

ТРАНСПОРТ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УРАЛ

**СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ОРИЕНТИРЫ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИТОРСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СТЫКОВЫХ СТАНЦИЙ
И СМЕЖНЫХ УЧАСТКОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ ЭЛЕКТРОВЗОВ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ**

**ОРГАНИЗАЦИЯ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА
УГЛОВ НАКЛОНА ОПОР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ АЭРОМОБИЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ
ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ**

**ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА
В РОССИИ И ИТАЛИИ И МЕХАНИЗМЫ
УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА**



TRANSPORT

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

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. Грицык Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Ростов
5. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
6. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
7. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
8. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
9. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
10. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
11. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
12. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
13. Туранов Хабибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Умняшкин Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Ижевск
15. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
16. 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. Grytsyk Valeriy Ivanovich, DSc, professor, Rostov
5. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
6. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
7. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
8. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
9. Ledyaev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
10. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
11. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
12. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
13. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Umnyashkin Vladimir Alexeyevich, DSc, professor, Izhevsk
15. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
16. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА
П. А. Козлов, В. С. Колокольников.
Макроструктурный подход в исследовании железнодорожных станций..... 3
Н. А. Тушин, А. В. Чумаков, К. М. Тимухин.
Стратегические ориентиры и автоматизация транспортно-экспедиторских предприятий..... 8
В. В. Зубков, Н. Ф. Сирина.
Технологическая координация эксплуатационной работы на полигоне железной дороги 13
О. В. Москвичев.
Модели, методы и алгоритмы оптимизации контейнерно-транспортной системы железнодорожного транспорта на основе кластерного подхода 18
ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ
Е. Н. Тимухина, А. А. Гордиенко, И. С. Плахотич.
Результаты исследований параметров движения вагона по спускной части сортировочной горки при различных режимах прохода тормозных позиций..... 28
А. В. Малахов, В. Ю. Пермикин, Э. В. Васильев.
Повышение эффективности работы стыковых станций и смежных участков при эксплуатации в грузовом движении электровазозов двойного питания 32
АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ
Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, Д. В. Седых, Д. В. Барч.
Организация непрерывного мониторинга углов наклона опор железнодорожной контактной сети..... 37
Б. В. Рожкин.
Оптимизация алгоритмов поиска отказов 42
А. В. Ануфренко, Э. В. Бенета, А. К. Канаев.
Имитационная модель узла агрегации для исследования влияния его структурных параметров на характеристики агрегированного трафика 47
ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
А. А. Севостьянов, Д. В. Величко.
Основные причины отказов рельсов в процессе эксплуатации 51
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА
М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм.
Влияние энергии рекуперации на уровень потерь в системе тягового электроснабжения 55
А. В. Владыкин, Н. О. Фролов.
Определение эффективности эксплуатационной деятельности метро с точки зрения энергопотребления тяговым подвижным составом 61
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ
Т. А. Несенюк, А. Г. Галкин.
Эксплуатационный аэромобильный контроль воздушной линии электропередачи беспилотным летательным аппаратом 64
А. В. Горькин, В. Т. Черемисин.
Теория работы и временные характеристики реле-дифференциальных шунтов..... 73
АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ
Е. Р. Магарил, Р. З. Магарил, Л. Л. Абржина, Д. Панепинто, Ф. Виджиано.
Влияние транспортных средств на качество воздуха в России и Италии и механизмы устойчивого развития автомобильного транспорта 77
С. С. Евтюков, Е. В. Голов.
Аудит безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах регионального значения в Ленинградской области 85
В. Е. Кошкар, В. М. Самуйлов, Е. В. Кошкар, А. В. Дудченко.
Эффективность применения резино-дисперсно-армированного асфальтобетона для транспортного строительства 90
АСПИРАНТСКАЯ ТЕТРАДЬ
И. Г. Слободянюк.
Функциональный подход к моделированию транспортных систем 96
А. Д. Калидова.
Разработка метода технологической оценки процесса пропуска поездопотоков через однопутное барьерное место двухпутной линии на основе имитационного моделирования..... 102
GENERAL TRANSPORT PROBLEMS
P. A. Kozlov, V. S. Kolokolnikov.
Macrostructural approach in research of railway stations..... 3
N. A. Tushin, A. V. Chumakov, K. M. Timukhin.
Strategic identities and automation of forwarding agency 8
V. V. Zubkov, N. F. Sirina.
Technological coordination of operating work on the railway range 13
O. V. Moskvichev.
Models, methods and algorithms of optimization of container transport system of railway transport based on the cluster approach 18
CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION
E. N. Timukhina, A. A. Gordienko, I. S. Plakhovich.
Results of investigations of car movement parameters on the lowering part of sorting hump in different walk-through modes of brake positions 28
A. V. Malakhov, V. Yu. Permikin, E. V. Vasilyev.
Improvement of efficiency of work of butt-joint stations and contiguous section in operation in the traffic movement of locomotive of double supply..... 32
AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION
D. V. Efanov, G. V. Osadchiy, D. V. Sedykh, D. V. Barch.
Organization of health monitoring of railway catenary pillars slope angles 37
B. V. Rozhkin.
Optimization of algorithms to failures search..... 42
A. V. Anufrenko, E. V. Beneta, A. K. Kanaev.
Simulation model of the aggregation node for research of the influence of its structural parameters on the characteristics of the aggregated traffic 47
RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK
A. A. Sevostyanov, D. V. Velichko.
Main causes of rail breakdowns in the operation process 51
ELECTRIC TRACTION
M. M. Nikiforov, A. S. Vilgelm.
Influence of the recovery energy on the level of losses in the traction power supply system 55
A. V. Vladyskin, N. O. Frolov.
Determination of efficiency of operating activity of the subway from the point of view of energy consumption by driving mobility composition 61
ELECTRIC SUPPLY
T. A. Nesenjuk, A. G. Galkin.
Operational aeromobile control of the overhead transmission line with the unmanned aerial vehicle 64
A. V. Gorkin, V. T. Cheremisin.
Theory of work and temporary characteristics of relay differential shunts 73
MOTOR TRANSPORT
E. R. Magaril, R. Z. Magaril, L. L. Abrzhina, D. Panepinto, F. Vidzhiano.
Impact of vehicles on air quality in Russia and Italy and mechanisms for sustainable development of road transport..... 77
S. S. Evtyukov, E. V. Golov.
Road traffic safety audit on roads of regional importance in Leningrad region 85
V. E. Koshkarov, V. M. Samuylov, E. V. Koshkarov, A. V. Dudchenko.
Efficiency of use of rubber-dispersed-reinforced asphalt concrete for transport construction..... 90
RESEARCH OF YOUNG SCIENTISTS
I. G. Slobodyanyk.
Functional approach to modeling transport systems 96
A. D. Kalidova.
Development of method of technological estimation of the process of flow transmission by through a simultaneous barrier location of a two-way line based on imitation modeling..... 102

