovaniya, podtverzhdaemogo prisvoeniem litsu kvalifikatsii (stepeni) «spetsialist» : postanovlenie Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 30.12.2009 g. № 1136 [On approval of the list of training directions (specialties) of higher professional education, for which other normative terms have been established for mastering the basic educational programs of higher professional education (bachelor's programs, specialist training programs or master's programs) and a list of areas for training (specialties) in higher professional education, confirmed by the assignment to a person of the qualification (degree) «specialist» : the Decree of the Government of the Russian Federation on 30.12.2009 No. 1136]. [Electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/197076/#ixzz50vvhz2J2e> (access date: 14.03.2017).
14. Alymova V. A. Ekologicheskoy sluzhbe byt'! [Ecological service to be!] // Spravochnik ekologa. 2016. № 10. ISSN 2309-6268.

УДК 331.1

Татьяна Аркадьевна Лунина, кандидат экономических наук, доцент, заведующая кафедрой «Менеджмент на транспорте» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия, Сергей Анатольевич Давыдов, аспирант Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ РЕМОНТА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПУТЕВЫХ МАШИННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Tatyana Arkadyevna Lunina, PhD in Economics, Associate Professor, Head of Management in Transport Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia,

Sergey Anatolyevich Davydov, postgraduate student, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

Algorithm for evaluation of repair and operation of track machine complexes based on monitoring of key performance indicators

Аннотация

Повышение эффективности работы перевозочного комплекса и безопасности движения поездов предопределяет необходимость использования новых методов и научных подходов к системе управления капитальным ремонтом основных производственных средств, устройств СЦБ, контактной сети, верхнего строения пути и других объектов железных дорог.

В соответствии с условиями эксплуатационной работы филиалов ОАО «РЖД» возникает необходимость использовать в действующем процессе капитального ремонта пути цифровые модели и спутниковые информационно-технологические системы (далее — ИТ-системы), оснащать ими путевые машинные комплексы, что предопределяет в дальнейшем переход к «безлюдным» и спутниковым технологиям.

На протяжении последних 5 лет предприятия Западно-Сибирской дирекции по ремонту пути внедряют различные ИТ-системы, которые позволяют повышать качество ремонта и производительность путевых машинных комплексов, снижать затраты рабочего времени, проводить мониторинг выполнения ключевых показателей эффективности в режиме реального времени.

Ключевые слова: мониторинг, путевой машинный комплекс, ключевые показатели эффективности, производительность машины, ремонт и эксплуатация, ресурсный потенциал, ИТ-система.

Summary

The increase in the efficiency of the transportation complex and the safety of train traffic predetermines the need to use new methods and scientific approaches to the capital repair management system for the main production facilities, the signaling devices, the contact network, the upper structure of the track and other objects of railways.

In accordance with the operating conditions of the branches of JSC Russian Railways, it becomes necessary to use digital models and satellite information technology systems (hereinafter — IT systems) in the current process of overhauling the way, equip them with track machine complexes, which predetermines the transition to «uninhabited» and satellite technologies.

Over the past 5 years, enterprises of the West Siberian Railway Repair Directorate have been implementing various IT systems that improve the quality of repair and performance of track machine complexes, reduce the cost of working hours, monitor the performance of key performance indicators in real time.

Keywords: monitoring, track machine complex, key performance indicators, machine performance, repair and maintenance, resource potential, IT system.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-60-64

В настоящее время в структурных подразделениях ОАО «РЖД» оценка достоверности результатов, получаемых при диагностике ресурсного технологического потенциала путевых машин, выполняется по методикам, нередко существенно отличающимся друг от друга. В этих методиках, в частности, не принимается в расчет многообразие факторов и параметров, не учитывается их влияние друг на друга. Соответственно результаты оценки по степени достоверности и эффективности функционирования средств технической диагностики получают несопоставимыми.

Согласно теории математической статистики, анализ единичных выборок не может считаться репрезентативным, а оценки, полученные при использовании подобного исходного материала, являются далекими от истины [1, 2].

При формировании научно-методических основ и разработке алгоритма мониторинга и оценки ключевых показателей эффективности исследуемого объекта должны быть выбраны контролируемые и измеряемые показатели, что в современных условиях эксплуатации путевых машинных комплексов, обеспечивающих процесс капитального ремонта пути, возможно только с применением цифровых и спутниковых информационных систем. На основе полученных данных определяются параметры и цели мониторинга (рис. 1).

Именно информационная система позволяет формировать данные о выполнении ключевых показателей, предоставлять предельно достоверные сведения о состоянии объекта, а оценка качества поступающей информации должна выявлять степень доступности определенных параметров для их измерения и планирования [3, 4].

Разработка алгоритма мониторинга и анализа выполнения ключевых показателей использования путевых машинных комплексов, организации технического обслуживания и ремонта основных производственных средств необходима для оценки эффективности применяемых путевых машин и производственных процессов в целом [3, 5].

Создание такого алгоритма включает: разработку принципов организации и функционирования путевых машинных комплексов;

планирование периодичности мониторинга для различных условий эксплуатации и ремонта машинных комплексов; организацию информационного и метрологического обеспечения ИТ-систем; разработку способов оценки технологической и экономической эффективности применяемых ИТ-систем;

подготовку методических материалов, ориентированных на специфику работы структурных подразделений по ремонту и эксплуатации.

В результате мониторинга формируется база данных и систематизируется статистическая информация об изменении значений технологических параметров путевых машинных комплексов и их производительности, и на этой основе выявляются возможности измерения ключевых показателей процесса в целом (рис. 2). При расчетах необходимо учитывать все факторы (как сопутствующие, так и субъективные), оказывающие наибольшее воздействие на итоговые результаты.

К таким факторам можно отнести степень квалификации персонала, соблюдение требований использования цифровых технологий, исключение влияния внешних условий и дестабилизирующих факторов производственной среды [5–7].

Алгоритм состояния параметров исследуемого объекта, представленный на рис. 2, позволяет оценить степень функционирования машинизированного про-

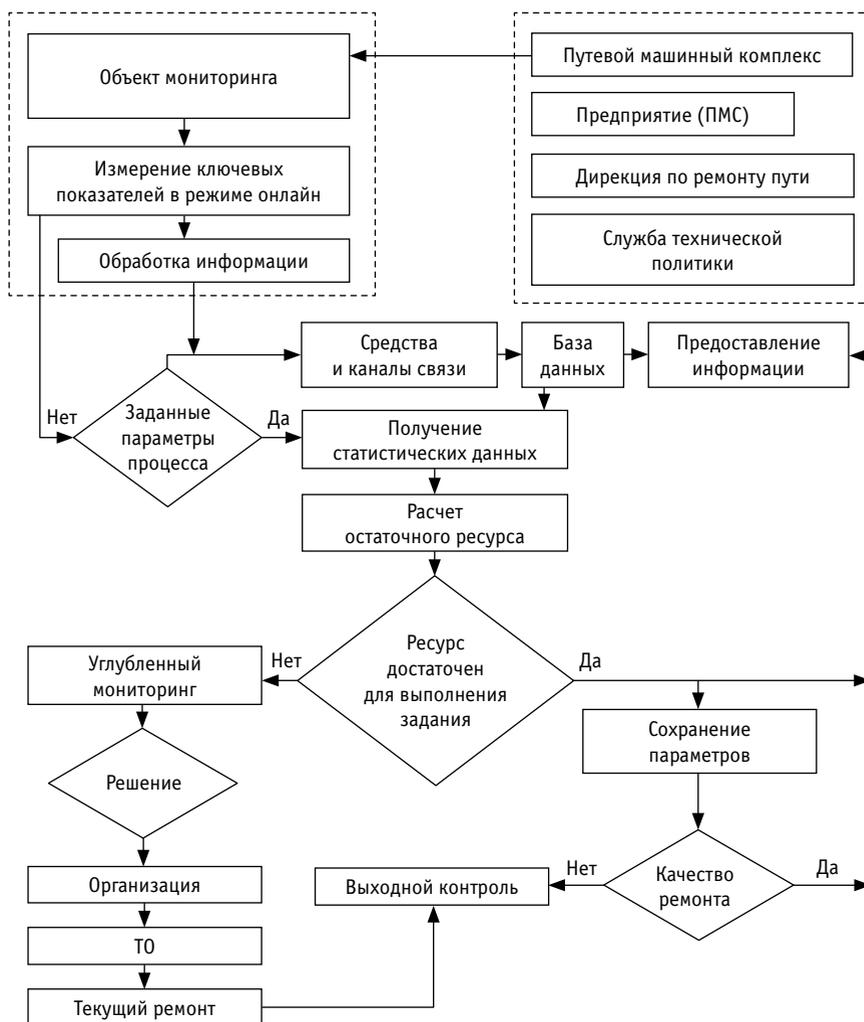


Рис. 1. Алгоритм мониторинга показателей эффективности эксплуатации и ремонта путевых машин

цесса ремонта пути, которая может быть признана приемлемой, эффективной или неудовлетворительной. Так как оценка степени достоверности информации о состоянии объекта при мониторинге является вероятностной [3, 6], то с учетом вероятности допущенных ошибок справедливо соотношение

$$P(\Gamma/\Gamma) + P(\text{Б}/\text{Б}) + P(\Gamma/\text{Б}) + P(\text{Б}/\Gamma) = 1, \quad (1)$$

где Γ/Γ , $\text{Б}/\text{Б}$, $\Gamma/\text{Б}$, $\text{Б}/\Gamma$ — векторы допускаемых и получаемых при расчетах ошибок.

Именно поэтому для снижения вероятности ошибок различного рода их ве-

личину α задают заранее, а при уже заданной α стараются сделать минимальной величину ошибок β , т.е. $P(\text{Б}/\Gamma) = \alpha$, а $P(\Gamma/\text{Б}) \Rightarrow 0$.

Вектор ошибок $[P(\Gamma/\text{Б}), P(\text{Б}/\Gamma)] = [\alpha, \beta]$ является предполагаемой величиной оценочного критерия. Для эффективности функционирования ИТ-системы необходимо высокое качество получаемой информации, чтобы принимать экономически обоснованные управленческие решения.

Основа качества информации, предоставляемой с использованием цифровых технологий, включает в себя [3, 8]: обоснование решения с учетом исключения предельных состояний основных производственных средств из-за

отсутствия необходимого количества запасных частей и с учетом полного обеспечения производственных процессов трудовыми и финансовыми ресурсами; последовательность принятия решений с постановкой целей и задач, определением ограничений в сравниваемых моделях вариантов, которые возможны в производственных условиях;

определение критерия эффективности для принятия управленческого решения в существующих условиях производственной деятельности;

обеспечение реализации управленческих решений с использованием систем диагностики, мониторинга технических средств и деятельности персонала (см. рис. 2).

В качестве ключевых показателей эффективности эксплуатации путевых машинных комплексов, а также режима их работы в дирекции по ремонту путевых машин приняты стандартные технико-экономические показатели [7]:

годовая выработка эксплуатируемого парка машин w_r ;

удельная годовая выработка на учетную единицу $w_{уд}$;

коэффициент использования машин $K_{ипп}$.

Показатель w_r зависит от выработки машин, эксплуатационной производительности и коэффициента использования $K_{ипп}$. То есть характеризует объем работ, выполненный в течение учетного периода, и дает абсолютную оценку работы всего парка машин.

Удельная годовая выработка на среднесписочную машину $w_{уд}$ — более объективный показатель, так как является величиной относительной. Эта величина прямо пропорциональна годовой выработке списочного состава парка машин без учета коэффициента их использования $K_{ипп}$ и обратно пропорциональна среднему числу машин в парке, работающих в течение года.

Поскольку показатель $w_{уд}$ не зависит от общего количества средств механизации и парка машин, он применим для оценки уровня организации их использования. На величину $w_{уд}$ оказывают влияние срок службы и техническое состояние парка машин, система и качество ТО и ремонта, квалификация персонала, климатические и производственные условия.

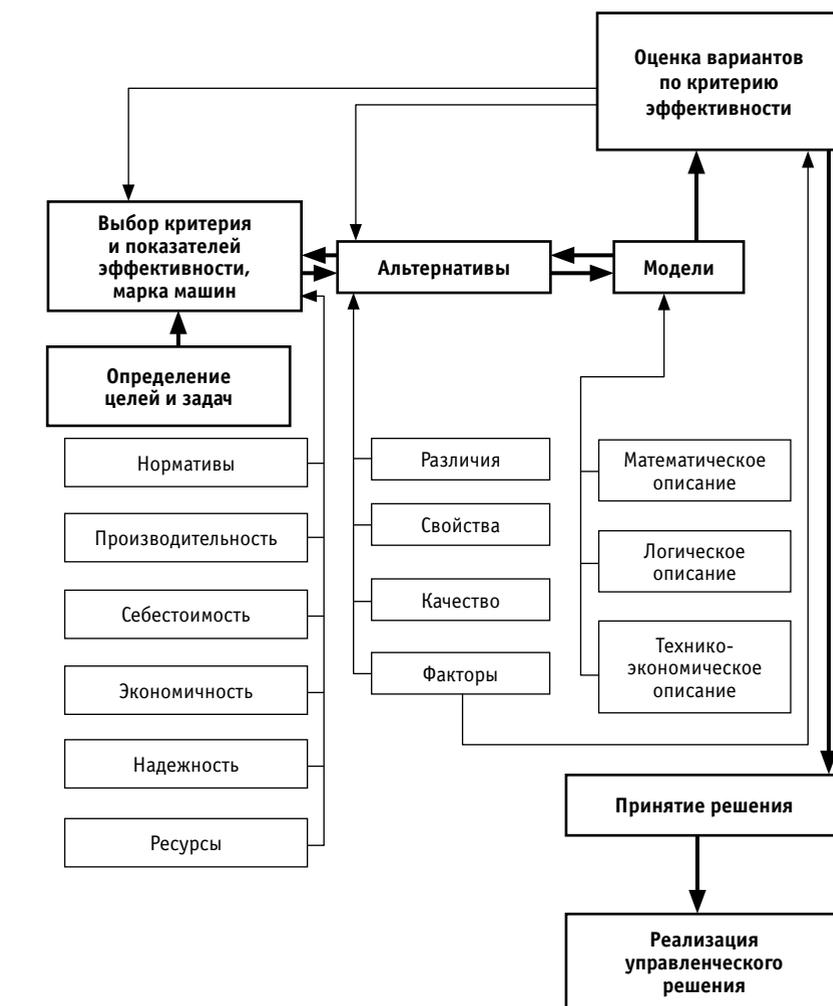


Рис. 2. Логическая модель принятия решения в системе управления капитальным ремонтом пути

Коэффициент использования парка машин $K_{ипп}$ определяется отношением количества машин, фактически работающих в течение года, к списочному количеству машин в парке. Таким образом, $K_{ипп}$ прямо пропорционально зависит от числа и средней продолжительности работы машин различных типов в течение года и обратно пропорционально — от их годового фонда рабочего времени.

На величину $K_{ипп}$ оказывает влияние продолжительность простоя машин, вызванная необходимостью устранения отказов и неисправностей, а также продолжительность простоя машин по организационным причинам.

Повышение оснащенности предприятия парком машин, имеющих большой запас ресурса, а также материальными

средствами обеспечения их эксплуатации, совершенствование ТО и ремонта, повышение квалификации обслуживающего персонала — все эти организационные и технические мероприятия позволяют снизить простои и увеличить эффективность производственных процессов.

Уровень эффективности эксплуатации машин можно оценить двумя показателями — коэффициентом готовности K_r и коэффициентом технического использования парка машин $K_{ти}$, отражающими технико-технологический (ресурсный) потенциал машин [3, 9] (табл. 1).

При определении надежности машины после ремонта применяется комплексный показатель, который отражает оценочную вероятность работоспособности машины в любой момент времени, кро-

Таблица 1

Показатели эффективности технической эксплуатации машин

Показатель	Составляющие показателя	Краткая характеристика показателя
Коэффициент готовности K_r	$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_b},$ T_o — время наработки машины на отказ; T_b — время, требуемое на восстановление машины	Комплексный показатель надежности, содержащий набор из двух единичных показателей: T_o — безотказность; T_b — ремонтпригодность
Коэффициент технического использования $K_{ти}$	$K_{ти} = \frac{\sum t_i}{\sum t_i + \sum t_{ппри} + \sum t_{oi}},$ t_i — наработка i -й машины; $t_{ппри}$ — время простоя i -й машины при плановом и внеплановом ремонте; t_{oi} — время простоев i -й машины при плановом и внеплановом техническом обслуживании	Комплексный показатель надежности, содержащий набор из трех единичных показателей: t_i — безотказность (математическое ожидание времени нахождения машины в рабочем состоянии за период эксплуатации); $t_{ппри}$ — ремонтпригодность; t_{oi} — математическое ожидание общего времени простоя машин, которое обусловлено техническим обслуживанием
Коэффициент технической готовности α_T	$\alpha_T = \frac{M_n}{M_c},$ M_n — количество технически работоспособных машин; M_c — число машин по списку	Комплексный показатель надежности, характеризующий следующие свойства: долговечность; безотказность; ремонтпригодность

ме заранее запланированных периодов, когда ее использование не планируется. В данном случае K_r прямо пропорционален общему времени работоспособности каждой i -й машины ($\sum t_i$) и обратно пропорционален количеству машин (M) и суммарному времени их эксплуатации (t_3), состоящему из чередующихся интервалов времени работы и времени восстановления:

$$K_r = \frac{\sum t_i}{M t_3}. \quad (2)$$

Для случаев, когда требуется немедленно начать работы по восстановлению отказавшей машины, коэффициент готовности определяют по формуле

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_b}, \quad (3)$$

где T_o — время наработки на отказ;
 T_b — среднее время на восстановление машины.

При интегральной оценке надежности ремонта и эксплуатации машин применяется коэффициент технического использования $K_{ти}$, который отражает общее время работы, а также время, затраченное на ремонт и техническое обслуживание машин. Он рассчитывается как отношение количества машино-смен, отработанных фактически за нормируе-

мое время $n_{ф}$, к календарному количеству машино-смен за тот же период эксплуатации n_k для однотипных машин.

Суммарное время простоя по организационным причинам — важная составляющая, зависящая от проведения на предприятии таких мероприятий, как: обеспечение запасов материальных средств и достаточных площадей для ремонта и технического обслуживания; обеспечение компетентным и обученным персоналом машинистов и ремонтных бригад;

улучшение технологии технического обслуживания и ремонтов с применением производственного оборудования, имеющего высокую производительность.

Отличие между K_r и $K_{ти}$ состоит в том, что первый показатель позволяет количественно оценить время, необходимое для устранения поломок и неисправностей машин, тогда как второй характеризует потери рабочего времени на проведение ремонта машин и их техническое обслуживание. Два этих показателя вместе характеризуют степень качества организации ремонта и эксплуатации парка машин в структурном подразделении.

Наибольшим образом влияние различных факторов на эффективность эксплуатации парка машин учитывает коэффициент технической готовности α_T (см. табл. 1). Это возможно за счет показателей t_p , определяющих продолжитель-

ность времени простоя машин, связанных с техническими причинами, в сменное время [10]:

$$\alpha_T(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n MnGnt_i}{\sum_{i=1}^n MnGnt_n}, \quad (4)$$

где t_n — среднее время пребывания машины в работе.

Коэффициент технической готовности α_T дополнительно характеризует степень ремонтпригодности и долговечность машины. Кроме того, чем больше средний ресурс машин определенного типа до капитального ремонта, тем меньше их будет одновременно находиться в ремонте, следовательно, тем больше значение α_T при прочих равных условиях.

Таким образом, оснащение путевых машинных комплексов цифровыми технологиями позволяет снизить трудоемкость операций при капитальном ремонте пути, ускорить процесс ремонта, повысить качество состояния пути, скорость передвижения грузов и пассажиров и в конечном счете — безопасность работы железнодорожного транспорта [11]. Все эти факторы оказывают положительное влияние на рост производительности труда и оптимизацию трудовых ресурсов, снижают расходы на содержание инфраструктуры железных дорог.

Литература

1. Арустамов А. Анализ бизнес-информации — основные принципы [Электронный ресурс]. URL: <https://basegroup.ru/community/articles/analysisbusinessdata> (дата обращения: 18.09.2017).
2. Бубнова Г. В. Новые информационные технологии стратегического планирования работы железнодорожного транспорта // Экспресс-информация ЦНИИТЭИ. 2000. № 3. С. 18–32. ISSN 0236–3615.
3. Белов В. С. Информационно-аналитические системы. Основы проектирования и применения : учеб. пособие. М. : МЭСИ, 2008.
4. Введение в действие ключевых показателей деятельности Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 10.03.2011 г. № 522р.
5. Прогрессивные технологии обеспечения безопасности движения поездов и сохранности перевозимых грузов : моногр. / В. А. Гапанович, И. И. Галиев, Ю. И. Матяш, В. П. Клюка. М. : ГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. трансп.», 2008. 220 с.
6. Лунина Т. А., Прудников А. А. Формирование новых подходов к оценке экономической эффективности инфраструктурного комплекса железнодорожного транспорта : моногр. Новосибирск : Изд-во СГУВТ, 2015. 168 с.
7. Нормы времени на работы по ремонту верхнего строения пути (с комментариями). М. : МЦФЭР, 2001. 164 с.
8. Федюкин В. К. Управление качеством процессов. СПб. : Питер, 2005. 202 с.
9. Щербаков В. В., Ковалева О. В., Щербаков И. В. Цифровые модели пути — основа геодезического обеспечения проектирования, строительства (ремонта) и эксплуатации железных дорог // Геодезия и картография. 2016. Т. 3. С. 12–16. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-909-3. ISSN 0016–7126.
10. Шмелев А. В., Маневич П. Б., Данченко Н. И. Определение зависящих расходов для тарифных целей // Экономика железных дорог. 2009. № 12. С. 27–35. ISSN 1727–6500.
11. Концепция единой технической политики холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.06.2009 г.

References

1. Arustamov A. Analiz biznes-informatsii — osnovnye printsipy [Analysis of business information — basic principles]. [Electronic resource]. URL: <https://basegroup.ru/community/articles/analysisbusinessdata> (access date: 18.09.2017).
2. Bubnova G. V. Novye informatsionnye tekhnologii strategicheskogo planirovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta [New information technologies for strategic planning of railway transport operations] // Ekspres-informatsiya TsNIITEI. 2000. № 3. S. 18–32. ISSN 0236-3615.
3. Belov V. S. Informatsionno-analiticheskie sistemy. Osnovy proektirovaniya i primeneniya : ucheb. posobie [Information-analytical systems. Basics of design and application : a textbook]. M. : MESI, 2008.
4. Vvedenie v deystvie klyuchevykh pokazateley deyatel'nosti Tsentral'noy direktsii infrastruktury — filiala ОАО «RZhD» : utv. rasporyazheniem ОАО «RZhD» ot 10.03.2011 g. № 522r [Implementation of key performance indicators of the Central Directorate of Infrastructure — a branch of JSC Russian Railways : approved by the order of JSC Russian Railways on 10.03.2011 No. 522r].
5. Progressivnyye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov i sokhrannosti perevozimykh грузов : monogr. [Progressive technologies for ensuring the safety of train traffic and the safety of goods transported : a monograph] / V. A. Gapanovich, I. I. Galiev, Yu. I. Matyash, V. P. Klyuka. M. : GOU «UMTs po obrazovaniyu na zh.-d. трансп.», 2008. 220 s.
6. Lunina T. A., Prudnikov A. A. Formirovaniye novykh podkhodov k otsenke ekonomicheskoy effektivnosti infrastrukturnogo kompleksa zheleznodorozhnogo transporta : monogr. [Formation of new approaches to the assessment of the economic efficiency of the railway transport infrastructure complex : a monograph]. Novosibirsk : Izd-vo SGUVT, 2015. 168 s.
7. Normy vremeni na raboty po remontu verkhnego stroeniya puti (s kommentariyami) [Time limits for repair work on the track structure (with comments)]. M. : MTsFER, 2001. 164 s.
8. Fedyukin V. K. Upravleniye kachestvom protsessov [Process quality management]. SPb. : Piter, 2005. 202 s.
9. Scherbakov V. V., Kovaleva O. V., Scherbakov I. V. Tsifrovyye modeli puti — osnova geodezicheskogo obespecheniya proektirovaniya, stroitel'stva (remonta) i ekspluatatsii zheleznykh dorog [Modern geodetic control of designing, construction (repairs) and maintenance of railways] // Geodeziya i kartografiya. 2016. T. 3. S. 12–16. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-909-3. ISSN 0016-7126.
10. Shmelev A. V., Manevich P. B., Danchenko N. I. Opredeleniye zavisyaschikh raskhodov dlya tarifnykh tseley [Determination of the dependent costs for tariff purposes] // Ekonomika zheleznykh dorog. 2009. № 12. S. 27–35. ISSN 1727-6500.
11. Kontseptsiya edinoy tekhnicheskoy politiki kholdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda : utv. rasporyazheniem ОАО «RZhD» ot 18.06.2009 g. [The concept of a unified technical policy of the holding Russian Railways for the period until 2015 : approved by the order of JSC Russian Railways on 18.06.2009].

УДК 621.311

Владислав Леонидович Незевак, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ТЯГУ ОТ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ НА УЧАСТКАХ С I ТИПОМ ПРОФИЛЯ ПУТИ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Vladislav Leonidovich Nezevak, PhD in Engineering, Senior Researcher, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Assessment of changes in the volume of electricity consumption for traction from the train schedule on sections with the first type of path profile based regression models and neural networks

Аннотация

В статье рассмотрены результаты имитационного моделирования для различных графиков движения поездов, позволяющие оценить изменение электропотребления на тягу на основе регрессионных моделей и нейронных сетей. Построение моделей выполнено для участков железных дорог постоянного тока с I типом профиля пути в зависимости от изменения параметров графика движения поездов. Имитационное моделирование выполнено для трех вариантов тяговых расчетов с учетом остановок и оптимизации выбега поезда. Применение предложенных моделей позволяет оценить энергетическую эффективность прогнозных энергосберегающих графиков движения поездов на основе влияния их параметров на электропотребление тяги поездов.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, объем электропотребления, постоянный ток, электрическая нагрузка, параметры графика движения поездов, первый тип профиля пути, имитационное моделирование, пакеты поездов, остановки, твердые нитки грузовых поездов, регрессионный анализ, методы оценки, нейронная сеть.

Summary

In the article the results of simulation for different train traffic schedules are considered, allowing to estimate the change in power consumption for traction on the basis of regression models and neural networks. The models are constructed for the sections of the DC railways with the type I of the track profile depending on the change in the parameters of the train traffic schedule. Simulation modeling was carried out for three variants of traction calculations taking into account the stops and optimization of the train run-out. The application of the proposed models makes it possible to estimate the energy efficiency of the forecast energy-saving train traffic schedules based on the influence of their parameters on the power consumption of the train traction.

Keywords: traction power system, electric power consumption, direct current, electric load, trains schedule parameters, the first type of track profile, simulation, trains packages, stops, solid freight train threads, regression analysis, evaluation methods, neural network.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-65-70

Технология, которая применяется при разработке прогнозных вариантных графиков движения поездов (ГДП) на электрифицированных участках, способствует решению целого ряда задач, в частности связанных с повышением уровня безопасности движения, эффективности использования подвижного состава, провозной и пропускной способности дорог, улучшением обслуживания пассажиров. Построение прогнозного вариантного ГДП позволяет ввести твердые нитки в грузовом движении по аналогии с пассажирским движением на основе энергооптимальных расписаний и сократить расход электроэнергии [1]. Дополнительный эффект снижения объема электропотребления на тягу при разработке прогнозного вариантного графика движения поездов может быть получен за счет изменения параметров ГДП, к основным из которых следует отнести межпоездной интервал, а при пакетной организации движения — количество пакетов и межпоездные интервалы внутри и между пакетами [2, 3].

На электрифицированных участках ГДП влияет на режим работы систем тягового электроснабжения (СТЭ). Предельные режимы работы СТЭ определяются в первую очередь условиями пропуска тяжеловесных поездов, сокращением межпоездных интервалов и состоянием инфраструктуры (наличие затяжных уклонов, тип профиля пути, ограничения скорости и др.) [4, 5]. Масса поезда и интервалы на участках с различным типом профиля оказывают разное воздействие на уровень загрузки элементов СТЭ. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть влияние параметров ГДП на участках с различным типом профиля пути отдельно.

Выявление основных зависимостей изменения объемов электропотребления от параметров ГДП позволяет перейти к их описанию. С целью формализации и дальнейшего использования зависимостей для проведения оценки влияния ГДП на электропотребление или сравнительной оценки эф-

фективности энергосберегающих прогнозных ГДП необходимо выбрать наиболее подходящие регрессионные или нейросетевые модели.

Рассмотрим участки постоянного тока с I типом профиля пути, каждый из которых имеет среднюю протяженность около 200 км. Имитационное моделирование работы СТЭ каждого участка позволяет получить данные для широкого диапазона изменения параметров ГДП. Электрические расчеты для СТЭ постоянного и переменного тока с различным типом профиля пути выполнены на основе трех вариантов тяговых расчетов (рис. 1). Первый вариант — расчет для грузового поезда при движении по участку без остановок, второй — с одной остановкой, третий — без остановок с оптимизацией выбега. Тяговые расчеты выполнены по трем участкам сети дорог для каждого типа профиля пути. Представленные на рис. 1 значения, усредненные для четного и нечетного направлений, отражают тенденцию роста удельного расхода электроэнергии с увеличением типа профиля пути.

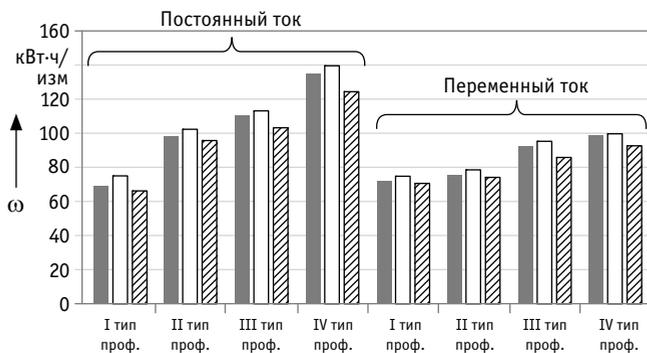


Рис. 1. Удельный расход электроэнергии в грузовом движении для участков с различным типом профиля:

■ — вариант без остановок; □ — с остановкой; ▨ — энергосберегающий

С целью оценки характера изменения объема электропотребления на тягу и потерь электроэнергии в СТЭ выполним имитационное моделирование взаимодействия электроподвижного состава и СТЭ в программном комплексе КОРТЭС для следующих условий формирования ГДП. Размеры движения — 50 пар в грузовом, 10 пар — в пассажирском, график движения поездов — пакетный, количество пакетов в четном и нечетном направлениях — от 5 до 16, интервал попутного следования в пакете — от 10 до 18 мин. Изменение межпоездного интервала в пакете осуществляется с шагом 1 мин. На всей протяженности участок железной дороги оборудован автоблокировкой. При оценке влияния ГДП на расход электрической энергии объем тонно-километровой работы для всех вариантов формирования ГДП сохраняется постоянным. Построение ГДП с учетом остановок и твердых ниток выполняется путем введения ниток движения грузовых поездов по соответствующим тяговым расчетам. При этом количество ниток с остановками и количество энергосберегающих ниток в ГДП изменяется от 0 до 20 шт.

По результатам имитационного моделирования для участка постоянного тока с I типом профиля пути могут быть построены основные зависимости изменения объема электро-

потребления от параметров ГДП, обусловленные изменением потерь электроэнергии от графика электрической нагрузки. Отсутствие рекуперативного торможения на участках с I типом профиля пути позволяет в дальнейшем исключить данный фактор из рассмотрения.

В общем случае результаты расчетов имитационного моделирования могут быть представлены при помощи уравнения множественной регрессии. Рассмотрим регрессионную линейную модель, описывающую изменение суммарного расхода электроэнергии W с учетом потерь и включающую пять параметров ГДП: относительное время следования поездов в пакетах и вне их, среднее количество поездов в пакете, удельное количество остановок, удельное количество твердых ниток в грузовом движении, о.е.:

$$W = -0,94 \cdot \alpha + 1,87 \cdot \alpha_{\text{пак}} + 0,03 \cdot n_{\text{ср}} + 3,74 \cdot \beta + 5,81 \cdot \gamma + 99,3, \quad (1)$$

где α — относительное время следования поездов в пакетах, о.е.;

$\alpha_{\text{пак}}$ — относительное время следования поездов вне пакетов, о.е.;

$n_{\text{ср}}$ — среднее количество поездов в пакете, шт.;

β — удельное количество остановок, о.е.;

γ — удельное количество твердых ниток в грузовом движении, о.е.

Для модели (1) скорректированный коэффициент детерминации принимает значение 0,78. Проверка по критерию Фишера с целью оценки значимости полученной регрессионной модели дает результат $F_{\text{ф}} = 118,9$, что выше табличного значения для F -критерия Фишера при уровне значимости 0,05 (для пяти переменных получаем пять степеней свободы, при количестве наблюдений 172 получаем 166 степеней свободы, а табличное значение $F_{\text{табл}}$ составит 2,27). Отсюда можно сделать вывод, что полученная зависимость будет значима и для генеральной совокупности.

Коэффициенты корреляции r_{ij} для пяти параметров расписания ГДП представлены в табл. 1. В данном случае коэффициенты корреляции между параметрами не превышают 0,6, что свидетельствует об отсутствии мультиколлинеарности рассмотренных факторов [6].

Таблица 1

Нормированная корреляционная матрица

Параметр	α	$\alpha_{\text{пак}}$	$n_{\text{ср}}$	β	γ	W
α	1,000	-0,202	0,505	-0,118	-0,118	-0,265
$\alpha_{\text{пак}}$		1,000	0,041	0,314	0,314	0,649
$n_{\text{ср}}$			1,000	0,066	0,066	0,100
β				1,000	-0,166	0,606
γ					1,000	0,459
W						1,000

Чтобы оценить статистическую значимость факторов модели, используем метод пошагового включения и исключения ее переменных [7].