УДК 656.21:004.94

Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ, Москва, Россия,

Виталий Сергеевич Колокольников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

МАКРОСТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Petr Alexeyevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, President of Research & Production Holding STRATEG (Modern National Transportation Technologies), Moscow, Russia,

Vitaliy Sergeyevich Kolokolnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Macrostructural approach in research of railway stations

Аннотация

Статья посвящена дальнейшей разработке нового, макроструктурного, подхода к изучению железнодорожных станций. В качестве основного фактора, определяющего пропускную способность станции и уровень полезного использования устройств, рассматривается характер взаимодействия парка и горловины. Существующие методы расчета опираются на микроструктурный подход, т. е. на основании параметров отдельной стрелки и отдельного пути выводятся параметры горловины и парка. Этот подход, как было показано в наших предыдущих публикациях, малопродуктивен и ведет к ошибочным заключениям. В свою очередь, предлагаемый макроструктурный подход при достаточном обосновании может стать и более адекватным, и более содержательным. В статье формулируются необходимые гипотезы и приводятся некоторые их обоснования.

Ключевые слова: станция, парк, горловина, стрелка, структура, канал, взаимодействие.

Summary

The article is devoted to the further development of a new, macrostructural, approach to the study of railway stations. As the main factor determining the capacity of the station and the level of useful use of devices, the nature of con-function between the park and the neck is considered. The existing methods of calculation are based on the microstructural approach, i. e., parameters of the neck and the park are derived from the parameters of the separate arrow and the separate track. This approach, as it was shown in our previous publications, is unproductive and leads to erroneous conclusions. In turn, the proposed macrostructural approach with sufficient justification can become both more adequate and more meaningful. The necessary hypotheses are formulated in the article and some of their justifications are given.

Keywords: station, park, neck, arrow, structure, channel, con-function.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-3-7

1. ПРОБЛЕМА

Ключевым процессом на станции, определяющим ее пропускную способность и уровень полезного использования устройств, является взаимодействие парка и горловины. Существующие методы расчета строятся на том, что параметры отдельной стрелки и отдельного пути рассматриваются в качестве основы для оценки параметров горловины и парка (микроструктурный подход). Как уже было показано [1, 2], этот подход, во-первых, малопродуктивен, а во-вторых, приводит к ошибочным заключениям.

В настоящей статье, посвященной формированию нового, макроструктурного, подхода к оценке горловин и их взаимодействия с парками, вводятся некоторые гипотезы и дается их обоснование.

2. ГИПОТЕЗЫ

Как уже упоминалось, в основе существующих методов определения параметров парков и горловин лежат непроверенные и ошибочные постулаты [3]:

расчет параметров стрелок в горловинах и путей в парках осуществляется по отдельности без учета взаимодействия;

наиболее загруженная стрелка является адекватным представителем всей горловины;

число путей в парке может быть рассчитано на основании их полезной загрузки в операциях.

Эти упрощенные подходы были вынужденными и существовали довольно долго из-за отсутствия адекватного аппарата проверки. Исследования на современных моделях показали их ошибочность либо недостаточность [4–6].

Действительно, прежде горловину рассматривали как *неупорядоченное* множество стрелок с *неупорядоченным* множеством соединительных линий:

$$Q = P \cup L \text{ (объединение множеств),}$$

где Q — горловина в стрелках;

$P \equiv \{p_i\}$ — множество стрелок;

$L \equiv \{l_{ij}\}$ — множество соединительных путей;

$\{ \}$ — неупорядоченное множество.

Предлагается более содержательный подход — рассматривать горловину как *упорядоченное* множество «*виртуальных*» каналов, каждый из которых обеспечивает независимое параллельное передвижение:

$$R \equiv \langle r_i \rangle \text{ (горловина в структурных каналах),}$$

где r_i — структурный канал;

$\langle \rangle$ — упорядоченное множество.

При наложении технологии на структуру выясняется, что операция в среднем может занимать не один, а несколько каналов. То есть реальное число параллельных передвижений (функциональных каналов) будет определяться и структурой, и технологией:

$$R' \equiv \langle r'_i \rangle \text{ (горловина в функциональных каналах),}$$

где r'_i — функциональный канал.

Гипотеза 1. Число структурных каналов k характеризует потенциальную пропускную способность горловины, а число функциональных каналов k' — ее же при заданной технологии. При этом

$$k' = \frac{k}{\Delta k},$$

где Δk — среднее число каналов, занятых в одной выполненной операции.

Во взаимодействии с горловиной парк рассматривается как источник потока операций. (Он является и истоком, и стоком для потока. Здесь рассматривается все это вместе.)

Горловина обеспечивает пропуск этого потока. И ее пропускная способность должна соответствовать интенсивности источника, т. е. должен соблюдаться паритет. (Термин «паритет» имеет два значения — равенство и соотношение. В данном случае он используется во втором значении.)

Итак, паритет может быть нулевым

$$D = U,$$

отрицательным

$$D < U$$

и положительным

$$D > U,$$

где D — пропускная способность горловины в операциях;
 U — мощность источника потока операций (парка).

При проектировании станции необходимо обеспечивать нулевой паритет во всех парах «парк — горловина». Для того чтобы понять, что это означает, следует ввести два понятия — естественные и избыточные задержки в горловине.

Задержки будут всегда. Снижение их уровня происходит при увеличении пропускной способности горловины, что требует серьезных затрат. Опыт оценки проектов методом моделирования показывает, что обычно наблюдается следующая картина (рис. 1).

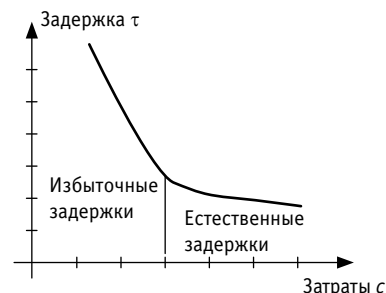


Рис. 1. Естественные и избыточные задержки

Когда горловина слишком сильно тормозит процессы, то инвестиции оправданны, так как темп снижения задержек значительно превышает темп увеличения затрат:

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} \gg \frac{\Delta c}{c},$$

где $\Delta \tau$ — темп снижения задержек;

Δc — темп увеличения затрат.

Гипотеза 2. При увеличении числа структурных каналов наступает такой момент, когда пропускная способность горловины становится избыточной и величина задержек практически не снижается, т. е. $\frac{\Delta \tau}{\tau} < \frac{\Delta c}{c}$. Это и будет границей естественных задержек.