Результаты расчетов по методу включения показывают значимость всех факторов (табл. 2). Следует отметить, что значение F -критерия для α и $n_{\text{ср}}$ ниже, чем для других факторов, т.е. это свидетельствует о меньшем их влиянии на объем электропотребления на тягу поездов для рассмотренного участка постоянного тока с I типом профиля.

Таблица 2

Результаты определения уровня значимости факторов по методу включения

Параметр	Шаг	R	$R^2_{\text{скор}}$	F -критерий	Уровень значимости
$\alpha_{\text{пак}}$	1	0,649	0,421	123,826	0,000
β	2	0,775	0,601	75,771	0,000
γ	3	0,877	0,770	123,521	0,000
α	4	0,881	0,776	4,794	0,030
$n_{\text{ср}}$	5	0,884	0,782	4,207	0,042

Аналогичные результаты получены и при использовании метода исключения переменных (табл. 3).

Таблица 3

Результаты определения значимости факторов по методу исключения

Параметр	Шаг	R	$R^2_{\text{скор}}$	F -критерий	Уровень значимости
$n_{\text{ср}}$	1	0,881	0,776	4,207219	0,041824
α	2	0,877	0,770	4,793968	0,029947

Все факторы регрессионной модели статистически значимы для уровня значимости 0,05. При его повышении до 0,02 факторы $n_{\text{ср}}$ и α могут быть исключены из модели. Следует отметить, что полученные результаты справедливы для участков постоянного тока с I типом профиля пути. Для других условий (система тягового электроснабжения и тип профиля пути) значимость рассмотренных факторов должна быть проверена отдельно. Статистически значимыми для всех трех участков являются факторы $\alpha_{\text{пак}}$, β и γ .

Сравнение коэффициентов детерминации моделей, полученных для различных участков постоянного тока с I типом профиля, показывает достаточно большой разброс остатков для трех рассмотренных вариантов тяговых расчетов при исключении параметров расписания движения поездов.

Выполним проверку значимости факторов по критерию Стьюдента. Табличное t -значение критерия Стьюдента составляет для исходных данных 1,974. Как видно из табл. 4, для всех переменных значения критерия Стьюдента выше табличных, поэтому все переменные предложенной регрессионной модели признаются статистически значимыми.

Таблица 4

Результаты расчета t -значения критерия Стьюдента

Параметр	Среднее	Среднеквадратичное отклонение	Стандартная ошибка	t -значение
α	0,304	0,096	0,0073	41,724
$\alpha_{\text{пак}}$	0,637	0,113	0,0086	74,125
$n_{\text{ср}}$	5,218	1,754	0,1338	39,009
β	0,0419	0,103	0,0078	5,335
γ	0,021	0,051	0,0039	5,335

Изменение потерь электроэнергии в СТЭ в зависимости от межпоездного интервала в пакете имеет нелинейный вид. В связи с этим при увеличении межпоездного интервала происходит нелинейное снижение расхода (рис. 2).

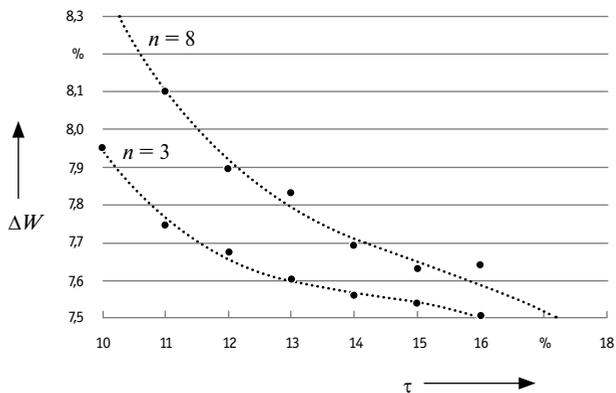


Рис. 2. Изменение потерь электроэнергии в зависимости от межпоездного интервала

Выше была рассмотрена линейная регрессионная модель, скорректированный коэффициент детерминации которой составил 0,78. Повысить значение этого коэффициента можно при помощи других видов регрессионной модели. Например, кусочно-линейная регрессионная модель с использованием метода поиска Розенброка позволяет получить скорректированный коэффициент детерминации, равный 0,93. Такое решение точнее описывает результаты и может быть представлено в виде функции

$$W = \begin{cases} 0,69 \cdot \alpha + 0,57 \cdot \alpha_{\text{пак}} + 0,05 \cdot n_{\text{ср}} + \\ + 0,1 \cdot \beta + 0,1 \cdot \gamma + 99,8 \text{ при } W < 100,7 \\ 33,3 \cdot \alpha + 41,6 \cdot \alpha_{\text{пак}} + 0,05 \cdot n_{\text{ср}} + \\ + 1,52 \cdot \beta + 1,36 \cdot \gamma + 61,7 \text{ при } W \geq 100,7 \end{cases} \quad (2)$$

где 100,7 — точка разрыва кусочно-линейной регрессионной модели.

Результаты определения расхода электроэнергии на участках постоянного тока с I типом профиля пути по модели (2) показаны на рис. 3.

Сравнение значений, соответствующих регрессионной модели до и после точки разрыва для факторов модели при различных вариантах выполнения ГДП (всего n вариантов), показывает, что выше точки разрыва ($>100,7$ о.е.) большая часть значений межпоездного интервала находится на уровне среднего (0,3), в то время как до точки разрыва ($\leq 100,7$ о.е.) они принимают значения из всего диапазона допустимых значений (рис. 4а). Большая часть значений межпоездного интервала между пакетами выше точки разрыва находится на уровне среднего (0,7), в то время как до точки разрыва они принимают значения из всего диапазона допустимых (рис. 4б).

С помощью нелинейной регрессионной модели можно получить аналогичные результаты при описании изменения расхода электроэнергии на тягу. У этой модели скорректированный коэффициент детерминации ниже, чем у кусочно-линейной (2), но выше, чем у линейной (1). Экспоненциальная модель позволяет описать результаты со значением скорректированного коэффициента детерминации, равного 0,79:

$$W = 100,02 + e^{(-7,90 - 3,09 \cdot \alpha + 10,56 \cdot \alpha_{\text{пак}} + 0,16 \cdot n_{\text{сп}} + 2,41 \cdot \beta + 3,61 \cdot \gamma)} \quad (3)$$

Полученная модель регрессии с кусочно-линейной функцией достаточно точно описывает результаты расчетов. Применение этой модели на практике позволяет оперировать двумя функциями — соответственно для условий наличия и отсутствия остановок и твердых ниток, что повышает точность оценки электропотребления на тягу при использовании кусочно-линейной функции (2). С целью проверки неоднородности полученной выборки для кусочно-линейной регрессионной модели проведем тест Чоу, результаты которого покажут обоснованность применения двух уравнений регрессии [8].

Тест Чоу используется для выборок одного набора переменных. В нашем случае особенность выборок состоит в том, что они получены для различных условий, в которых отдельные переменные не изменяются для ряда значений или принимают нулевые значения (варианты ГДП с отсутствием остановок и твердых ниток в графике). Если на выбранном уровне значимости наблюдаемое значение F -статистики больше критической точки, то нулевая гипотеза отвергается, что говорит о целесообразности использования различных уравнений регрессии для двух наборов данных.

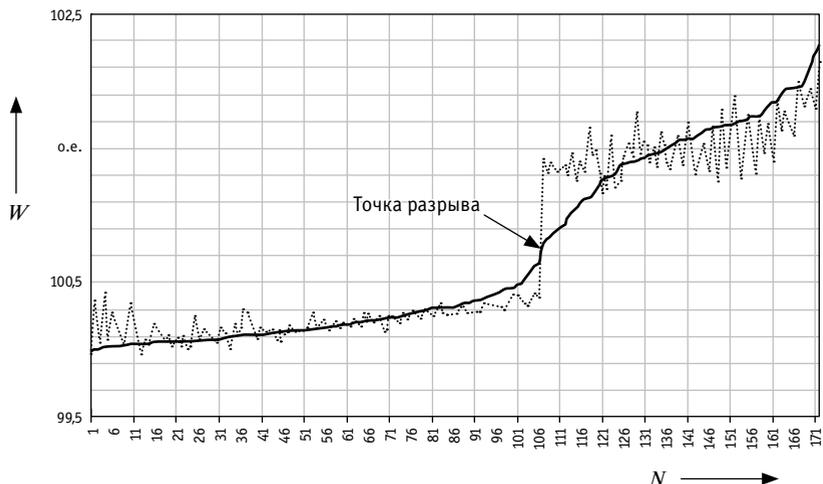


Рис. 3. Изменение значений расхода электроэнергии, полученных по регрессионной модели:

— результаты имитационного моделирования;
 — результаты имитационного моделирования при помощи регрессионной модели

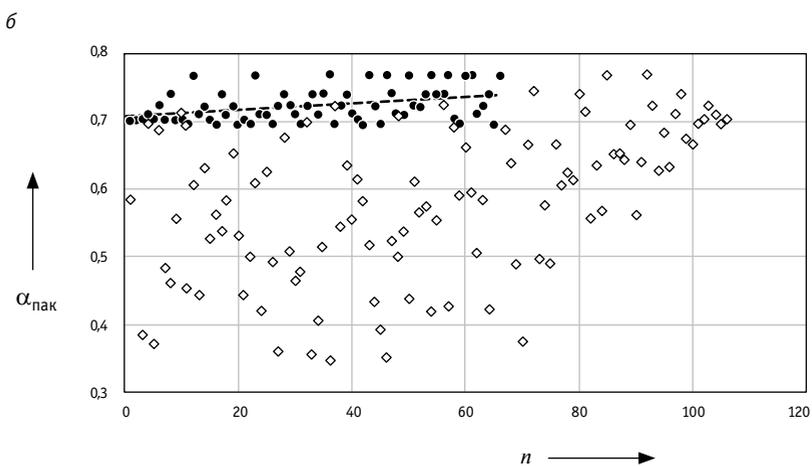
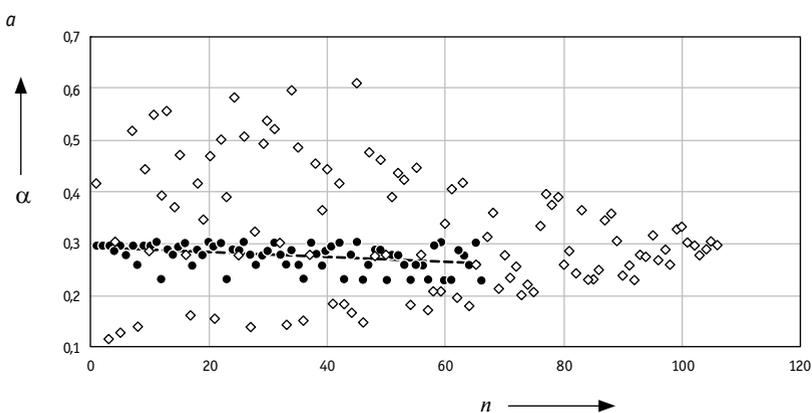


Рис. 4. Изменение коэффициентов относительного времени следования:

а — коэффициент α ; б — коэффициент $\alpha_{\text{пак}}$;
 ◇ — 1-я часть; ● — 2-я часть; - - - - - линейная (2-я часть)

В тесте Чоу значение F -статистики определяется по выражению

$$F = \frac{(RSS - RSS_1 - RSS_2) \cdot (n_1 + n_2 - 2 \cdot k)}{(RSS_1 + RSS_2) \cdot k}, \quad (4)$$

где RSS, RSS_1, RSS_2 — сумма квадратов разностей всей выборки, а также первой и второй части выборки соответственно;

n_1, n_2 — количество элементов в первой и второй части выборки соответственно;

k — количество переменных в модели.

Значение F -статистики для регрессионной модели (2) равно $8,3 \cdot 10^{-15}$, что ниже критического значения $F(4, 164) = 2,435$. Это означает, что рассматриваемую зависимость можно считать единой и не разбивать на две. То есть для описания результатов не требуется двух уравнений и достаточно построение модели, аналогичной (1) или (3).

Одним из эффективных инструментов для описания процесса электропотребления в системе тягового электроснабжения являются нейросетевые модели [9]. Рассмотрим нейронную сеть с сетевой архитектурой многослойного персептрона (MLP) [10]. Структура нейросетевой модели будет представлять собой сеть с пятью нейронами на входном слое и одним нейроном — на выходном (рис. 5), количество слоев и нейронов на скрытых слоях определим с помощью пакета Statistica по критерию минимальной ошибки. Обучение модели проводится по методу обратной ошибки. Для обучения выбрано 80 % выборки результатов моделирования, для тестирования нейромодели — 20 %.

В качестве передаточных функций на скрытых и выходном слоях рассматриваются экспоненциальная, сигмоидальная и тангенциальная гиперболическая. Ошибки нейромодели минимизируются по алгоритму BFGS (Бройдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно). Скорость обучения для рассмотренных моделей составила от 30 до 60 итераций. Высокую точность позволяет достичь нейронная сеть с количеством скрытых слоев выше 8. Например, для модели MLP 5-10-1 (рис. 6) коэффициент детерминации составляет 0,89.

Анализ чувствительности коэффициентов, определяемых по выражению (5), для рассмотренной модели MLP подтверждает наибольшую статистическую значимость переменных $\alpha_{\text{пак}}$, β и γ , коэффициенты чувствительности для которых равны 3,1; 3,7 и 6,9 соответственно, и меньшую значимость для переменных α и $n_{\text{ср}}$ — коэффициенты составляют 1,3 и 1,5 соответственно:

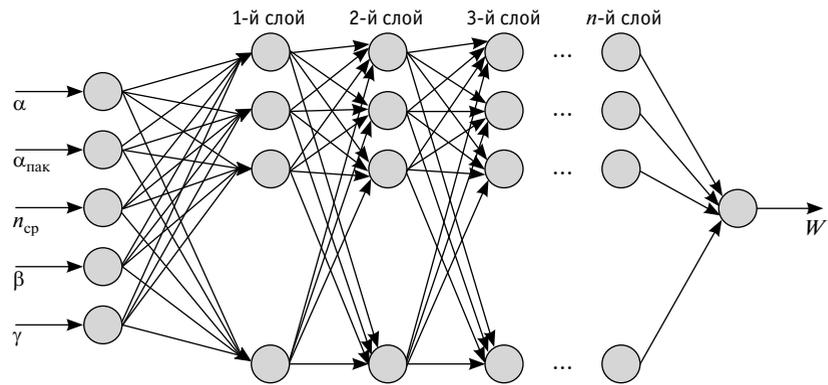


Рис. 5. Структура нейросетевой модели для оценки изменения электропотребления на тягу в зависимости от параметров ГДП

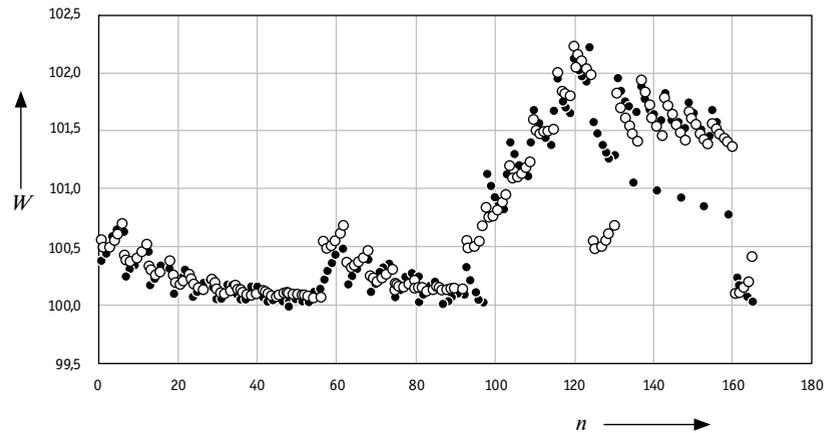


Рис. 6. Результат определения значений функции расхода электроэнергии с помощью модели нейронной сети: ● — факт; ○ — MLP 5-10-1

$$c_i = \frac{\partial W}{\partial x_i}, \quad (5)$$

где x_i — фактор, учитываемый при оценке изменения объема электропотребления на тягу W .

Аналогичные результаты получены при оценке статистической значимости по методу включения-исключения переменных. Качество рассмотренной нейромодели оценивается показателем процентной погрешности:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|W_{\text{факт}i} - W_{\text{мод}i}|}{W_{\text{факт}i}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где n — объем выборки;

$W_{\text{факт}i}, W_{\text{мод}i}$ — соответственно фактический и полученный по модели объем электропотребления, о. е.

Процентная погрешность M , определенная по выражению (6), для рассмотренной модели MLP 5-10-1 составила 0,11 %. Сравнение результатов применения регрессионных моделей свидетельствует о наилучшем приближении характера изменения объема электропотребления уравнениями кусочной регрессии и нейронной сети. Коэффициент детерминации для линейных и нелинейных моделей ниже, чем для рассмотренных моделей кусочно-линейной регрессии и нейромодели.