Конечно, можно рассматривать поле избыточных задержек как множество Парето. Если удельные затраты велики, а потери от задержек не так чувствительны, то разумную границу можно сдвинуть влево, оставив задержки в сфере избыточных. Но для проектировщика важно знать границу нулевого паритета, чтобы построить и структурно, и функционально гармоничную станцию.

Исследование на подробной имитационной модели позволит получить необходимые характеристики. Весьма полезно ввести оценочные показатели, которые бы сразу обнаруживали несоответствие параметров парка и горловины.

Предлагаются два показателя:

$$\gamma = \frac{k}{m} \text{ — структурный индекс паритета;}$$

$$\gamma' = \frac{k'}{m'} \text{ — функциональный индекс паритета,}$$

где m — число путей в парке;

m' — среднее число занятых путей в парке.

Реальными источниками потока в этом случае будут только занятые пути, поскольку резервные пути не продуцируют поток.

Гипотеза 3. Структурный и функциональный индексы паритета характеризуют уровень соответствия параметров горловины и парка. В первом случае рассматриваются потенциальные возможности структуры, во втором — ее возможности при принятой технологии.

Гипотеза 4. Существуют значения $\gamma = \bar{\gamma}$ и $\gamma' = \bar{\gamma}'$, при которых будет соблюдаться нулевой паритет и задержки будут характеризоваться как естественные.

При рассмотрении горловины как множества стрелок трудно определить качество полученной структуры. Действительно, что лучше — 30 или 40 стрелок? Чтобы это выяснить, нужно оценить полученную пропускную способность. Выше уже было сделано предположение, что ее может характеризовать число структурных каналов.

Гипотеза 5. Показателями, характеризующими качество проектирования горловины, могут служить следующие параметры:

$$\text{каналоемкость (структурированность горловины)} \lambda = \frac{k}{N},$$

где N — число стрелок в горловине,

и стрелочная связка $\delta = \frac{1}{\lambda}$, $\delta = \frac{N}{k}$ (термин «связка» употребляется как «связанная группа»).

Оба показывают соотношение числа стрелок и каналов в горловине. Второй параметр использовать легче, так как его значения будут больше единицы и понятен смысл — сколько стрелок в среднем создают одно параллельное передвижение. Чем меньше стрелок — тем более экономно (рационально) построена горловина. То есть при меньшем числе стрелок достигается требуемая пропускная способность.

Все эти гипотезы необходимо обосновать. Здесь мы даем лишь качественное обоснование — доказать правомерность их использования. Получение же рациональных количественных значений для разных типов станций, парков и горловин требует многочисленных расчетов на имитационных моделях.

3. ОБОСНОВАНИЯ

Модели, построенные с помощью имитационной системы ИСТРА, позволяют получить большой набор данных, которые можно использовать для оценки горловин, парков и их взаимодействия. Например, приводится информация о числе структурных каналов, числе стрелок в горловине, структурной связке, среднем числе занятых каналов и среднем числе каналов, используемых в выполненной операции (рис. 2); о суммарных и приходящихся на одну операцию задержках в горловинах (рис. 3); о параметрах работы парков, в частности о среднем числе занятых путей, что особенно необходимо знать для наших целей (рис. 4); о результатах выполнения операций (рис. 5).

К гипотезе 1. Расчеты, выполненные на различных станциях, имеющих сопоставимый уровень загрузки горловин (Екатеринбург-Сортировочный, Агрыз, Алтайская, Каменск-Уральский, Карымская), показывают, что с увеличением числа структурных каналов среднее время задержек снижается

(рис. 6). Уменьшение удельных задержек (в среднем на одну выполненную операцию) однозначно говорит о том, что с увеличением числа структурных каналов возрастает пропускная способность. Увеличивается и число функциональных каналов. Значит, возрастает пропускная способность и при заданных технологиях. Таким образом, можно сказать, что гипотеза 1 подтвердилась и что параметры k и k' можно использовать для характеристики пропускной способности горловины.

горловина	графиче	каналов	стрелок	структ	в ср. занятс	в ср. на опер
Четная Б		4	36	9	2,2	1,9
Формированная		3	37	12,3	1,6	2,1
Четная Т		4	20	5	2	1,6
Нечетная Т		2	12	6	0,9	1,2
Нечетная Б		7	46	6,6	2,8	1,7
Предгорочная		3	8	2,7	1,2	1,3
Входная		3	14	4,7	0,7	1,7

Рис. 2. Параметры горловин

Горловина	графически	факт (ччмм)	в среднем (мин)
Нечетная Б		46:02	4,1
Четная Б		37:53	4,4
Четная Т		28:42	3,4
Формирования		15:50	6,5
Предгорочная		10:07	2,5
Нечетная Т		9:14	1,9
Входная		1:32	0,6

Рис. 3. Задержки в горловинах

парк	прибыло	отправлено	простой	ср.кол-во зан путей	кол-во путей
Парк А	2853	2779	1.62	4.36	16
Парк Б	4319	4247	2.79	15.89	67
Парк Т	3784	3984	2.59	11.11	27
Парк С	2869	2730	7.92	27.06	32

Рис. 4. Параметры работы парков

горловина	графичес	каналов	стрелок	структурн	в ср. занято	в ср. на опер
Четная Б		4	36	9	2,2	1,9

Среднее время занятости горловины на одну операцию: 7,8 минут

Всего операций по горловине: 515

Процент поездных операций: 67,2 %

Рис. 5. Параметры выполнения операций

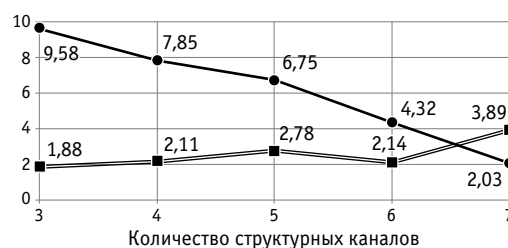


Рис. 6. Параметры работы горловины при разном числе структурных каналов:

—●— задержки, мин; —■— количество функциональных каналов

Кстати, отклонение количества функциональных каналов при числе структурных каналов, равном 6, от общей тенденции (см. рис. 6), как оказалось, объясняется особенностями рассматриваемой горловины. В отличие от остальных горловин, которые обслуживают только один парк, она является межпарковой, и функции ее более сложные. Таким образом, возникла необходимость классификации горловин с позиций рассматриваемой проблемы.

Особенно это относится к горловинам формирования сортировочных парков. Действительно, рассматривать занятые пути в сортировочном парке как источник потока операций нельзя. Там обычно практически все пути заняты, идет накопление составов. Источником потока являются только пути с накопленным составом. Поэтому здесь необходим другой подход. Существует зависимость темпа накопления готовых составов от уровня заполнения сортировочного парка (табл. 1) [7].