Отметим, что полученные результаты моделирования изменения объема электропотребления на тягу относятся к двухпутным участкам постоянного тока. В процессе имитационного моделирования рассмотрен ряд вариантов исполнения ГДП, но средние межпоезд-

ные интервалы при следовании в пакете и средние интервалы вне пакетов не были учтены. Это следует отнести к недостаткам модели. Необходимость учета данных факторов обусловлена неравномерным интервалом в пакетах в течение суток и различным количеством пакетов или их отсутствием в ГДП. Учет указанных параметров позволит перейти к описанию поведения функции электропотребления на тягу в критических точках, которые характеризуются отсутствием пакетного движения, комбинацией значений количества остановок и твердых ниток в графике и др.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

регрессионные модели, описывающие изменение объема электропотребления на тягу по F -критерию, могут быть применимы для генеральной выборки параметров ГДП;

использование регрессионных моделей для оценки влияния параметров ГДП на расход электроэнергии дает возможность описать зависимость изменения электропотребления на тягу, справедливую и для генеральной совокупности;

метод включения-исключения позволяет выделить статистически значимые параметры для участков постоянного тока: удельное количество остановок и твердых ниток в графике движения, а также относительное время следования поездов вне пакетов;

наиболее точное описание результатов для участков постоянного тока с I типом профиля дает использование кусочно-линейной регрессионной модели;

применение нейронной сети на основе многослойных персептронов для описания результатов моделирования позволяет получить более высокие значения коэффициентов детерминации (0,9 и выше), чем использование уравнений линейной и нелинейной модели;

совершенствование рассмотренных моделей необходимо проводить в направлении учета дополнительных параметров ГДП, таких как средние межпоездные интервалы в пакетах и вне их, а также исследование поведения функции изменения объема электропотребления на тягу в критических точках.

Литература

1. Полигонные технологии движения поездов по графикам на основе автоматизированной системы «Эльбрус» / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов, В. Ю. Кирякин и др. // Железнодорожный транспорт. 2015. № 3. С. 13–19. ISSN 0044–4448.
2. Незевак В. Л., Шатохин А. П., Гателюк О. В. Оптимизация графика движения поездов по критерию расхода электрической энергии на тягу на участках железных дорог в условиях применения рекуперативного торможения // Известия Транссиба. 2015. № 1 (21). С. 59–69. ISSN 2220–4245.
3. Незевак В. Л., Шатохин А. П. Повышение эффективности перевозочного процесса за счет оптимизации графика движения поездов // Матер. II междунар. науч.-практ. конф. / ОмГУПС. Омск, 2016. С. 153–159.
4. Istomin S., Nesevak V. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES 10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn // Elektrische Bahnen. 2015. № 4. P. 186–189.
5. Черемисин В. Т., Каштанов А. Л., Незевак В. Л. Организация контроля предельных режимов работы тяговой сети в условиях скоростного и тяжеловесного движения // Известия Транссиба. 2017. № 1 (25). С. 76–83. ISSN 2220–4245.
6. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Пер. с нем. М. : Инфра-М, 1998. 302 с.
7. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ : в 2-х кн. Кн. 2 / Пер. с англ. ; 2-е изд., перераб. и доп. М. : Финансы и статистика, 1987. 351 с.
8. Кремер Н. Ш., Путко Б. А. Эконометрика : учеб. / 2-е изд. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2008. 311 с.
9. Современные подходы к оценке фактической экономии электроэнергии в системе тягового электроснабжения на основе искусственных нейронных сетей и нечетких нейронных сетей / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, Д. О. Силюянов, В. В. Эрбес // Вестник РГУПС. 2015. № 2 (58). С. 63–68. ISSN 0201–727X.
10. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / Пер. с англ. ; 2-е изд. М. : Вильямс, 2006. 1104 с.

References

1. Poligonnye tekhnologii dvizheniya poezdov po grafikam na osnove avtomatizirovannoy sistemy «Elbrus» [Polygon technology of train traffic on the schedule based on the automated system «Elbrus»] / L. A. Muginshcheyn, S. A. Vinogradov, V. Yu. Kiryakin i dr. // Zheleznodorozhnyy transport. 2015. № 3. S. 13–19. ISSN 0044–4448.
2. Nezevak V. L., Shatokhin A. P., Gatulyuk O. V. Optimizatsiya grafika dvizheniya poezdov po kriteriyu raskhoda elektricheskoy energii na tyagu na uchastkakh zheleznikh dorog v usloviyakh primeneniya rekuperativnogo tormozheniya [Optimization of graphic time-table to the criterion of electrical energy's expenditure for traction on the railways sections in the conditions of using the regenerative braking] // Izvestiya Transsiba. 2015. № 1 (21). S. 59–69. ISSN 2220–4245.
3. Nezevak V. L., Shatokhin A. P. Povysheniye effektivnosti perevoznogo protsessa za schet optimizatsii grafika dvizheniya poezdov [Improving the efficiency of the transportation process by optimizing the train schedule] // Mater. II mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / OmGUPS. Omsk, 2016. S. 153–159.
4. Istomin S., Nesevak V. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn // Elektrische Bahnen. 2015. № 4. P. 186–189.
5. Cheremisin V. T., Kashtanov A. L., Nezevak V. L. Organizatsiya kontrolya predelnykh rezhimov raboty tyagovoy seti v usloviyakh skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya [Organization of control of the limiting modes of operation of the traction network in the conditions of high-speed and heavy traffic] // Izvestiya Transsiba. 2017. № 1 (25). S. 76–83. ISSN 2220–4245.
6. Ferster E., Rents B. Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza [Methods of correlation and regression analysis] / Per. s nem. M. : Infra-M, 1998. 302 s.
7. Dreyper N. Prikladnoy regressionnyy analiz [Applied regression analysis] : v 2-kh kn. Kn. 2 / Per. s angl. ; 2-e izd., pererab. i dop. M. : Finansy i statistika, 1987. 351 s.
8. Kremer N. Sh., Putko B. A. Ekonometrika : ucheb. [Econometrics : a textbook] / 2-e izd. M. : YUNITI-DANA, 2008. 311 s.
9. Sovremennyye podkhody k otsenke fakticheskoy ekonomii elektroenergii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya na osnove iskusstvennykh neyronnykh setey i nechetkikh neyronnykh setey [Modern approaches to evaluation of the energy efficiency of the energy-saving devices in traction power system on the basis of artificial neural networks and fuzzy neural networks] / A. L. Kashtanov, A. A. Komyakov, D. O. Siluyanov, V. V. Erbes // Vestnik RGUPS. 2015. № 2 (58). S. 63–68. ISSN 0201–727X.
10. Khaykin S. Neyronnye seti. Polnyy kurs [Neural networks. Full course] / Per. s angl. ; 2-e izd. M. : Vilyams, 2006. 1104 s.

УДК 621.331.3.024

Борис Алексеевич Аржанников, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Ирина Анатольевна Баева, аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ВЛИЯНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА И НА РАСХОД ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ

Boris Alexeyevich Arzhannikov, DSc in Engineering, Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Irina Anatolyevna Baeva, postgraduate student, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

The effect of voltage regulation on capacity of electrified DC sections and on the consumption of electric energy on the traction of trains

Аннотация

Приведены результаты тяговых и электрических расчетов системы тягового электроснабжения трех участков Свердловской и Южно-Уральской железных дорог по влиянию повышения напряжения на пропускную способность участков постоянного тока 3,0 кВ, на потери и расход электрической энергии на тягу поездов. В статье используется новый подход к уточнению токов электровозов, основанный на методе приближения расчетного расхода электрической энергии к базовому расходу. Выполнены расчеты для двух вариантов режима работы системы тягового электроснабжения.

Ключевые слова: электрифицированные участки, постоянный ток, электровозы, КОРТЭС, скорость движения поездов, потери и расход электрической энергии.

Summary

The results of traction and electrical calculations of the traction power supply system of three sections of the Sverdlovsk and South Ural railways on the effect of increasing the voltage on the capacity of sections of direct current 3.0 kV, on the losses and consumption of electric energy for the traction of trains are presented. The article uses a new approach to the refinement of electric locomotive currents, based on the method of approximating the calculated consumption of electrical energy to the base flow. Calculations for two variants of the operating mode of traction power supply system have been performed.

Keywords: electrified sections, direct current, electric locomotives, KORTES, train speed, losses and electric energy consumption.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-71-75

Для электрических расчетов системы тягового электроснабжения (СТЭ) направлений (участков) железных дорог постоянного тока 3,0 кВ используется программа КОРТЭС, которая позволяет определить:

расход и прием электрической энергии (ЭЭ) в режиме тяги A_T и рекуперативного торможения A_P по всему участку и по отдельным тяговым подстанциям (ТП);

потери ЭЭ в тяговой сети ΔA_{TC} и в трансформаторах тяговых подстанций ΔA_{TP} в режимах нагрузки и холостого хода; максимальные токи и коэффициенты нагрузки силового оборудования ТП;

наибольшие средние токи и температуру нагрева фидеров контактной сети и фидеров обратного тока;

минимальное и среднее за 1 и 3 мин напряжение в контактной сети межподстанционных зон.

Программа КОРТЭС предусматривает расчет СТЭ без устройств регулирования напряжения, т.е. при работе преобразовательных агрегатов ТП по естественным внешним характеристикам с напряжением холостого хода $U_{xx} = 3500$ В.

При расчете СТЭ участка токи электровоза принимаются для выбранной скорости из выполняемого тягового расчета при постоянном напряжении на токоприемнике электровоза, равном 3000 В.

Расход ЭЭ на тягу A_T , полученный в результате электрического расчета СТЭ, равен сумме расхода ЭЭ на тягу по счетчикам электровоза $A_{эпс}$ и потерь ЭЭ в тяговой сети ΔA_{TC} :

$$A_T = A_{эпс} + \Delta A_{TC}. \quad (1)$$

При этом расход $A_{эпс}$ и потери ΔA_{TC} вычисляются отдельно по каждому участку для каждой выбранной скорости движения.

При введении устройств регулирования напряжения со стабилизацией на уровне от $U_{CT} = 3500$ В до $U_{CT} = 3700$ В существующая в программе КОРТЭС методика электрического расчета СТЭ дополнена уточнением токов электровоза I_3 , полученных по результатам тягового расчета при напряжении $U_3 = 3000$ В, на основе соотношения внешних характеристик ТП — естественной и стабилизированной [1].

В настоящей статье для электрических расчетов СТЭ используется новый подход к уточнению токов I_3 , основанный на методе итерации [2], т.е. на приближении расчетного расхода $A_{эпс}$ к базовому расходу $A_{эпс.б}$ (за $A_{эпс.б}$ принимается расход электроэнергии на тягу электровоза $A_{эпс}$ с выбранной скоростью движения при работе ТП с $U_{xx} = 3500$ В).

С другой стороны, при одинаковой массе поездов и одинаковых скоростях движения на участке без устройств или с устройствами регулирования напряжения расход электрической энергии $A_{эпс}$ должен оставаться постоянным и быть равным

$$A_{эпс} = U_3 \cdot I_3 \cdot t_r \quad (2)$$

где U_3 — напряжение на токоприемнике электровоза, В;
 t_r — время движения электровоза под током, мин.

При повышении напряжения на токоприемнике электровоза возможны два режима работы СТЭ участка [3]: первый предусматривает увеличение скорости движения и соответственно пропускной способности участка, второй позволяет сохранить неизменными скорость движения и пропускную способность.

В первом режиме при повышении напряжения на токоприемнике электровоза и сохранении неизменными токов электровоза, равных токам из тягового расчета при $U_3 = 3000$ В, расход $A_{эпс}$ увеличивается. Одновременно возрастают скорость движения поезда и пропускная способность участка.

Во втором режиме для сохранения неизменными скорости движения и расхода $A_{эпс}$ изменяется схема соединения тяговых двигателей и (или) степень ослабления возбуждения магнитного потока тяговых двигателей. В электрических расчетах СТЭ, чтобы сохранить неизменными скорость движения и расход $A_{эпс}$, необходимо уменьшить величину токов электровоза, т.е. ввести в расчет поправочные токовые коэффициенты $K_{I_{CT}}$ значения которых должны быть меньше единицы.

Расчет коэффициентов $K_{I_{CT}} < 1$ производится с использованием метода итерации. В программу КОРТЭС вводятся значения токов электровоза, полученные из тягового расчета при $U_3 = 3000$ В и умноженные на один из искомым коэффициентов $K_{I_{CT}} < 1$, полученный в процессе последовательного приближения расчетной величины $A_{эпс}$ к базовой $A_{эпс.б}$ с заданной погрешностью (например, не более 1 %).

Таким образом, при втором режиме работы СТЭ расход $A_{эпс}$ сохраняется практически неизменным, а потери ЭЭ в тяговой сети ΔA_{TC} и потери ЭЭ в трансформаторах ТП в режиме нагрузки $\Delta A_{т.нагр}$ снижаются.

Для оценки показателей $A_{тр}$, $A_{эпс}$, ΔA_{TC} и $\Delta A_{т.нагр}$ с помощью программы КОРТЭС и ее дополнения выполнены тяговые и электрические расчеты СТЭ на следующих участках, отличающихся друг от друга сложностью профиля пути:

- Хрустальная — Шаля (Свердловская ж.д.);
- Войновка — Богданович (Свердловская ж.д.);
- Курган — Колчедан (Южно-Уральская ж.д.).

Наиболее тяжелый участок по профилю пути (железная дорога в двух местах пересекает вершины Уральских гор) — Хрустальная — Шаля (рис. 1).

Профили пути участков Войновка — Богданович и Курган — Колчедан практически одинаковы.

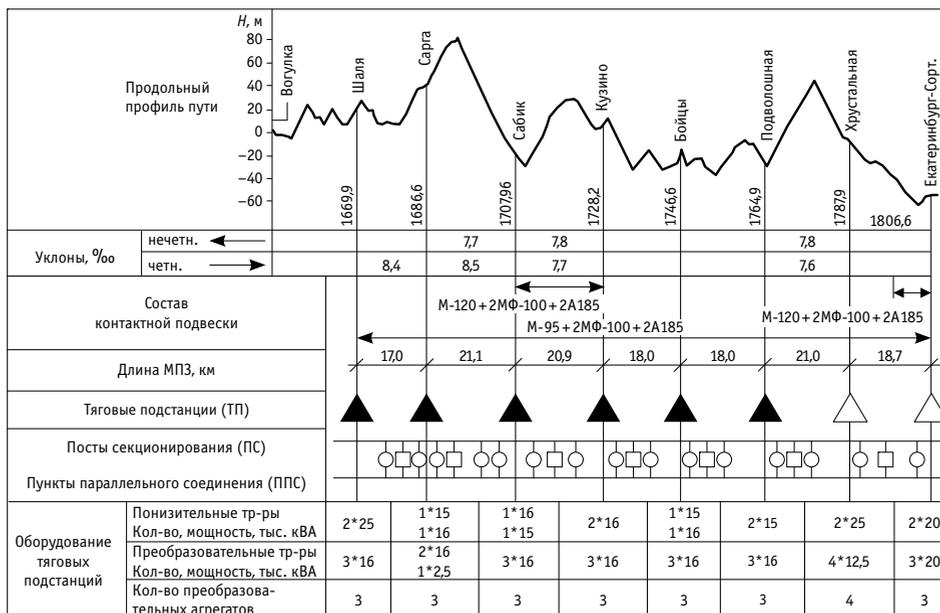


Рис. 1. Профиль пути участка Хрустальная — Шаля [4]:

- — пункт параллельного соединения; □ — пост секционирования;
- ▲ — существующая ТП с регулированием; ▲ — существующая ТП без регулирования

В табл. 1 приведены условия электрических расчетов СТЭ всех трех участков.

Таблица 1

Условия электрического расчета СТЭ участков

Условия расчета	Участки движения поездов		
	Хрустальная — Шаля	Войновка — Богданович	Курган — Колчедан
Тип локомотива	2ЭС10, 2хВЛ11	2ЭС6, 2хВЛ11	2ЭС6, 2хВЛ11
Масса состава, т	6000		
Напряжение в контактной сети для тяговых расчетов, В	3000		
Напряжение на шинах тяговых подстанций, В	$U_{xx} = 3500$ (естественные характеристики при отсутствии устройств регулирования напряжения)		
	$U_{ст} = 3700$ (стабилизированные характеристики с устройствами регулирования напряжения)		

Рассмотрим электрические расчеты СТЭ этих участков при движении одного грузового поезда повышенной массы 6000 т с различными типами электровозов. В четном направлении движение поездов отсутствует.

При выполнении электрических расчетов СТЭ по программе КОРТЭС в качестве начальных входных аргументов используют токи электровозов на каждом элементе пути, полученные из тяговых расчетов на участках с постоянным напряжением на токоприемнике электровозов $U_3 = 3000$ В. На рис. 2 и 3 представлены фрагменты тягового и электрического расчета участка Хрустальная — Шаля при пропуске грузового поезда повышенной массы состава 6000 т с локомотивом 2ЭС10.

Аналогичные расчеты выполнены для участков Войновка — Богданович и Курган — Колчедан с электровозами 2ЭС6 и 2хВЛ11.

В результате электрического расчета СТЭ участка Хрустальная — Шаля (см. рис. 3) получены: расход ЭЭ на тягу $A_T = 9793$ кВт·ч, потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{TC} = 642$ кВт·ч, потери в трансформаторах $\Delta A_T = 1337$ кВт·ч, из них нагрузочные $\Delta A_{T,нагр} = 25$ кВт·ч и холостого хода $\Delta A_{T,хх} = 1312$ кВт·ч (значение величины ΔA_T на рис. 2 не показано — фиксируется в программе КОРТЭС на отдельной странице).

Кроме того, определен расход $A_{эпс} = A_T - \Delta A_{TC} = 9151$ кВт·ч, который принят в качестве базового расхода $A_{эпс,б}$ используемого в дальнейшем при определении токовых поправочных коэффициентов K_{ICT} для электрического расчета СТЭ участка с повышенным (стабилизированным) напряжением на ТП.

В табл. 2–5 приведены результаты тяговых и электрических расчетов СТЭ на рассматриваемых участках железных дорог.

Электрические расчеты основных параметров системы тягового нерегулируемого электроснабжения, представленные в табл. 2, определяют установившееся значение расхода ЭЭ на тягу $A_{эпс}$ по счетчикам электровозов и соответствующие этому расходу установившиеся значения скорости движения поездов и пропускной способности участков.

Введение на электрифицированных участках постоянного тока устройств регулирования напряжения с одновременным его повышением до допустимого уровня 3700 В [5] позволило уменьшить потери ЭЭ и в целом снизить на тяговых подстанциях расход ЭЭ на тягу $A_{ТП}$ (см. табл. 3 и 4). При этом скорость движения поездов и пропускную способность, которые определяются практически равными величинами $A_{эпс}$ для участков с нерегулируемым (см. табл. 2) и регулируемым (см. табл. 3) электроснабжением можно принять одинаковыми.

Другой вариант работы СТЭ при повышении напряжения на ТП со стабилизацией на уровне 3700 В — это режим увеличения скорости и пропускной способности участков, что сопровождается ростом потерь и расхода электроэнергии на тягу. Результаты электрического расчета данного режима приведены в табл. 4.

Файл участка: C:\Program Files\Кортэс\Расчеты\Шаля-Хрустальная 50.pfk
Дорога: Свердловская
Участок: Шаля — Хрустальная / Свердловск — Шаля
Тип пути: звеньевой
Состав: Груз. 71у.в.23,5
Поезд: 2ЭС10, масса 6200 т, длина 1022 м, локомотив 2ЭС10 «Гранит»
Расход энергии: 8781,0 кВт·ч; рекуперация 0,0 кВт·ч;
Удельный расход: активн. 12,0 Вт·ч/т·км
Техническая скорость: 43,6 км/ч
Макс. ток поезда 3184 А на км 1706,20
Макс. перегрев обмоток двиг. (не расчч.)

Перегон	Длина, км	Время хода, мин		Расход энергии, кВт·ч	Остатки, кВт	Кратн. тяга
		полн.	п. током			
Хрустальная — Первоуральск	16,200	23,0	17,0	1786,2		
Первоуральск — Подволок	6,100	8,0	0,0	20,0		
Подволок — Виллобай	9,390	12,5	6,9	564,1		
Виллобай — Бойцы	9,020	11,9	2,9	375,0		
Бойцы — Коуровка	9,500	12,7	6,2	762,8		
Коуровка — Кузино	9,590	13,1	8,6	1077,6		
Кузино — Сабик	20,110	26,6	10,6	302,5		
Сабик — Сарга	20,870	29,6	22,4	2608,1		
Сарга — Паскушный	7,790	10,5	0,6	99,7		
Паскушный — Шаля	10,430	14,1	5,9	585,1		
Хрустальная — Шаля	118,000	162,3	81,0	8781,0		

Рис. 2. Фрагмент тягового расчета на участке Хрустальная — Шаля при пропуске грузового поезда массой 6000 т с локомотивом 2ЭС10

Результаты расчета по графику движения

Основные характеристики рабочего режима участка Шаля - Хрустальная

Объекты участка	Время расчета, мин: начало 0; продолж. 162; шаг 0,5
Итоговый отчет	Температура воздуха, °С 40
Нагрузки подст.	Параллельные графики движ. путей 1-го, 2-го
Нагрев проводов	Расход энергии, кВт·ч на тягу 9793; потери в тяг. сети 642 (6,6%)
Напряжения	рекуперация 0
Расход энергии	Ограничивающий ток выпрям. А 2377 3Ч3 Хрустальная
По зонам	Огр. коэф. нагрузки выпрям. 0,38 (доп. 1,5 2 мин) 3Ч3 Хрустальная
	преобразовательный тр-р понижающий тр-р 0,53 (доп. 2,0 1 мин) 3Ч3 Сабик
	Напряжения, В: минимальное 3028 1-й путь зоны Сарга - Сабик; среднее 3-мин 3031 1-й путь зоны Сарга - Сабик; поезд № 1 на км 1696,58 в 123 мин; поезд № 1 на км 1695,60
	Огр. темпер., °С: в конт. сети 44 (доп. 30* 20 мин) Ф5 3Ч3 Кузино
	в отсасывающей линии 41 (доп. 30* 20 мин) 3Ч3 Кузино

Рис. 3. Фрагмент электрического расчета СТЭ участка Хрустальная — Шаля при пропуске грузового поезда массой 6000 т с локомотивом 2ЭС10

Таблица 2

Расходы и потери ЭЭ в СТЭ с естественными характеристиками на ТП с напряжением холостого хода $U_{xx} = 3500$ В

Параметр		Значение и величина параметра					
Участок		Хрустальная — Шаля		Войновка — Богданович		Курган — Колчедан	
Скорость, напряжение ТП		50 км/ч, $U_{xx} = 3500$ В					
Электровоз		2ЭС10	2хВЛ11	2ЭС6	2хВЛ11	2ЭС6	2хВЛ11
Результаты электрических тяговых расчетов	$A_{ТР}$, кВт·ч	8781,0	8204,7	11391,0	11027,1	11978,1	12285,7
	$I_{Э}$, А	В расчетах КОРТЭС					
Результаты электрических расчетов СТЭ, кВт·ч	A_T	9793	9065	12941	12411	13724	14037
	ΔA_{TC}	642	528	491	549	430	519
	$A_{ЭЭС} = A_{ЭЭС.б} = A_T - \Delta A_{TC}$	9151	8537	12450	11862	13294	13518
	$\Delta A_{T,нагр}$	25	20	16	17	16	20
	$A_{ТП} = A_T + \Delta A_{T,нагр}$	9818	9085	12957	12428	13740	14057
Повышение $A_{ЭЭС.б}$ по сравнению с $A_{ТР}$, %		4,2	4,0	9,3	7,6	11,0	10,0

Таблица 3

Расходы и потери ЭЭ в СТЭ при повышении напряжения на ТП со стабилизацией на уровне 3700 В и снижением токов $I_{Э}$, полученных из тяговых расчетов

Параметр		Значение и величина параметра					
Участок		Хрустальная — Шаля		Войновка — Богданович		Курган — Колчедан	
Скорость, напряжение ТП		50 км/ч, $U_{СТ} = 3700$ В, $K_{I_{СТ}} < 1$					
Электровоз		2ЭС10	2хВЛ11	2ЭС6	2хВЛ11	2ЭС6	2хВЛ11
A_T при $U_{СТ} = 3700$ В и $K_{I_{СТ}} = 1$, кВт·ч		10456	9654	13816	13244	14630	14981
Поправочные токовые коэффициенты $K_{I_{СТ}}$ при $U_{СТ} = 3700$ В, ед.		0,92	0,93	0,93	0,92	0,93	0,93
Результаты электрических расчетов СТЭ при $U_{СТ} = 3700$ В и $K_{I_{СТ}} < 1$, кВт·ч	A_T	9622	8980	12850	12185	13607	13933
	ΔA_{TC}	531	447	399	437	349	421
	$A_{ЭЭС} = A_T - \Delta A_{TC}$	9091	8533	12451	11754	13258	13512
	$\Delta A_{T,нагр}$	31	25	24	25	24	29
	$A_{ТП} = A_T + \Delta A_{T,нагр}$	9653	9005	12874	12210	13631	13962

Таблица 4

Расходы и потери ЭЭ в СТЭ при работе ТП со стабилизацией напряжения на уровне $U_{СТ} = 3700$ В без снижения токов $I_{Э}$, полученных из тяговых расчетов

Параметр		Значение и величина параметра					
Участок		Хрустальная — Шаля		Войновка — Богданович		Курган — Колчедан	
Электровоз		2ЭС10	2хВЛ11	2ЭС6	2хВЛ11	2ЭС6	2хВЛ11
Результаты электрических расчетов СТЭ с $U_{СТ} = 3700$ В и $K_{I_{СТ}} = 1$, кВт·ч	A_T	10456	9654	13816	13224	14630	14981
	ΔA_{TC}	627	517	461	516	403	487
	$A_{ЭЭС} = A_T - \Delta A_{TC}$	9829	9137	13355	12728	14227	14494
	$\Delta A_{T,нагр}$	37	29	27	30	27	33
	$A_{ТП} = A_T + \Delta A_{T,нагр}$	10493	9683	13843	13274	14657	15014

Таблица 5

Сравнительная оценка работы СТЭ без устройств и с устройствами регулирования напряжения

Параметр		Значение и величина параметра					
Участок		Хрустальная — Шаля		Войновка — Богданович		Курган — Колчедан	
Электровоз		2ЭС10	2хВЛ11	2ЭС6	2хВЛ11	2ЭС6	2хВЛ11
Сохранение скорости при $U_{ст} = 3700$ В по сравнению с $U_{xx} = 3500$ В	Изменение $A_{эпс}$ ($U_{ст} = 3700$ В) по сравнению с $A_{эпс}$ ($U_{xx} = 3500$ В), %	-0,656	-0,047	0	+0,961	0	0
	Снижение $\Delta A_{тс}$ ($U_{ст} = 3700$ В) по сравнению с $\Delta A_{тс}$ ($U_{xx} = 3500$ В), %	17,3	15,2	20,4	18,7	18,8	18,9
	Снижение $A_{тп}$ ($U_{ст} = 3700$ В) по сравнению с $A_{тп}$ ($U_{xx} = 3500$ В), %	1,681	0,881	0,641	1,754	0,793	0,676
Увеличение скорости по сравнению с режимом сохранения скорости при введении $U_{ст} = 3700$ В	Увеличение $A_{эпс}$, %	8,12	7,08	7,26	8,34	7,31	7,3
	Увеличение $\Delta A_{тс}$, %	18,0	15,7	15,5	18,1	15,5	15,7
	Увеличение $A_{тп}$, %	8,7	7,529	7,527	8,714	7,527	7,535

Как видно из данных табл. 5, при введении в работу СТЭ устройств регулирования напряжения потери электроэнергии в тяговой сети $\Delta A_{тс}$ снижаются на 15–20 %, а расход ЭЭ на тягу тяговых подстанций $A_{тп}$ — на 0,7–1,7 %. Кроме того, при сохранении неизменными массы и скорости движения поездов, а соответственно и пропускной способности участков расход ЭЭ на тягу электровозов $A_{эпс}$ остается практически постоянным.

В режиме работы СТЭ со стабилизацией напряжения на ТП на уровне 3700 В при повышении скорости движения поездов (см. табл. 4) и пропускной способности увеличиваются: потери электроэнергии в тяговой сети $\Delta A_{тс}$ на 15,5–18 %, расход ЭЭ на тягу электровозов $A_{эпс}$ на 7,1–8,34 % и расход ЭЭ на тягу тяговых подстанций $A_{тп}$ на 7,5–8,7 % (см. табл. 5).

Все результаты расчетов, представленные в табл. 2–5, отдельно по участкам и типам электровозов не анализировались, а рассматривались в целом при скорости движения 50 км/ч.

В заключение отметим, что при введении устройств регулирования напряжения (по сравнению с нерегулируемым электроснабжением) в СТЭ участков с различными по сложности элементами пути, типами электровозов и широким диапазоном скоростей движения поездов установленной массы возможны следующие режимы работы:

при сохранении неизменными скорости движения поездов и пропускной способности участков расход электроэнергии на тягу по счетчикам электровозов не изменяется, а потери ЭЭ в тяговой сети и в целом расход ЭЭ на тягу тяговых подстанций снижаются;

при повышении напряжения до уровня стабилизации от 3500 до 3700 В происходит увеличение скорости (пропускной способности участков) при одновременном росте потерь ЭЭ и расхода ЭЭ на тягу.

Литература

- Аржанников Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов : моногр. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. 207 с.
- Виленкин Н. Я. Метод последовательных приближений. М. : Наука, 1968. 108 с.
- Аржанников Б. А., Набойченко И. О. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : моногр. Екатеринбург : УрГУПС, 2015. 258 с.
- Аржанников Б. А., Набойченко И. О. Усиление системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при пропуске тяжеловесных поездов // Транспорт Урала. 2015. № 2 (45). С. 13–17. ISSN 1815–9400.
- Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока / Б. А. Аржанников, М. П. Бадер, А. Т. Бурков и др. // Электротехника. 2016. № 9. С. 51–57. ISSN 0013–5860.

References

- Arzhannikov B. A. Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov : monogr. [Traction power supply of high-speed and heavy trains : a monograph]. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2012. 207 s.
- Vilenkin N. Ya. Metod posledovatel'nykh priblizheniy [Traction power supply of a direct current of high-speed and heavy traffic of trains : a monograph]. M. : Nauka, 1968. 108 s.
- Arzhannikov B. A., Naboychenko I. O. Kontseptsiya usileniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV : monogr. [A concept for reinforcement of 3.0 kV DC traction power supply system : a monograph]. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2015. 258 s.
- Arzhannikov B. A., Naboychenko I. O. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV pri propuske tyazhelovesnykh poezdov [3.0 kV DC traction power supply system amplification for heavy train traffic] // Transport Urala. 2015. № 2 (45). S. 13–17. ISSN 1815–9400.
- Sovershenstvovanie osnovnykh trebovaniy k sisteme i ustroystvam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka [Improvement of basic requirements for the system and devices of traction DC power supply] / B. A. Arzhannikov, M. P. Bader, A. T. Burkov i dr. // Elektrotehnika. 2016. № 9. S. 51–57. ISSN 0013–5860.

УДК 621.332:3(07)

Юрий Александрович Кочунов, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Александр Викторович Паранин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Николай Леонидович Иванов, кандидат технических наук, руководитель испытательного центра технических средств железнодорожного транспорта (ИЦ ТСЖТ) Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Дмитрий Викторович Егоров, аспирант кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КРОНШТЕЙНА КПВЛТ

Yuriy Alexandrovich Kochunov, PhD in Engineering, Senior Lecturer, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexander Viktorovich Paraniin, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikolay Leonidovich Ivanov, PhD in Engineering, Head of Railway Facilities Testing Center, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Dmitriy Viktorovich Egorov, postgraduate student, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Mechanical parameters of the polymer bracket KPVLТ

Аннотация

В статье рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования механических параметров и границ применимости полимерного кронштейна КПВЛТ производства «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ» (Екатеринбург). Кронштейн КПВЛТ предназначен для поддержания и изоляции проводов воздушной линии электропередачи устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и линии продольного электроснабжения (ПЭ) напряжением 6–10 кВ.

Ключевые слова: полимерный кронштейн, прочность, деформация, устойчивость, нагрузка, прогиб.

Summary

The theoretical and experimental studies of mechanical parameters and the limits of applicability of the KPVLТ polymer bracket produced by Scientifically-Industrial Enterprise «ELECTROMASH» (Ekaterinburg) are considered in the article. The KPVLТ bracket is designed to support and isolate the wires of the overhead transmission line of signaling, centralization and interlocking devices and longitudinal power supply line with a voltage of 6–10 kV.

Keywords: polymer bracket, strength, deformation, stability, load, deflection.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-76-81

Полимерные композитные материалы (ПКМ), а также конструкции и изделия из них находят все большее применение в сферах народного хозяйства Российской Федерации. Это обусловлено прежде всего тем, что традиционные материалы (главным образом металлы) не всегда отвечают потребностям современной инженерной практики. Например, в особо жестких условиях эксплуатации незаменимость композитов обеспечивается сочетанием таких важнейших характеристик, как высокая механическая прочность, теплостойкость, коррозионная стойкость, малая плотность. К тому же многообразие комбинаций различных исходных материалов и компонентов, а также технологий их переработки в композитные материалы и изделия практически бесконечно и ограничено только уровнем развития науки и техники. При этом используются такие преимущества композитов, как возможность «бесстружечной» обработки (литье, прессование, экструзия) с получением изделий любой формы, что существенно снижает производственные затраты. В мировой практике композиционные материалы подразделяются на полимерные, керамические, металлические, а также углерод-углеродные композиты. В настоящее время на международном и российском рынке наибольшее распространение получили полимерные композиционные материалы, которые в зависимости от типа используемого волокна делятся на угле-, стекло-, органо-, базальтопластики и т.п. Кроме того, ПКМ делятся на непрерывно-армированные (в качестве наполнителя выступают текстильные материалы на основе непрерывных волокон: нити, жгуты,

ленты, ткани, объемные плетеные формы), дискретно армированные (упрочненные дискретными — рублеными или штапельными — волокнами) и наполненные (упрочненные различного рода дисперсными частицами). В современной технике наибольший интерес представляют непрерывно-армированные ПКМ. Такие материалы, по праву относящиеся к классу конструкционных, способны обеспечить максимальную реализацию прочностных характеристик при создании уникальных изделий и конструкций нового поколения для ответственных сооружений и сложных технических систем [1].