Таблица 1

Вероятность накопления
в нечетном направлении (станция Дема)

Количество вагонов в парке формирования	Количество операций	Количество накопленных составов	Вероятность накопления
0–70	—	—	—
70–140	2	0	0
140–210	25	7	0,28
210–280	157	56	0,36
280–350	176	91	0,51

Поэтому число функциональных каналов необходимо соотносить с величиной

$$\varphi = \alpha \mu,$$

где φ — интенсивность потока готовых составов;
 μ — уровень заполнения сортировочного парка;
 α — переводной коэффициент.

К гипотезе 2. Рассматривалась горловина парка А сортировочной станции, где задержки были небольшими. В этой горловине четыре структурных канала (рис. 7).

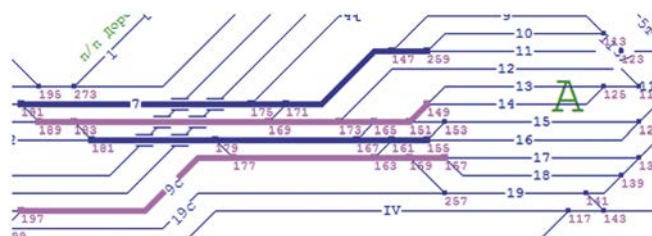


Рис. 7. Существующая схема горловины сортировочной станции с четырьмя каналами

Параллельность потоков высокая (рис. 8).

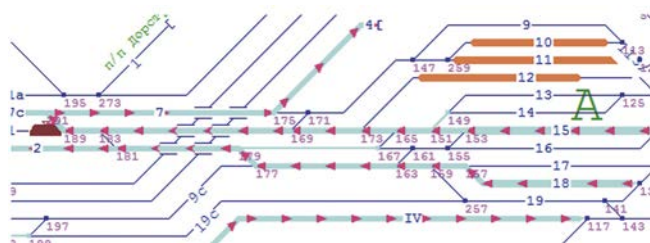


Рис. 8. Потоки в горловине с четырьмя каналами

Когда закрыли один канал, схема приобрела вид, представленный на рис. 9.

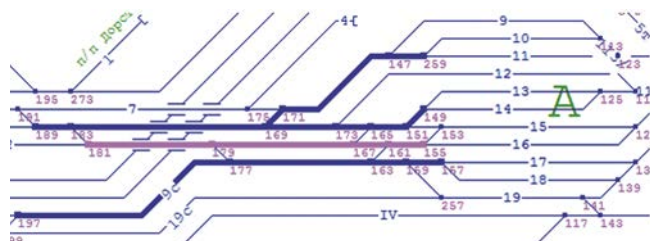


Рис. 9. Схема горловины сортировочной станции с тремя каналами

Затем закрыли еще один канал (рис. 10).



Рис. 10. Схема горловины сортировочной станции с двумя каналами

Параллельность потоков, естественно, уменьшилась (рис. 11).

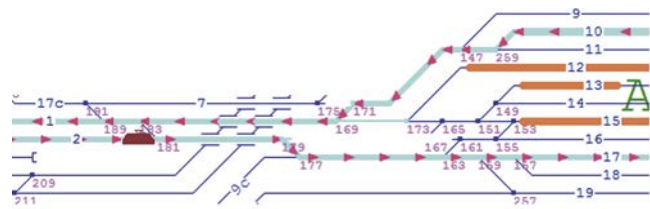


Рис. 11. Потоки в горловине с двумя каналами

В результате экспериментов было установлено, что изменение числа каналов практически не отразилось на уровне задержек (рис. 12), но горловина с одним структурным каналом не смогла пропустить поток.

Аналогичная зависимость характерна и для другой станции — участковой (рис. 13). Здесь тоже четырех каналов достаточно для пропуска потока, дополнительные каналы избыточны.



Рис. 12. Задержки в горловине сортировочной станции при различном числе структурных каналов

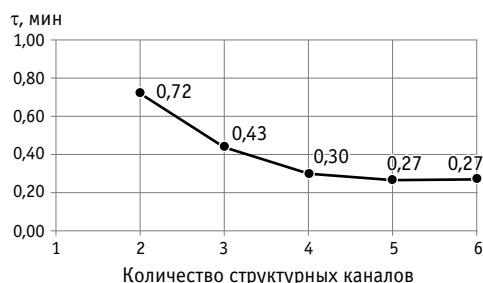


Рис. 13. Задержки в горловине участковой станции при различном числе структурных каналов

Таким образом, можно заключить, что уровню естественных задержек соответствует горловина с двумя каналами в первом случае и с четырьмя — во втором. То есть гипотеза 2 также нашла подтверждение.

О гипотезах 3, 4 и 5. Обоснование этих гипотез существенно усложняется. Здесь требуется тщательное рассмотрение других влияющих факторов:

типа горловины;
типа обслуживаемого парка (парков);
характера технологии;
уровня загрузки,
и, может быть, других.

Приведем пример. В одной из горловин заводской сортировочной станции можно выделить семь структурных каналов (рис. 14), причем загрузка их небольшая.

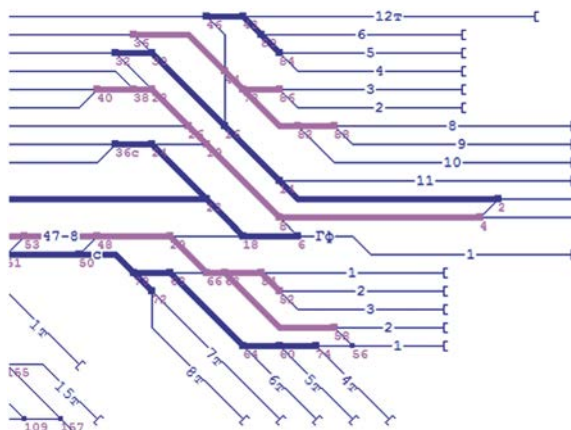


Рис. 14. Каналы в горловине заводской сортировочной станции

На первый взгляд такое количество каналов явно избыточно. Но, как оказалось, есть важный фактор, который необходимо учитывать. Вблизи станции существуют уклоны до 20‰, поэтому составы подаются в тупики двумя локомотивами: один спереди, второй сзади. Значит, в случае задержки в ожидании находятся два локомотива, следовательно, стоимость задержек существенно возрастает.

Таким образом, обоснование последних трех гипотез — это задача будущих исследований.

Литература

1. Козлов П. А. О методах расчета систем железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2014. № 12. С. 28–32. ISSN 0044-4448.
2. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О загрузке стрелок и пропускной способности горловин // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7. ISSN 1815-9400.
3. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. М.: РЖД, 2010.
4. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. Определение параметров парков и горловин станции с учетом их взаимодействия // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-3-7. ISSN 1815-9400.
5. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О результирующей пропускной способности последовательно расположенных устройств // Вестник УрГУПС. 2017. № 1 (33). С. 53–61. DOI: 10.20291/2079-0392-2017-1-53-61. ISSN 2079-0392.
6. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О технологии расчета железнодорожных станций // Железнодорожный транспорт. 2017. № 6. С. 42–46. ISSN 0044-4448.
7. Козлов П. А., Тушин Н. А., Слободянюк И. Г. Макромоделирование железнодорожных станций и узлов // Наука и техника транспорта. 2015. № 2. С. 82–88. ISSN 2074-9325.

References

1. Kozlov P. A. O metodakh rascheta sistem zheleznodorozhnogo transporta [On the methods of railway transport systems calculation] // Zheleznodorozhnyy transport. 2014. № 12. S. 28–32. ISSN 0044-4448.
2. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. O zagruzke strelok i propusknoy sposobnosti gorlovin [On the loading of points and station neck capacity] // Transport Urala. 2016. № 4 (51). S. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7. ISSN 1815-9400.
3. Instruksiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznikh dorog [Instruction on calculation railways capacity]. M.: RZHD, 2010.
4. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. Opredelenie parametrov parkov i gorlovin stantsii s uchetom ikh vzaimodeystviya [Defining the parameters of the tracks and of the station necks considering their interaction] // Transport Urala. 2017. № 1 (52). S. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-3-7. ISSN 1815-9400.
5. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. O rezul'tiruyushchey propusknoy sposobnosti posledovatel'no raspolozhennykh ustroystv [On ultimate carrying capacity of tandem devices] // Vestnik UgUPS. 2017. № 1 (33). S. 53–61. DOI: 10.20291/2079-0392-2017-1-53-61. ISSN 2079-0392.
6. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. O tekhnologii rascheta zheleznodorozhnykh stantsiy [On the technology of calculating of railway stations] // Zheleznodorozhnyy transport. 2017. № 6. S. 42–46. ISSN 0044-4448.
7. Kozlov P. A., Tushin N. A., Slobodanyuk I. G. Makromodelirovanie zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov [Macro-modelling of railway stations and junctions] // Nauka i tekhnika transporta. 2015. № 2. S. 82–88. ISSN 2074-9325.

УДК 00.005

Николай Андреевич Тушин, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Андрей Валерьевич Чумаков, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Кирилл Максимович Тимухин, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ОРИЕНТИРЫ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИТОРСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Nikolay Andreyevich Tushin, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Andrey Valeryevich Chumakov, postgraduate student, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Kirill Maximovich Timukhin, postgraduate student, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Strategic identities and automation of forwarding agency

Аннотация

В статье анализируется практика разработки автоматизированных информационных систем предприятий. Показано, что простое копирование зарубежных решений не приносит результата вследствие применения разных подходов к технике управления. Ключевым этапом автоматизации является формализация полной бизнес-модели предприятия. Постановка менеджмента процессов должна обеспечивать выполнение стратегических целей. На практике большинство российских компаний стратегической задачей ставят получение прибыли. Однако этот показатель важен лишь для операционных целей. Основным стратегическим ориентиром должен быть устойчивый рост стоимости бизнеса. В статье предлагается для оценки эффективности решений применять одну из трех аналитических моделей. Условиями реализации устойчивого роста являются наличие подразделения, ответственного за процесс создания экономической стоимости, и система показателей для текущего управления.

Ключевые слова: системы управления, бизнес-модель, стратегические ориентиры, развитие средств автоматизации.

Summary

The article analyzes the practice of developing automated information systems of enterprises. Simple copying of foreign solutions does not bring results. The problem is in applying different approaches to management techniques. The key stage of automation is the formalization of the complete business model of the enterprise. The management should ensure the implementation of strategic goals. In practice, most Russian companies are making a strategic goal of making a profit. However, this indicator is important only for operational purposes. The main strategic focus should be a steady increase in the value of business. In the article, it is proposed to apply one of three analytical models to analyze the efficiency of decisions. Conditions for the implementation of sustainable growth are the presence of the unit responsible for the process of creating economic value and a system of indicators for the current management.

Keywords: management systems, business model, strategic benchmarks, development of automation facilities.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-8-12

Конкурентные преимущества компании во многом связаны с автоматизацией управления. Некоторые российские предприятия, обладающие финансовой устойчивостью, пытаются решить проблему автоматизации за счет внедрения успешных западных систем. Но многие такие попытки в конце концов терпят неудачу. Одна из причин заключается в том, что под видом внедрения компьютерной системы фактически проводится значительная реструктуризация управления [1]. При этом делается это неосознанно: персонал изучает программу, а в действительности задаются другие техники управления. На самом деле реструктуризация управления предприятием на порядок сложнее, чем перевод менеджмента на компьютерные технологии. Поскольку отечественные комплексные системы автоматизации выросли из бухгалтерских учетных систем, собственно управленческие модули являются чем-то вроде необязательных надстроек, слабо интегрированных в единый контур.

Другой подход заключается в применении компьютерного моделирования уже на стадии постановки профессионального менеджмента. На начальном этапе создается виртуальная бизнес-модель. Решение здесь относится прежде всего к верхним контурам управления, обеспечивающим необходимую интеграцию. Автоматизацию на нижнем уровне можно начинать по частям — с узких мест (взаимодействие с клиентами, продажи, документооборот производственных участков). При таком подходе в составе работ по созданию информационных систем выделяются следующие этапы.

1. Обследование предприятия.
2. Предпроектный. Формализация бизнеса компании.
3. Проектный. Разработка проекта и схемы внедрения информационной системы.
4. Внедрение и эксплуатация.

На этапе обследования производится общая диагностика менеджмента, выявляются узкие места, определяется состав автоматизируемых контуров управления и общий график выполнения работ. На втором этапе главное внимание уделяется постановке регулярного менеджмента. Создается виртуальная модель, в которой описываются структура, функции и процессы компании. Согласуются форматы данных и способы передачи информации. Этап, связанный с бизнес-моделированием, является ключевым: информационная система не может заработать, если в компании нет системного менеджмента. Укрупненная модель предприятия представлена на рис. 1.

В основном производственном цикле под воздействием блока управления происходит превращение ресурсов в продукты и услуги. При этом достигаются цели предприятия в соответствии с выбранной стратегией. Постановка регулярного менеджмента, как и формирование требований к автоматизированной информационной системе, сводится к декомпозиции укрупненной модели до уровня полной бизнес-модели предприятия.