К числу наиболее перспективных рынков ПКМ в России сегодня можно отнести строительную отрасль, нефтегазовую промышленность, железнодорожный и автомобильный транспорт, судостроение. Исторически сложилось так, что большая часть исследований и разработок по применению ПКМ на железнодорожном транспорте выполнена в Европе, Японии и Северной Америке. В России широкомасштабному внедрению композиционных материалов посвящены целевые программы [2, 3]. В настоящее время сложилась благоприятная ситуация использования ПКМ как для подвижного состава, так и для элементов верхнего строения пути и инфраструктуры, поскольку препятствий к применению неметаллических деталей и узлов постепенно становится все меньше [4, 5].

Вместе с тем, несмотря на хорошие механические характеристики, не всегда удается рассчитать конструкции из ПКМ с достаточной точностью, что обусловлено анизотропией материала. Поэтому достоверность расчетов можно подтвердить только экспериментальным путем. В статье рассмотрены результаты исследования полимерного кронштейна КПВЛТ (производство «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ», Екатеринбург) для трехфазной воздушной линии напряжением 6–10 кВ с треугольным расположением фаз.

Конструкция состоит из стеклопластиковых стержней круглого профиля СПП-ЭИ(Н) [6], соединенных арматурой и крепежными элементами. Арматура выполнена из обычной углеродистой стали. Метрические болты и гайки изготовлены из конструкционной стали.

Как поддерживающая механическая конструкция КПВЛТ рассчитывается по методу трех предельных состояний — прочности, деформации, устойчивости.

Общая механическая прочность конструкции определяется механическими напряжениями, которые возникают во всех ее элементах при нагрузке, включая соединительную арматуру и крепеж.

Деформация ограничена прогибом горизонтальной нижней и верхней траверсы, которые должны составлять не более 1/150 от их длины [7].

Коэффициент запаса устойчивости стержня подкоса должен быть больше 1. Других неустойчивых элементов в конструкции нет.

Для современных методик расчета и анализа конструкции в целом, включая возможность изготовления, наиболее рационально создать трехмерную геометрию КПВЛТ (рис. 1).

Предполагается, что КПВЛТ устанавливается с полевой стороны опор контактной сети. В связи с этим расчет механических нагрузок от проводов линии производится на основании СТН ЦЭ 141–99 [7]. В качестве типового провода выбран комбинированный АС-70, принят третий ветровой и гололедный район. Расчеты большинства поддерживающих конструкций контактной сети (консоли, фиксатор-

ные и консольные стойки) также выполнены для данных условий.

Рассчитанные линейные нагрузки умножаются на длину пролета. Дополнительно к нагрузкам от собственного веса проводов, веса гололеда и ветра на кривых участках пути возникает усилие от изменения направления провода:

$$P_H = \frac{H \cdot l}{R}, \quad (1)$$

где H — натяжение провода, Н;

l — длина пролета, м;

R — радиус кривой, м.

Если расчетный режим линии ПЭ — гололед с ветром, то натяжение провода при этом равно максимально допустимому значению, следовательно, и величина P_H максимальна.

С уменьшением радиуса кривой длина пролета сокращается. Максимально допустимое значение длины пролета контактной сети от радиуса кривой указано в ПУТЭКС [8] (рис. 2а). Более точная величина длины пролета зависит от контактной подвески и климатических условий и определяется расчетным путем. Данный расчет дает всегда меньшее значение длины пролета по сравнению со значениями в ПУТЭКС. Таким образом, величина P_H (рис. 2б), определенная по длине пролета из ПУТЭКС,

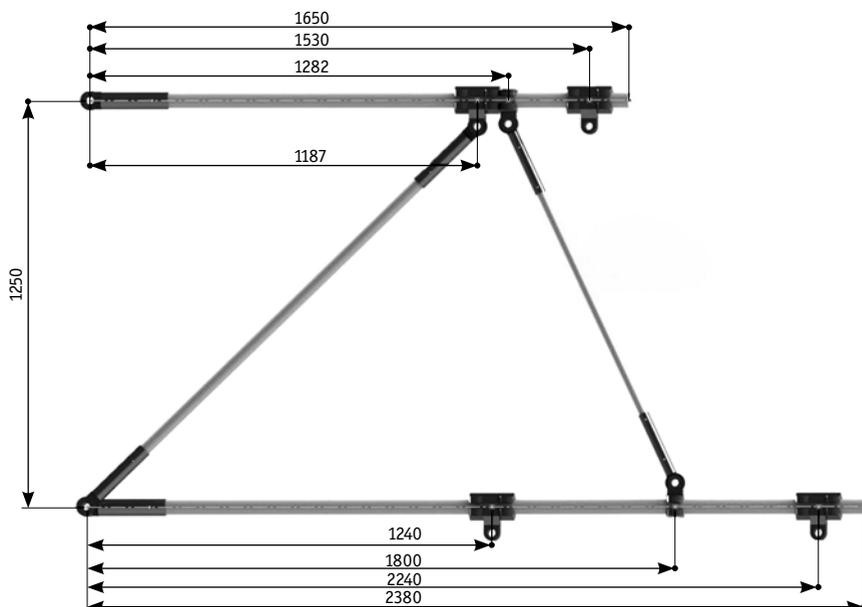


Рис. 1. Трехмерная параметризованная геометрия КПВЛТ без крепежа

является максимально возможной. Горизонтальные и вертикальные силы складываются векторно и дают суммарную результирующую нагрузку (рис. 2в), расположенную под определенным углом к горизонтали (рис. 2г).

Следовательно, для выбранных условий третьего гололедного и ветрового района и провода АС-70 максимальное значение нагрузки составляет 1738 Н под углом 48°. В дальнейших механических расчетах эта величина используется как характерное значение для определения условий применимости. Максимальная нагрузка достигается на кривых участках пути радиусом 1500 м при максимальной длине пролета 70 м. На кривых с радиусом 300 м и более нагрузки получаются меньше.

ОЦЕНКА ОГРАНИЧИВАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПО МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КПВЛТ

Необходимо оценить и механическую прочность крепежных деталей, в основном болтов. В наиболее нагруженном состоянии находятся болты, закрепляющие оконцеватели стеклопластиковых стержней (т.е. верхняя траверса и тяга), работающих на растяжение. Данные болты работают на срез под действием силы растяжения в стержнях. В тяге используются три болта М6×0,75, в верхней траверсе — три М10×1,5. Марка стали болтов — 20. Допустимое напряжение на срез — 54, на растяжение — 108 МПа. Расчет на прочность болтов производится по нормам расчета ПНАЭ Г-7-002-86.

Площадь сечения болта определяется по формуле

$$A_w = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4}, \quad (2)$$

где d_3 — диаметр резьбы по впадинам, мм. Напряжение среза по резьбовой части вычисляется как

$$\tau_w = \frac{Q_w}{A_w \cdot n_w}, \quad (3)$$

где Q_w — поперечное усилие на болты, равное силе растяжения стержня, Н; n_w — число болтов, шт.

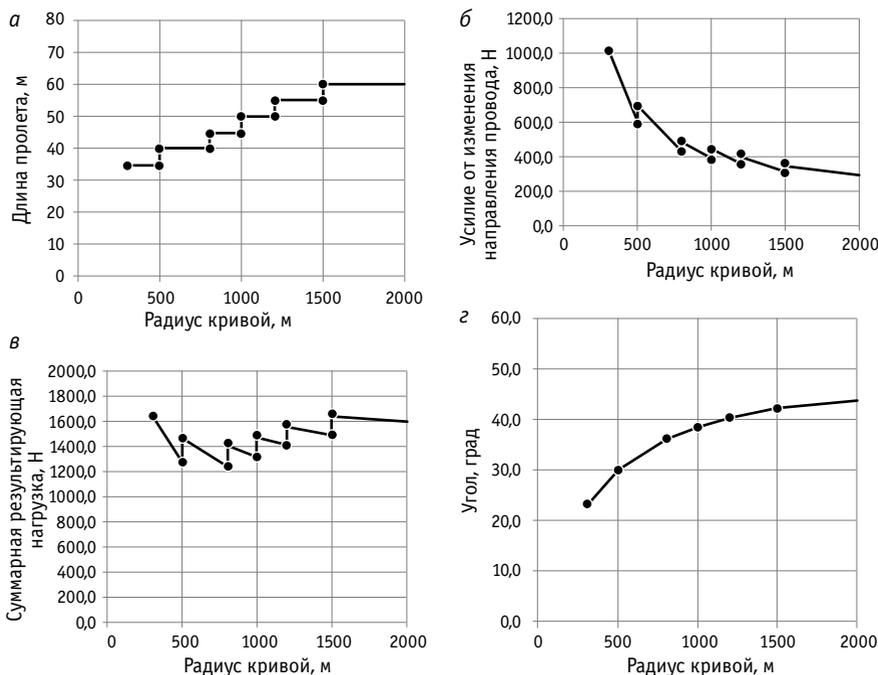


Рис. 2. Диаграммы расчетных значений при определении нагрузок от проводов на кронштейн:

- а — максимально допустимая длина пролета контактной сети в зависимости от радиуса кривой на основании ПУТЭКС; б — максимальное значение P_n в зависимости от радиуса кривой;
- в — суммарная результирующая нагрузка от провода в зависимости от радиуса кривой на основании ПУТЭКС; г — угол суммарной результирующей нагрузки от провода в зависимости от радиуса кривой

Результаты расчета приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что именно болты оконцевателей в тяге и верхней траверсе являются слабым местом по механической прочности кронштейна и ограничивают область его применения по нагрузкам.

С коэффициентом запаса 1,2 принято, что допустимое поперечное усилие на болты в тяге составляет 2700, в верхней траверсе — 7000 Н. Исходя из этого определе-

ны максимально допустимые соотношения между вертикальной G и горизонтальной P нагрузкой от провода в каждой точке подвеса кронштейна (рис. 3).

При $P = 2000$ Н ограничение идет по болтам оконцевателя верхней траверсы, при остальных значениях P — по болтам оконцевателя тяги. Реакция тяги не зависит от горизонтальной нагрузки, поэтому кривая на рис. 3 идет горизонтально до значения $P < 1500$ Н.

Таблица 1

Механический расчет болтов оконцевателей в тяге и верхней траверсе

Параметр	Тяга	Верхняя траверса
Марка болтов, количество	М6×0,75 (3 шт.)	М10×1,5 (3 шт.)
Диаметр резьбы по впадинам, мм	5,08	8,16
Поперечное усилие на болты, Н	2695	6321
Напряжение среза по резьбовой части, МПа	44,3	40,3
Коэффициент запаса	1,22	1,33

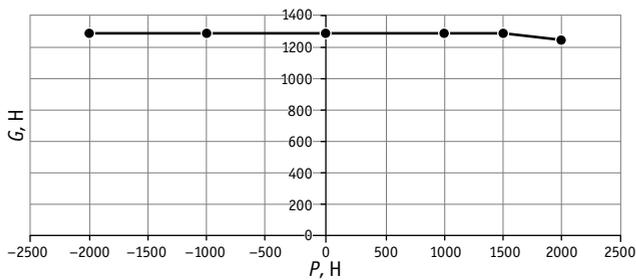


Рис. 3. Область допустимых нагрузок на кронштейн от проводов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРОГИБА СЖАТО-ИЗОГНУТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРОНШТЕЙНА В СБОРЕ

Экспериментальные исследования полимерного кронштейна КПВЛТ проведены в испытательном центре технических средств железнодорожного транспорта УрГУПС. В ходе механических испытаний определялись следующие параметры: деформация кронштейна (прогиб в узлах фиксации проводов), наличие дефектов защитной электроизоляционной оболочки, удлинение высокопрочного полиэтиленового каната при растяжении. Использовалось такое оборудование: полимерный кронштейн КПВЛТ, динамометр электронный универсальный АЦДУ-50И-1, динамометр электронный универсальный АЦДУ-10И-1, динамометр ДПУ-0,5-2, талреп М22 (крюк-кольцо), цинк DIN 1480 90026, комплекс регистрации перемещений Spider 8, прогибомер Аистова — Овчинникова 6-ПА0-0,01, высокопрочные полиэтиленовые канаты $d = 7$ мм с разрывной нагрузкой 4900 кгс.

Кронштейн КПВЛТ был смонтирован на специальной раме (рис. 4). С помощью талрепов на каждом узле крепления проводов устанавливалась нагрузка 1700 Н, которая задавалась путем натяжения заанкерированных высокопрочных полиэтиленовых канатов (рис. 5). Фиксация требуемого уровня напряжения осуществлялась на мониторах электронных динамометров АЦДУ (Д) и по шкале динамометра ДПУ-0,5-2 (Д). Каждый датчик был пронумерован в соответствии с номером узла крепления проводов (см. рис. 5). Для определения перемещений к местам приложения нагрузки были установлены датчики перемещения комплекса Spider 8 и прогибомеры 6-ПА0-0,01 (рис. 6).

Испытания проведены в два этапа (в каждом опыте фиксировалось удлинение высокопрочного полиэтиленового каната ΔL): на первом этапе определялись перемещения при вертикальном и горизонтальном приложении сил (в точке 3 — угол 48° к горизонту, в точках 1 и 2 — 30°), суммарная нагрузка на каждый узел $Q = 1700$ Н (170 кг);

на втором этапе определялись перемещения при вертикальном приложении сил, нагрузка на каждый узел $G = 1700$ Н (170 кг).

Результаты испытаний приведены в табл. 2 и на графиках перемещений (рис. 7).

На графике перемещений при нагрузке G (см. рис. 7б) значения фиксировались в установившемся режиме — в момент одновременного нагружения всех узлов кронштейна, данный момент указан стрелкой.



Рис. 4. Кронштейн КПВЛТ, закрепленный на раме

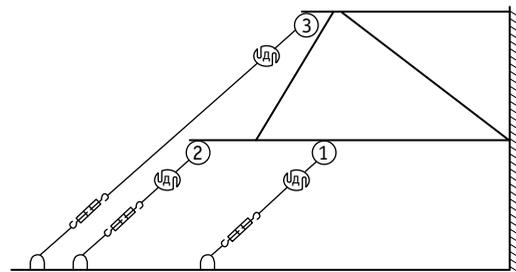


Рис. 5. Схема и нумерация узлов крепления датчиков

а



б



Рис. 6. Регистрация величины напряжения и перемещений:

а — показания динамометров и Spider 8;

б — значения прогибомера Аистова

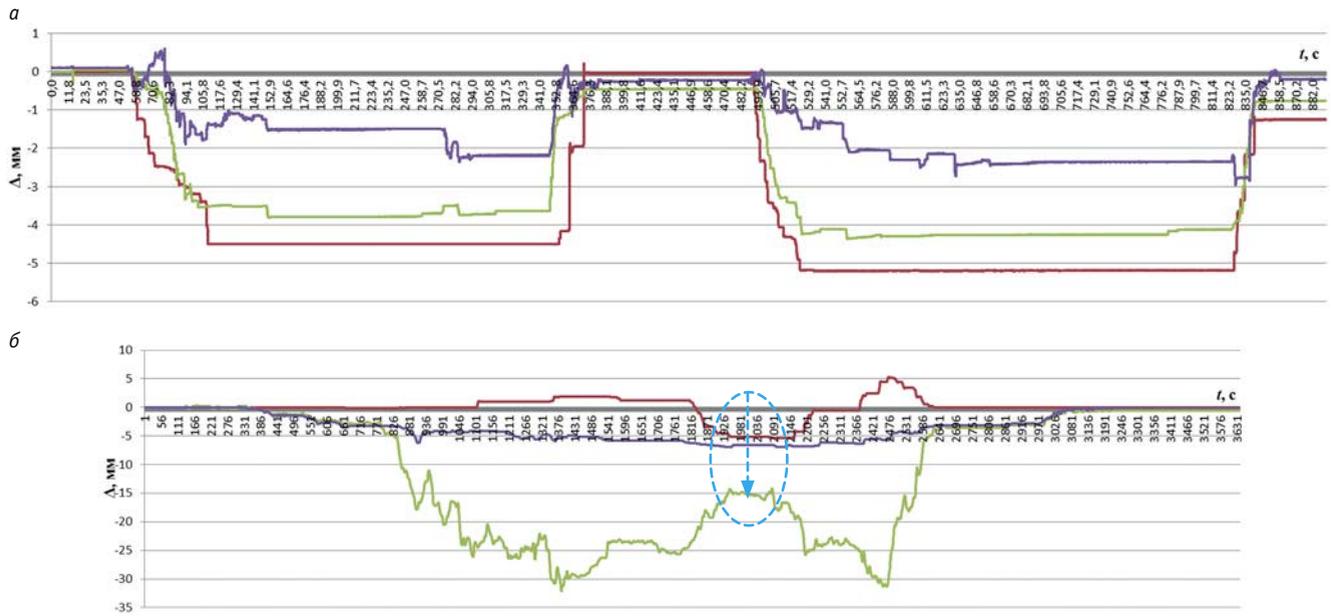


Рис. 7. Графики перемещений датчиками Spider 8 при нагрузках Q (а) и G (б):
— датчик 1; — датчик 2; — датчик 3

Таблица 2

Результаты механических испытаний кронштейна КПВЛТ

№ узла	Датчик	Перемещение в узлах, мм			
		Нагрузка Q , кг		Нагрузка G , кг	
		0	170	0	170
1	Spider 8	0	5,4	0	5,15
	Прогибомер	3573	3010 (5,63)	3956	3954 (0,002)
	Δl	1880	1889 (9)	1889	1890 (1)
2	Spider 8	0	2,3	0	15,0
	Прогибомер	7101	7344 (2,43)	5512	3960 (15,52)
	Δl	750	755 (5)	755	757 (2)
3	Spider 8	0	4,3	0	5,02
	Прогибомер	5462	5928 (4,66)	7071	6560 (5,11)
	Δl	1640	1647 (7)	7647	1648 (1)

Как следует из верификации полученных результатов (см. табл. 2), расхождение в показаниях датчиков Spider 8 и прогибомеров 6-ПАО-0,01 при нагрузке Q составляет около 5%, что свидетельствует о достаточно точном методе измерения перемещений элементов кронштейна.