В литературе по стратегическому менеджменту предлагают четкую иерархию стратегических ориентиров компании. Высшим уровнем ориентиров выступает стратегическое видение — общее направление возможных будущих действий. Видение отражается в миссии. Далее следуют общие цели, формализованные в качественные и количественные параметры будущего состояния. Под стратегией традиционно понимается определение долгосрочных целей и задач организации, формирование программы действий и распределение ресурсов, необходимых для достижения этих целей [2]. Однако в большинстве литературных источников не говорится о практике выдвижения целей и их обоснования. Например, российские компании часто не обозначают свои цели. Так, на основе опроса более 200 топ-менеджеров и генеральных директоров из разных сфер бизнеса удалось составить рейтинг стратегических задач (рис. 2).

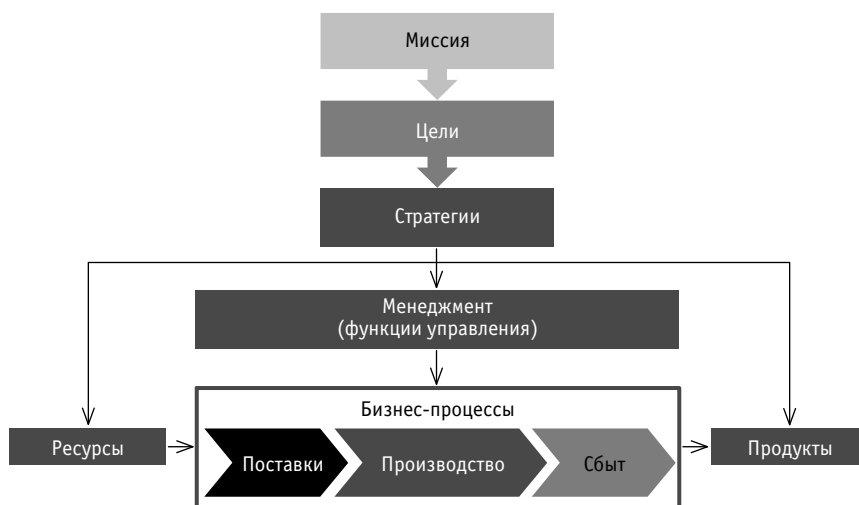


Рис. 1. Основные компоненты укрупненной модели предприятия

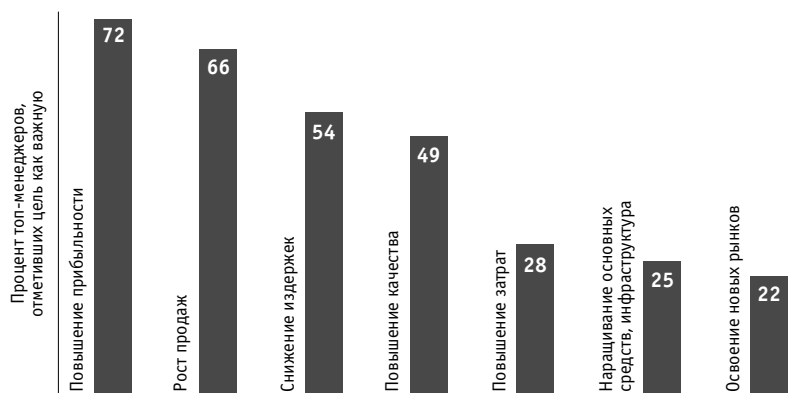


Рис. 2. Рейтинг стратегических задач

Рейтинг показал, что основное внимание руководителей российских предприятий привлекают финансовые параметры, которые больше подходят для операционных целей. Но именно эти цели определяют стратегию фирм. Наиболее частый ответ на вопрос, какова задача бизнеса, — прибыль. Однако как стратегический ориентир прибыль может сыграть злую шутку. В частности, Гэри Хэмел пишет: «В погоне за эффективностью компании очистили свои операции от большого количества лишних вещей. Это правильно. Никто не станет спорить с необходимостью сокращать уровень запасов, уменьшать оборотный капитал и уничтожать накладные расходы. Проблема, однако, в том, что, избавив компанию от всего лишнего, мы одновременно

но лишим ее всяких инноваций» [3]. Да и в практике отечественных транспортно-логистических предприятий часто стратегическим решением становится обновление основных средств, подвижного состава и т. п. Наиболее доступной формой привлечения инвестиций остается лизинг. При этом ускоренная амортизация или лизинговые платежи в бухгалтерском отчете могут привести к убытку. Если мотивация топ-менеджеров привязана к показателю «прибыль», то стратегическое решение о приобретении нового подвижного состава может быть и не принято. Политика «зажима» издержек в текущем периоде зачастую приводит к отказу оборудования в будущем, например, из-за не проведенных вовремя плановых ремонтов.

Основная ответственность за результаты лежит на менеджменте. При этом карательные меры со стороны собственников достаточно жестки и часто сводятся к увольнению генерального директора. Поэтому менеджмент скован в принятии и корректировке стратегических решений, даже если хорошо понимает их необходимость. Ошибки не предаются гласности, что, как правило, неэффективно и лишь усугубляет проблемы. Если принять во внимание, что собрание акционеров проводится один раз в год, то цикл корректировки ошибок становится очень длинным. Фактически уже может встать вопрос о необходимости принятия мер по выходу компании из кризиса. Англо-американская практика пошла по пути принятия ряда решений только независимыми членами совета директоров. Образовалась сбалансированная система корпоративного управления, которая существует в достаточно развитой и относительно устойчивой внешней среде, формирующей деловую культуру и механизм дисциплинирующих воздействий, что подталкивает компании к поиску внутреннего баланса интересов.

В динамически неустойчивой внешней среде сбалансированная система корпоративного управления практически неработоспособна. Стремление к существенному сглаживанию конфликта интересов привело в российской практике к концентрации капитала. Фактически это путь построения сбалансированной системы путем вывода за рамки корпоративных процессов носителей других интересов. Именно поэтому созданные в процессе приватизации компании открытого типа перешли к закрытым корпоративным отношениям со значительно сконцентрированной собственностью. Преимущества и работоспособные механизмы сбалансированной системы практически были ликвидированы. Совет директоров утратил роль проводника баланса интересов и остался пассивным органом управления, существующим лишь как дань формальным нормам. Очевидно, что необходима трансформация органа управления в стратегически ориентированный и необходимо дать ответ на вопрос о стратегических ориентирах.

Наука управления базируется на системном подходе. Профессор П. А. Коз-

лов дает такое определение: «...Система есть объект с целесообразно построенной структурой и активным самоподдержанием в среде с дезорганизацией» [4]. Из этого следует, что есть общая функция, есть параметры, характеризующие эту функцию, есть структура, реализующая общую функцию, есть механизм контроля и анализа внешней и внутренней среды для определения разрушающего воздействия и есть управление, которое реализует реакцию на дезорганизующее воздействие. Многие авторы дают и другие определения системы. Независимо от предпочитаемой терминологии исходно основная цель системы — это сохранение самого себя. И всякая организация стремится к выживанию. При этом компания, будучи открытой системой, выживает только путем устойчивого обмена с внешней средой. На рынках услуги и товары реализуются в условиях добровольных соглашений между продавцами и покупателями. Подобное соглашение происходит, когда обе стороны получают ощутимую выгоду от сделки. Это означает, что покупатель ощущает ценность от товара большую, чем сумма денег, которые он заплатил за товар, а продавец реализует товар по цене, превышающей его издержки. Деньги покупателя являются основой текущих средств фирмы. Прибыль становится побочным продуктом

удовлетворения потребителей (рис. 3). Таким образом, предоставление ценности потребителям — это условие устойчивости организации во взаимодействии с внешней средой.

Менеджеры и наемные работники продают компании свою рабочую силу не только для покрытия издержек, но и для получения некоторой прибыли в форме морального удовлетворения, профессионального роста, оценки своих компетенций. Предприятие надеется получить от работников выгоду в объеме, превышающем расходы по оплате их труда. И здесь условием выживания компании становится создание некоторой ценности в отношении работников. В противном случае сотрудники могут в любое время покинуть фирму. Сложнее с собственниками. Но и собственник может в любое время продать свои акции другим собственникам. Наконец, единственный (основной) владелец может просто ликвидировать компанию. Таким образом, и в отношении собственников необходимым условием выживания является рост стоимости бизнеса. Базовая стратегическая ориентация организаций и компаний — это воспроизводство стоимости для потребителей, акционеров и работников.

Однако восприятие ценности товаров и услуг потребителями имеет тенденцию к снижению. При повторных



Рис. 3. Формирование стоимости бизнеса

покупках неизменное качество расценивается как само собой разумеющееся. Поддержание существующих условий труда воспринимается работниками как должное. Для повышения отдачи требуется улучшать условия труда и его оплаты. В общем случае принятый уровень рентабельности капитала быстро перестает удовлетворять и собственников. Таким образом, воспроизводство стоимости сталкивается с постоянно растущими запросами покупателей, акционеров и сотрудников. Но и это еще не все. Стремление повысить качество заставляет совершенствовать производственные и коммерческие процессы. И чем успешнее проводятся инвестиции и инновации, тем большее количество конкурентов последуют этому примеру. Инвестиции, вкладываемые в разработку новых товаров и услуг, через некоторое время оборачиваются ростом конкурентного давления и снижением продаж. Жизненный цикл услуг и товаров укорачивается [5]. Стремясь к устойчивости своего положения, компания вынуждена постоянно генерировать инновации — простое воспроизводство стоимости возможно лишь на ограниченном промежутке времени.

Основным стратегическим ориентиром становится устойчивый рост стоимости бизнеса. Стратегическое управление в этом случае сводится к управлению стоимостью компании. Стратегические решения обладают особенностью — процесс их разработки не менее важен, чем результат. Отсюда возникает сложность контроля за реализацией решений.

Акцент с контроля менеджмента необходимо смещать на улучшение процесса принятия решений. Оценка эффективности решений должна опираться на анализ того, как отразятся стратегические решения на стоимости компании в будущем. Для этого должны быть разработаны соответствующие аналитические модели. В современной практике можно выделить три базовых аналитических модели (рис. 4).

Модели, представленные на рис. 4, используют разные базовые показатели, но все они ориентированы на оценку роста подлинной стоимости компании. Наиболее простой и распространенной является первая модель. Показатель

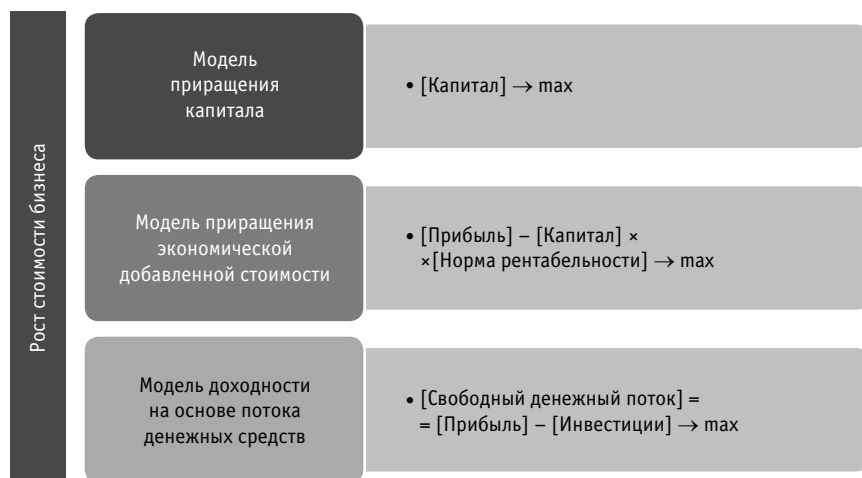


Рис. 4. Аналитические модели роста стоимости бизнеса

«капитал» включается в отчетность стандартно и не вызывает особых трудностей в учете и контроле. Тем не менее некоторые российские компании применяют и вторую, и третью модели. Так, холдинг «РЖД» при разработке принципиальной бизнес-модели развития грузового бизнеса определил следующие цели [6]: обеспечение роста денежного потока, необходимого для развития инфраструктуры компании;

повышение стоимости бизнеса холдинга и дивидендного потока для акционеров;

снижение рисков, связанных с высокими постоянными затратами в общей структуре затрат холдинга.

Как можно заметить, акцент сместился с роста капитализации компании на рост денежных потоков, достаточных для инвестиций и дивидендов. Для реализации заявленных целей сформулированы ключевые факторы успеха, установлены приоритетные рыночные сегменты и определены нормы доходности, темпы роста, доля постоянных издержек, объемы инвестиций в активы.

Вторая существенная задача при построении стратегически ориентированной системы управления связана с разработкой показателей для текущего управления и контроля. Реализацию стратегических решений невозможно проконтролировать в рамках традиционной системы показателей. Поэтому для каждой из применяемых моделей должна быть разработана своя система показателей. Необходима также увязка с от-

раслевыми особенностями и доминирующими процессами принятия решений. Речь идет о создании системы показателей, с одной стороны позволяющей контролировать реализацию стратегических решений, а с другой — понятной во всех управленческих звеньях. Задания на любом управленческом уровне должны быть ориентированы на рост стоимости компании.