В ходе проведенных исследований не зафиксировано ни нарушений защитного слоя, ни возникновения трещин, сколов и других дефектов кронштейна и узлов крепления.

Удлинение высокопрочного полиэтиленового каната Δl в первом опыте составило порядка 5–10 мм, что объясняет-

ся затяжкой узлов. Во втором опыте значение Δl не превышало 2 мм, что подтверждает возможность использования высокопрочного каната в качестве несущего элемента, работающего на растяжение.

Таким образом, выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что кронштейн КПВЛТ соответствует требованиям СТН ЦЭ 141–99 [7] по механической прочности, прогибам стержней, устойчивости подкоса и может применяться на воздушной линии электропередачи устройств СЦБ и ПЭ напряжением 6–10 кВ.

Литература

1. Каблов Е. Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
2. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (в нов. ред.) : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 29.08.2013 г. № 1535-р [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499091753> (дата обращения: 06.07.2017).
3. Об утверждении отраслевой программы внедрения композиционных материалов, конструкций и изделий из них в строительном комплексе Российской Федерации : приказ Минрегионразвития России от 24.07.2013 г. № 306 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499043290> (дата обращения: 06.07.2017).
4. Композиционные материалы на железнодорожном транспорте [Электронный ресурс]. URL: <http://center-science.ru/files/zgd.pdf> (дата обращения: 06.07.2017).
5. Кочунов Ю. А., Грехов А. О. Современные поддерживающие конструкции // Инновационный транспорт — 2016: специализация железных дорог : матер. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию основания УрГУПС. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2017. С. 67–73.
6. Кочунов Ю. А. Применение композитных материалов для изготовления поддерживающих конструкций линий продольного электроснабжения // Транспорт Урала. 2014. № 1 (40). С. 76–80. ISSN 1815-9400.
7. СТН ЦЭ 141–99. Нормы проектирования контактной сети / Департамент электрификации и электроснабжения МПС Рос. Федерации. М. : Трансиздат, 2001. 253 с.
8. ЦЭ-868. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог / Департамент электрификации и электроснабжения МПС Рос. Федерации. М. : Трансиздат, 2002. 184 с.

References

1. Kablov E. N. Kompozity: segodnya i zavtra [Composites: today and tomorrow] // Metally Evrazii. 2015. № 1. S. 36–39.
2. Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii «Razvitiye promyshlennosti i povysheniye ee konkurentosposobnosti» (v nov. red.) : rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 29.08.2013 g. № 1535-r [On approval of the state program of the Russian Federation «Development of industry and enhancing its competitiveness» (in new ed.) : Order of the Government of the Russian Federation of Aug 29, 2013 № 1535-r]. [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499091753> (access date: 06.07.2017).
3. Ob utverzhdenii otraslevoy programmy vnedreniya kompozitsionnykh materialov, konstruksiy i izdeliy iz nikh v stroitel'nom komplekse Rossiyskoy Federatsii : prikaz Minregionrazvitiya Rossii ot 24.07.2013 g. № 306 [On approval of the sectoral program for the introduction of composite materials, structures and products from them in the construction sector of the Russian Federation : Order of the Ministry of Regional Development of Russia of July 24, 2013, No. 306]. [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499043290> (access date: 06.07.2017).
4. Kompozitsionnye materialy na zheleznodorozhnom transporte [Composite materials in railway transport]. [Electronic resource]. URL: <http://center-science.ru/files/zgd.pdf> (access date: 06.07.2017).
5. Kochunov Yu. A., Grekhov A. O. Sovremennye podderzhivayushchie konstruksii [Modern supporting structures] // Innovatsionnyy transport – 2016: spetsializatsiya zheleznykh dorog : mater. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 60-letiyu osnovaniya UrGUPS. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2017. S. 67–73.
6. Kochunov Yu. A. Primeneniye kompozitnykh materialov dlya izgotovleniya podderzhivayushchikh konstruksiy liniy prodo'l'nogo elektrosnabzheniya [Application of composite materials for manufacturing of supporting structures of longitudinal power supply lines] // Transport Urala. 2014. № 1 (40). S. 76–80. ISSN 1815-9400.
7. STN TsE 141-99. Normy proektirovaniya kontaktnoy seti [Norms of designing a contact network] / Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniya MPS Ros. Federatsii. M. : Transizdat, 2001. 253 s.
8. TsE-868. Pravila ustroystva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoy seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Rules for the arrangement and technical operation of the contact network of electrified railways] / Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniya MPS Ros. Federatsii. M. : Transizdat, 2002. 184 s.

УДК 656.259

Игорь Валерьевич Кондратьев, ассистент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
 Валерий Александрович Сисин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ТОРМОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ДИСКОВЫМИ ТОРМОЗАМИ

Igor Valeryevich Kondratyev, Assistant Lecturer, Electric Machinery Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Valeriy Alexandrovich Sisin, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Machinery Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

The research of braking controlling processes of electric rolling stock with disc brakes

Аннотация

Максимальная программная скорость движения электроподвижного состава зависит от характера изменения коэффициента трения фрикционных пар тормозов. При этом в современном электроподвижном составе применяются дисковые тормоза, коэффициент трения которых значительно отличается от коэффициентов, заложенных в алгоритмы торможения специальных систем безопасности.

В статье дан сравнительный анализ коэффициентов трения дисковых тормозов различных производителей и программного коэффициента трения системы БЛОК.

Рассмотрена возможность расчета коэффициентов трения дисковых тормозов электропоездов ЭС1, ЭС2Г, ЭС2ГП «Ласточка» на основе данных электронного регистратора параметров движения этих поездов.

Ключевые слова: удельная тормозная сила, коэффициент трения, электропоезд, стендовые испытания, экстренное торможение, БЛОК, САУТ.

Summary

Maximum program speed of movement of an electric rolling stock depends on the nature of a friction coefficient change of friction brakes. At the same time there are disc brakes used in modern electric rolling stock, the friction coefficient of which differs significantly from factors incorporated in braking algorithms of special safety systems.

The article analyses the friction coefficients of the disc brakes made by different manufacturers and a software friction coefficient of the SLJC system (safe locomotive joint complex).

A possibility of calculating the friction coefficients of the disc brakes for electric trains ES1, ES2G, ES2GP (Desiro RUS) based on the data of electronic registrar of parameters of these trains movement are considered.

Keywords: specific braking power, friction coefficient, electric train, bench tests, emergency braking, safe locomotive joint complex, automatic braking control system.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-82-86

Развитие железнодорожного транспорта в России имеет важное стратегическое и экономическое значение для государства. В рамках актуализированной Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года [1] перед ОАО «РЖД» стоит множество задач, среди которых — обновление парка подвижного состава транспорта общего пользования, развитие пригородного пассажирского, а также скоростного и высокоскоростного движения поездов в дальнем следовании. Для этих целей в 2016–2030 гг. ОАО «РЖД» следует закупить 15,7 тыс. единиц моторвагонного подвижного состава (МВПС).

Увеличение пассажиропотока, скоростей МВПС, развитие перспективных систем автоведения локомотивов требует усовершенствования и модернизации комплекса технических средств инфраструктуры железнодорожных перевозок и подвижного состава, отвечающих за безопасность и надежное движение на перегонах и станциях [2–7].

Для обеспечения безопасности движения на локомотивы и МВПС устанавливаются специальные системы безопасности, такие как комплексное локомотивное устройство безопасности (КЛУБ) различных модификаций [8], безопасный локомотивный объединенный комплекс (БЛОК) [9], телемеханическая система контроля бодрствования машиниста (ТСКБМ) и др.

Например, при необходимости ограничения скорости движения или остановки поезда в каждой точке пути БЛОК вычисляет программную скорость, которая зависит от таких параметров, как расчетное значение программного замедления $a_{пр}$, расстояние до точки прицельной остановки (с учетом пути подготовки тормозов) S , фактическое значение замедления $a_{ф}$, значение разрядки давления сжатого воздуха в тормозной магистрали P и значение давления при наполнении тормозных цилиндров $P_{тц}$. В общем виде функция программной скорости движения представляет собой зависимость

$$v_{пр} = f(a_{пр}, S, a_{ф}, P, P_{тц}). \quad (1)$$

Программное замедление $a_{пр}$ учитывает: выбранную степень пневматического торможения, замедление $a_{сп}$ обусловленное спрямленным по тормозной траектории профилем пути, и расчетное значение замедления для экстренного торможения $a_{эстр}$. Остальные параметры, учитываемые в расчете программной скорости движения поезда, поступают с датчиков системы управления локомотивом или МВПС. Значение замедления при экстренном торможении имеет общий вид

$$a_{эстр} = f(\theta_p, \varphi_{кр}), \quad (2)$$

где θ_p — тормозной коэффициент;

$\varphi_{кр}$ — функция расчетного коэффициента трения колодки о бандаж в зависимости от программной скорости.

В справочной литературе по тяговым расчетам [10, 11] предложены формулы определения коэффициентов трения для стандартных чугуновых колодок $\varphi_{кр}^ч$, чугуновых колодок с повышенным содержанием фосфора $\varphi_{кр}^{чф}$, а также для композиционных колодок $\varphi_{кр}^к$:

$$\varphi_{кр}^ч = 0,27 \frac{v+100}{5v+100}; \quad (3)$$

$$\varphi_{кр}^{чф} = 0,30 \frac{v+100}{5v+100}; \quad (4)$$

$$\varphi_{кр}^к = 0,36 \frac{v+150}{2v+150}. \quad (5)$$

Однако на сети дорог ОАО «РЖД» массово эксплуатируются современные скоростные электропоезда ЭС1, ЭС2Г, ЭС2ГП «Ласточка», разработанные Группой Синара совместно с компанией Siemens, в тормозной системе которых применены накладки и дисковые тормоза различных производителей.

Опыт эксплуатации и проектирования показывает, что для высокоскоростного и скоростного подвижного состава наиболее рационально и эффективно использовать дисковые тормоза. Среди преимуществ дискового тормоза можно назвать относительно малую массу тормозного оборудования, сниженную термическую нагрузку на профиль колеса, высокое значение коэффициента полезного действия, меньшие вибрации при торможении, большой диапазон выбора материалов трения, быстроедействие, сниженный уровень шума во время торможения. При этом исследований и информации о характере и изменении коэффициента трения дискового тормоза $\varphi_{кр}^д$ недостаточно, в связи с чем зависимость $\varphi_{кр}^д(v_{пр})$, применяемая для расчета программной скорости движения, аппроксимируется дробно-рациональной функцией. Для пассажирского варианта и при использовании электропневматического торможения (ЭПТ) значение $\varphi_{кр}^д(v_{пр})$ имеет вид

$$\varphi_{кр}^д = 0,17 \frac{v+100}{3v+40}. \quad (6)$$

Анализ выражений (3)–(6) показывает (рис. 1), что значение вычисленного $\varphi_{кр}^д$ в алгоритме расчета программной скорости движения системы БЛОК сопоставимо с характери-

стикой коэффициента трения для чугуновых колодок с повышенным содержанием фосфора на скоростях более 20 км/ч. На скоростях от 0 до 20 км/ч программный коэффициент трения $\varphi_{кр}^д$ падает от 0,425 до 0,2.

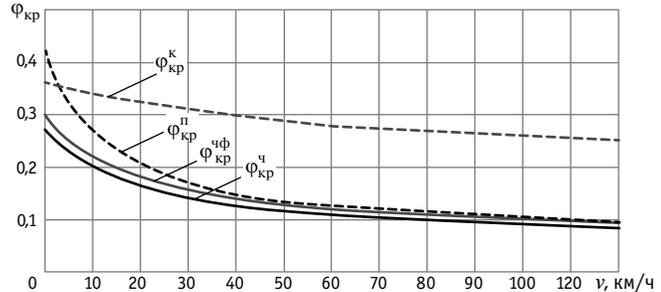


Рис. 1. Изменение расчетных коэффициентов трения в зависимости от скорости движения

В то же время специалистами Тверского вагоностроительного завода для определения характера изменения коэффициента трения проведены стендовые испытания дисковых тормозов производства ОАО «ТВЗ» (Россия) и Knorr-Bremse (Германия). Для дисковых тормозов ОАО «ТВЗ» использовались накладки из металлокерамики ФМК-11 [12]. В результате испытаний значение полученного коэффициента трения $\varphi_{кр}^д$ оказалось близким к 0,4 и слабо зависело от скорости. Исследование дискового тормоза Knorr-Bremse [13] проводили с накладками из чугуна. Полученный коэффициент трения имел значение 0,22 в начале торможения с любой скоростью и возрастал до 0,34 к концу торможения.

В работе [14] определен характер изменения коэффициента трения от скорости скольжения для диска, выполненного из стали 20Х13, и тормозных башмаков, снабженных накладками из фрикционного материала ФМК-11, и получено расчетное выражение

$$\varphi_{кр}^д = 0,431 - 0,019v_{ск} + 6,657 \cdot 10^{-4}v_{ск}^2. \quad (7)$$

Результаты расчетов представлены на рис. 2.

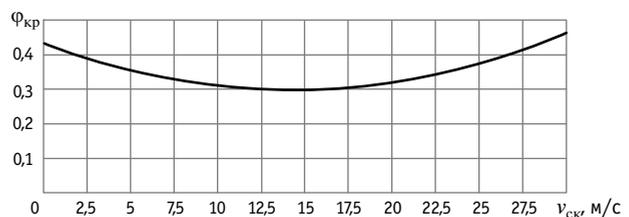


Рис. 2. Изменение коэффициента трения от скорости скольжения накладки по диску

В [15] приведены результаты испытания опытных образцов двух видов пар трения дискового тормоза: фрикционной пары № 1 — металлокерамической накладки из материала «Диафрикт-4К» (ОАО «Фритекс») с невентилируемым тормозным диском из стали 20Х13 (ОАО «ТВЗ»), а также фрикционной пары № 2 — композиционной накладки AV1 (Italian brackets)

с вентилируемым чугунным тормозным диском (ОАО «Транспневматика»). Фрикционную пару № 1 испытывали на стендовом оборудовании ЗАО «ТИВ», фрикционную пару № 2 — на стенде ОАО «ВНИКТИ» (рис. 3). Сила нажатия накладок на диск — 24,5 и 39,2 кН для первой и второй пары трения соответственно.

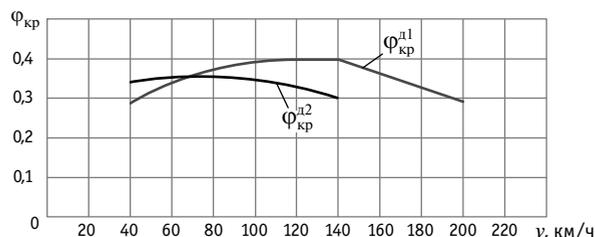


Рис. 3. Изменение коэффициента трения от скорости движения: $\varphi_{кр}^1$ — для фрикционной пары № 1; $\varphi_{кр}^2$ — для фрикционной пары № 2

Как видно из результатов испытаний, значение и характер изменения коэффициентов трения для разных материалов пар трения дисковых тормозов отличаются. При этом приведенные коэффициенты трения дисковых тормозов выше 0,3 в гораздо большем диапазоне фактических скоростей, чем $\varphi_{кр}^1$, используемый для расчета программной скорости движения. Соответственно рассчитываемая допустимая максимальная программная скорость в системе БЛОК занижена.

Анализ фактического тормозного пути (при экстренном торможении), т.е. пути, который проходит поезд с постоянным давлением сжатого воздуха в тормозных цилиндрах, позволяет определить коэффициент трения установленных на электропоезде ЭС1, ЭС2Г, ЭС2ГП «Ласточка» дисковых тормозов различных производителей. Согласно ПТР [10], действительный тормозной путь рассчитывается по зависимости

$$S_{дл} = \sum \frac{500(v_n^2 - v_k^2)}{\zeta(1000 \cdot \theta_p \varphi_{кр} + w_{0x} + i_c)}, \quad (8)$$

где v_n и v_k — начальная и конечная скорости в расчетном интервале, км/ч;

ζ — ускорение поезда под действием удельной ускоряющей (замедляющей) силы, равной единице, км/ч²;

$1000 \cdot \theta_p \varphi_{кр}$ — удельная тормозная сила (b_T), Н/кН;

w_{0x} — основное удельное сопротивление движению, Н/кН;

i_c — дополнительное удельное сопротивление движению, Н/кН.

Для определения коэффициента трения дискового тормоза $\varphi_{кр}$ в выражении (8) необходимо проанализировать тормозную силу b_T экстренного торможения.

27 июля и 5 августа 2017 г. на экспериментальном кольце ВНИИЖТ были проведены испытания электропоездов: сдвоенного 10-вагонного ЭС2Г-069/070 и 5-вагонного ЭС2Г-071, оборудованных дисковым тормозом производства ОАО «Транспневматика». Во время испытаний были произведены торможения электропоезда: замедление реализовывалось и совместным применением электрического тормоза с электропневматическим тормозом, и использованием только электропневмати-

ческого тормоза. Данные испытаний записывались микропроцессорной системой управления и диагностики (МПСУИД) на регистратор параметров движения (РПМ).

Для определения тормозной силы электропоезда при экстренном электропневматическом торможении были выделены участки, удовлетворяющие следующим требованиям:

отсутствие тяги и электрического торможения;

давление сжатого воздуха в тормозной магистрали менее 0,1 МПа;

постоянное давление сжатого воздуха в тормозном цилиндре;

начальная скорость движения больше нуля.

Фрагмент записи РПМ одного из таких участков, сделанной на испытаниях сдвоенного 10-вагонного электропоезда ЭС2Г-069/070, представлен на рис. 4, на котором отображены изменения аналоговых сигналов: $U_{кк}$ — напряжение контактной сети, В; F — сила тяги/электрического торможения, кН; $P_{тм}$ — давление в тормозной магистрали, МПа; $P_{тц}^1$ — давление в первом тормозном цилиндре, МПа; v — скорость движения, км/ч.

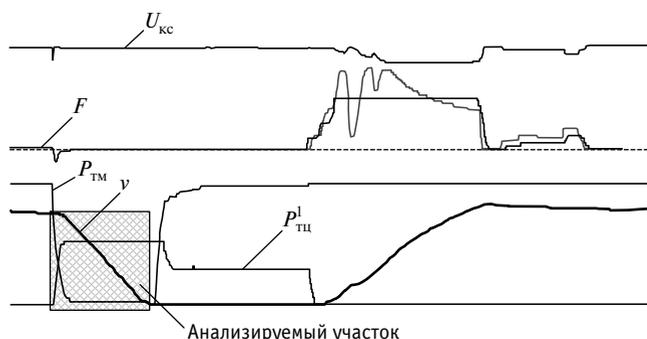


Рис. 4. Фрагмент записи РПМ с испытаний электропоезда ЭС2Г-069/070

На основе формулы для равнопеременного движения были определены действительные тормозные пути $S_{дл}$ при экстренном торможении, где происходило уменьшение скорости на 5 км/ч (заштрихованный участок на рис. 4), а также замедление, с которым двигался электропоезд (рис. 5).

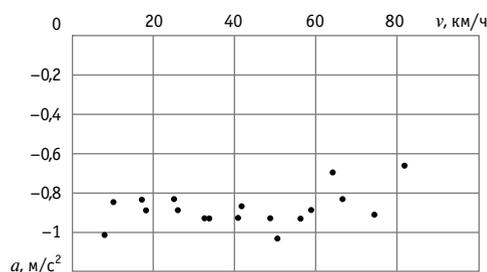


Рис. 5. Значения замедления электропоезда при экстренном торможении

Реализуемое замедление во время торможения, как правило, возникает в результате действия тормозной силы, в меньшей мере на него влияют основное и дополнительное сопротивление движению.

Так как экстренное торможение ЭС2Г-069/070 производилось на экспериментальном кольце ВНИИЖТ, где для испытаний используется кольцевой путь с постоянным радиусом кривой 956 м и уклоном 0 ‰, то дополнительное сопротивление движению включает только сопротивление кривой и равно 0,732 Н/кН.

Поскольку основное удельное сопротивление w_{0x} уравнения (8) составляет 2–5 % от значения удельной тормозной силы, а аэродинамическая форма кузова и тележки испытываемого электропоезда ЭС2Г аналогичны электропоезду ЭС1, воспользуемся формулой удельного сопротивления для ЭС1 (Desiro RUS) [16]:

$$W_0 = k_0 + k_1(v + v_w) + k_2m_z + k_3vm_z + k_4k_t(v + v_w)^2 + k_5k_t(v + v_w)^2m_z, \quad (9)$$

где v — скорость движения, м/с;

v_w — скорость ветра, м/с;

m_z — масса подвижного состава, кг;

k_0-k_t — коэффициенты для расчета ($k_0 = 0$ Н; $k_1 = 0$ кг/с; $k_2 = 0,0162$ Н/кг; $k_3 = 0,0002515$ с⁻¹; $k_4 = 7,739$ кг/м; $k_5 = 0$ м⁻¹; $k_t = 1$).

Соответственно для испытываемого ЭС2Г-069/070 основное удельное сопротивление движению имеет вид (при средней загрузке электропоезда)

$$w_0 = 1,652 + 0,007v + 0,0001018v^2. \quad (10)$$

Преобразовав выражение (8), получим удельную тормозную силу для каждого участка пути, где скорость испытываемого электропоезда снижалась на 5 км/ч:

$$b_T = \frac{500(v_n^2 - v_k^2)}{\zeta S_d} - w_{0x} - i_c. \quad (11)$$

Изменение значений удельной тормозной силы для анализируемого участка (см. рис. 4) показано на рис. 6. Разброс значений удельной тормозной силы может быть снижен за счет увеличения точности при измерении параметров движения аппаратными средствами.

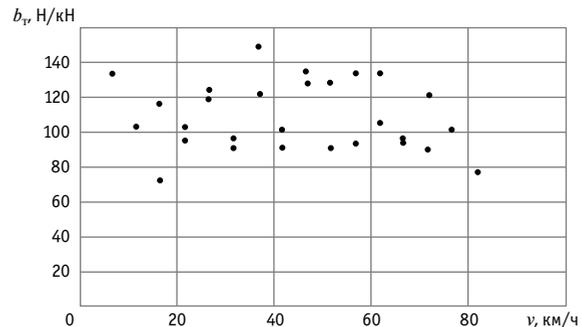


Рис. 6. Значения удельной тормозной силы электропоезда ЭС2Г-069/070 в зависимости от скорости движения

Для уточнения зависимости $\varphi_{кр}(v)$ с помощью полученного значения тормозной силы необходимо проанализировать величину тормозного коэффициента электропоезда во время испытаний. В дальнейшем считывание и фиксация изменения значений θ_p из алгоритма вычисления программной скорости движения позволят определить характер изменения коэффициента трения «на борту» подвижного состава [17].

Уточнение методики расчета тормозного коэффициента может увеличить допустимую программную скорость движения $v_{пр}$, так как значения коэффициентов трения дисковых тормозов выше 0,3 в гораздо большем диапазоне фактических скоростей, чем значение используемого при расчете $\varphi_{кр}^n$. Увеличение программной скорости движения $v_{пр}$ позволит сократить интервал следования поездов и обеспечить гарантированную остановку электропоезда перед запрещающим сигналом.

Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р [Электронный ресурс]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (дата обращения: 21.10.2017).
2. Автоматическая локомотивная сигнализация и авторегулировка / А. М. Брылеев, О. Поупе, В. С. Дмитриев и др. М. : Транспорт, 1981. 320 с.
3. Сисин В. А., Шапран Ф. В. Электромагнитная совместимость электронной и электротехнической аппаратуры локомотивов // Практическая силовая электроника. 2015. № 4 (60). С. 47–51. ISSN 1996-7888.
4. Сисин В. А. Вопросы электромагнитной совместимости локомотивной аппаратуры // Вестник УрГУПС. 2014. № 3 (23). С. 4–9. ISSN 2079-0392.
5. Галеев А. И., Вепров И. Ю. Перспективы развития системы автоматического управления торможением // Локомотив. 2016. № 1. С. 22–29. ISSN 0869-8147.

References

1. Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda : utv. rasporyazheniyem Pravitelstva Ros. Federatsii ot 22.11.2008 g. № 1734-r [Transport strategy of the Russian Federation for the period till 2030 : approved by Russian Government Decree № 1734-r dated November 22, 2008]. [Electronic resource]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (access date: 21.10.2017).
2. Avtomaticheskaya lokomotivnaya signalizatsiya i avtoregulirovka [Automatic locomotive signaling and auto-adjustment] / A. M. Brylyev, O. Poupe, V. S. Dmitriev i dr. M. : Transport, 1981. 320 s.
3. Sisin V. A., Shapran F. V. Elektromagnitnaya sovmestimost' elektronnoy i elektrotekhnicheskoy apparatury lokomotivov [Electromagnetic compatibility of electronic and electrical equipment of locomotives] // Prakticheskaya silovaya elektronika. 2015. № 4 (60). S. 47–51. ISSN 1996-7888.
4. Sisin V. A. Voprosy elektromagnitnoy sovmestimosti lokomotivnoy apparatury [Issues of electromagnetic compatibility of locomotive equipment] // Vestnik UrGUPS. 2014. № 3 (23). S. 4–9. ISSN 2079-0392.
5. Galeev A. I., Veprov I. Yu. Perspektivy razvitiya sistemy avtomaticheskogo upravleniya tormozheniem [Prospects for development of automatic braking control system] // Lokomotiv. 2016. № 1. S. 22–29. ISSN 0869-8147.

6. Сисин В. А. Оптимизация устройств автоматической пере-
ездной сигнализации // Транспорт Урала. 2011. № 3 (30).
С. 40–43. ISSN 1815-9400.
7. Сисин В. А. Математическое моделирование работы тональных
рельсовых цепей // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 45–49.
ISSN 1815-9400.
8. Розенберг Е. Н., Шухина Е. Е., Кисельгоф Г. К. Комплексные ло-
комотивные системы безопасности // Автоматика, связь, ин-
форматика. 2014. № 10. С. 2–4. ISSN 0005-2329.
9. Комплекс БЛОК: прорывные технологии в системах обеспе-
чения безопасности движения / В. И. Головин, Е. Е. Шухина,
В. В. Висков, А. С. Архипов // Локомотив. 2011. № 6. С. 28–31.
ISSN 0869-8147.
10. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М. : Транс-
порт, 1985. 287 с.
11. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Скворцова А. И. Тяговые рас-
четы : справочник / Под ред. П. Т. Гребенюка. М. : Транспорт,
1987. 272 с.
12. Тищенко П. А. Нестационарные температурные поля в элемен-
тах дискового тормоза скоростного вагона с учетом неустойчи-
вости теплового контакта : дис. ... канд. техн. наук. Брянск,
2003. 175 с.
13. Колесниченко А. И., Пазухин Д. Ю., Скачков А. Н. Стендовые
испытания тормозного оборудования фирмы Knorr-Bremse
// Проблемы и перспективы развития вагоностроения : матер.
III всерос. науч.-практ. конф. Брянск, 2006. С. 50–56.
14. Титарев Д. В. Обоснование и разработка рациональной кон-
струкции диска тормоза пассажирского вагона : автореф.
дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2008. 20 с.
15. Мошков А. А. Разработка рациональной конструкции блока дис-
кового тормоза для скоростных грузовых и высокоскоростных
пассажирских вагонов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 217 с.
16. Анисимов В. А., Анисимов В. В. Тяговые расчеты : моногр. Ха-
баровск, 2013 [Электронный ресурс]. URL: https://sites.google.com/site/tagapoezd/monografia/power/power_wieder/wo/formuls (дата обращения: 21.10.2017).
17. Головин В. И., Сергеев Б. С. Путевые устройства САУТ // Автомати-
ка, телемеханика и связь. 1992. № 2. С. 2–5. ISSN 0005-2329.
6. Sisin V. A. Optimizatsiya ustroystv avtomaticheskoy pereezdnoy signa-
lizatsii [Optimization of automated grade crossing signaling devices]
// Transport Urala. 2011. № 3 (30). S. 40–43. ISSN 1815-9400.
7. Sisin V. A. Matematicheskoe modelirovanie raboty tonal'nykh rel'sovykh
tsepey [Mathematical modeling of audio frequency track circuits] // Trans-
port Urala. 2015. № 3 (46). S. 45–49. ISSN 1815-9400.
8. Rozenberg E. N., Shuhina E. E., Kisel'gof G. K. Kompleksnye lokomotivnye
sistemy bezopasnosti [Complex locomotive safety systems] // Avtomatika,
svyaz', informatika. 2014. № 10. S. 2–4. ISSN 0005-2329.
9. Kompleks BLOK: proryvnye tekhnologii v sistemakh obespecheniya bezo-
pasnosti dvizheniya [Safe locomotive joint complex: breakthrough tech-
nologies in traffic safety systems] / V. I. Golovin, E. E. Shuhina, V. V. Vis-
kov, A. S. Arkhipov // Lokomotiv. 2011. № 6. S. 28–31. ISSN 0869-8147.
10. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty [Rules of traction cal-
culations for train operation]. M. : Transport, 1985. 287 s.
11. Grebenyuk P. T., Dolganov A. N., Skvortsova A. I. Tyagovye raschety : spravo-
chnik [Traction calculations : a reference book] / Pod red. P. T. Grebe-
nyuka. M. : Transport, 1987. 272 s.
12. Tischenko P. A. Nestatsionarnye temperaturnye polya v elementakh dis-
kovogo tormoza skorostnogo vagona s uchedom nestabil'nosti teplovo-
go kontakta : dis. ... kand. tekhn. nauk [Unsteady temperature fields in
elements of disc brake of high-speed car, taking into account instability
of thermal contact : PhD in Engineering Thesis]. Bryansk, 2003. 175 s.
13. Kolesnichenko A. I., Pazukhin D. Yu., Skachkov A. N. Stendovye ispytaniya
tormoznogo oborudovaniya firmy Knorr-Bremse // Problemy i perspektivy
razvitiya vagonostroeniya : mater. III vseros. nauch.-prakt. konf. [Bench
testing of brake equipment from Knorr-Bremse // Problems and prospects
for the development of car-building : materials of the III All-Russian
scient. and pract. conf.]. Bryansk, 2006. S. 50–56.
14. Titarev D. V. Obosnovanie i razrabotka ratsional'noy konstruktsii diska tor-
moza passazhirskogo vagona : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Objec-
tivation and development of rational design of passenger car brake disc :
PhD in Engineering Synopsis]. Bryansk, 2008. 20 s.
15. Moshkov A. A. Razrabotka ratsional'noy konstruktsii bloka diskovogo tor-
moza dlya skorostnykh gruzovykh i vysokoskorostnykh passazhirskikh va-
gonov : dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of rational design of disc
brake unit for high-speed freight and high-speed passenger cars : PhD in
Engineering Thesis]. M., 2014. 217 s.
16. Anisimov V. A., Anisimov V. V. Tyagovye raschety : monogr. [Traction cal-
culations : a monograph]. Khabarovsk, 2013 [Electronic resource]. URL:
https://sites.google.com/site/tagapoezd/monografia/power/power_wieder/wo/formuls (access date: 21.10.2017).
17. Golovin V. I., Sergeev B. S. Putevye ustroystva SAUT [Track devices of au-
tomatic braking control system] // Avtomatika, telemekhanika i svyaz'.
1992. № 2. S. 2–5. ISSN 0005-2329.

Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

Назначение платежа: «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67 или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusnikov-urgups>

Извещение	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: 667001001 ИНН: 6670317893 ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192 в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795 Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2018 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: 667001001 ИНН: 6670317893 ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192 в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795 Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2018 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала» DOI:10.20291/1815-9400

№ 1 (56), 2018 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс: 46463

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Роскомнадзора
ПИ № 77-18098 от 27 мая 2004 г.

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.
Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков
и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Адрес редакции:
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.
Тел. (343) 221-24-90
<http://www.usurt.ru/transporturala>
e-mail: EPupova@usurt.ru

Учредитель:
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)

Главный редактор:
Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:
Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:
Елена Семеновна Пупова,
тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,
e-mail: EPupova@usurt.ru

Дизайн:
Антон Леонидович Курносов

Верстка:
Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:
Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 30.03.2018

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета
в типографии ООО «АЛЕКС ПРИНТ».

394007, г. Воронеж, Ленинский проспект, д. 94, кв. 52.
Тел./факс: (473) 290-45-17. E-mail: alexey-print@mail.ru

Заказ №

© Уральский государственный университет путей сообщения, 2018

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 4 (55), 2017 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс: 46463

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Роскомнадзора
ПИ № 77-18098 от 27 мая 2004 г.

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.
Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков
и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 6б.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Учредитель:

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Дизайн:

Антон Леонидович Курносов

Верстка:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 30.12.2017

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета
в типографии ООО «Типография для Вас».

620073, г. Екатеринбург, ул. Крестинского, д. 37/2, к. 59.

Тел./факс: (343) 211-0-300. E-mail: ooo_for_you@mail.ru

Заказ № 172

© Уральский государственный университет путей сообщения, 2017