Стратегическая ориентация на рост стоимости бизнеса привлекательна для собственников, но заявление об ориентации не приведет к росту стоимости компании — необходим переход к профессиональной основе избрания членов совета директоров. Распределение ответственности между советом директоров и менеджментом складывается следующим образом: менеджмент отвечает за формирование потребительской ценности, которая будет востребована на рынке и будет создавать конкурентные преимущества, а совет директоров — за трансформацию процесса создания потребительской ценности в процесс создания экономической стоимости. Поэтому в компании возникает цепочка создания экономической стоимости. Системы поощрения при этом должны быть привязаны к цепочке создания экономической стоимости и базироваться на оценке вклада в прирост стоимости компании в целом. Одновременно должны произойти организационные изменения в процессах бюджетирования, учета и пересмотрены подходы к формированию отчетности.

Автоматизация управления современной транспортно-экспедиторской компанией — это два взаимосвязанных процесса. Первый — формирование производственно-управленческой структуры, порождающей мощные потоки информации. Второй — формирование структуры, управляющей этими потоками. Комплексная автоматизация компании невозможна,

если нет регулярного менеджмента. Постановку менеджмента можно производить с использованием и простых трафаретных техник моделирования, и специальных компьютерных программ-структуризаторов. Но обязательным стартовым условием является построение бизнес-модели предприятия и определение стратегических ориентиров.

Литература

1. 7 нот менеджмента / А. Бочкарев, В. Кондратьев, В. Краснова и др. М. : ЗАО «Журнал Эксперт», 2002. 656 с.
2. Chandler A. D. Strategy and Structure: Chapters in the History of the Industrial Enterprise: 19th edition, 1995.
3. Хэмел Г. Будущее менеджмента. СПб. : Бест Бизнес Букс, 2013. 277 с.
4. Козлов П. А. О системах и системности на транспорте // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. ISSN 1815-9400.
5. Тушин Н. А., Тимухин К. М. Влияние конкуренции на рынок транспортно-экспедиционных услуг // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 69–74. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-69-74. ISSN 1815-9400.
6. Бабаев С. М. Развитие транспортно-логистического бизнеса холдинга «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2013. № 12. С. 6–9. ISSN 0044-4448.

References

1. 7 not menedzhmenta [7 notes of management] / A. Bochkarev, V. Kondratyev, V. Krasnova i dr. M. : ZAO «Zhurnal Ekspert», 2002. 656 s.
2. Chandler A. D. Strategy and Structure: Chapters in the History of the Industrial Enterprise : 19th edition. 1995.
3. Khemel G. Budushchee menedzhmenta [The future of management]. SPb. : Best Biznes Buks, 2013. 277 s.
4. Kozlov P. A. O sistemakh i sistemnosti na transporte [On systems and systemacity of transport] // Transport Urala. 2016. № 2 (49). S. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. ISSN 1815-9400.
5. Tushin N. A., Timukhin K. M. Vliyanie konkurentsii na rynek transportno-ekspeditsionnykh uslug [Effects of competition on the market of freight forwarding services] // Transport Urala. 2016. № 2 (49). S. 69–74. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-69-74. ISSN 1815-9400.
6. Babaev S. M. Razvitie transportno-logisticheskogo biznesa kholdinga «RZhD» [Development of transport and logistics business of the holding Russian Railways] // Zheleznodorozhnyy transport. 2013. № 12. S. 6–9. ISSN 0044-4448.

УДК 614.842.435

Валерий Валерьевич Зубков, первый заместитель начальника Забайкальской железной дороги (ЗабЖД), Чита, Россия,
Нина Фридриховна Сирина, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КООРДИНАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТЫ НА ПОЛИГОНЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Valeriy Valeryevich Zubkov, First Deputy Head of the Trans-Baikal Railway, Chita, Russia,
Nina Fridrikhovna Sirina, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Technological coordination of operating work on the railway range

Аннотация

Проблема оптимизации различных технологических задач, возникающих при взаимодействии подразделений бизнес-единиц ОАО «РЖД» на региональном уровне и в границах железных дорог, требует принятия организационных решений в управлении перевозочным процессом. Для этой цели разработана и внедрена автоматизированная система АС РЦКУ — ЗАБ, которая на основании требований единого методологического подхода при проектировании прикладных информационных технологий позволяет создавать и развивать эффективную координацию эксплуатационной работы железной дороги.

Ключевые слова: региональное управление, организационные решения, технологическая координация, автоматизированная система управления, прогнозирование.

Summary

The problem of optimization of various technological problems arising from the con-function of business units of JSC Russian Railways at the regional level and within the boundaries of railways requires the adoption of organizational decisions in the management of the transportation process. For this purpose, the Automated System Regional Center for Corporate Management – ZAB was developed and implemented, which, based on the requirements of a single methodological approach in the design of applied information technologies, allows to create and develop effective coordination of the effective operation of the railway.

Keywords: regional management, organizational solutions, technological coordination, automated control system, forecasting.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-13-17

Внедрение интеллектуальных разработок при управлении технологическим взаимодействием участников перевозочного процесса определяет современное направление в работе и развитии ОАО «РЖД» [1–3]. Структурные преобразования в организационно-управленческой деятельности железной дороги существенно изменили процедуры внутрихозяйственных и внешних взаимодействий. Особое значение приобрели задачи контроля процессов взаимодействия с внешними контрагентами при внутренней клиентоориентированности, создания эффективной системы планирования и корректирования эксплуатационной работы как в долгосрочном (год, квартал), так и в краткосрочном (месяц, сутки) периоде. Для их выполнения необходим постоянный поиск оптимальных (рациональных) решений, направленных на повышение эффективности перевозочного процесса за счет ликвидации временных «барьерных мест» и затруднений, при этом руководителям регионального корпоративного центра (железной дороги) приходится балансировать между соблюдением требований всех заинтересованных участников процесса с учетом достижения конечного результата в тактических и стратегических задачах.

Баланс требуется соблюдать прежде всего в вопросах, связанных:

- с пропуском предъявленных объемов перевозок;
- ремонт и содержанием объектов инфраструктуры;
- рациональным и эффективным использованием ресурсов.

Дисбаланс между этими тремя составляющими может привести к невыполнению и тактических, и стратегических задач. Например, отмена планового «окна» для ремонта пути, с одной стороны, сокращает потери в продвижении поездов, а с другой — приводит к снижению надежности данного пути.

Руководителям, отвечающим за технологическую координацию на дороге, сложно определить результативность решений на основе отчетных форм, принятых в компании. Поэтому на Забайкальской железной дороге разработан аппаратно-программный продукт «Автоматизированная система управления эксплуатационной работой и технологической координации перевозочного процесса» (АС РЦКУ — ЗАБ) (рис. 1).

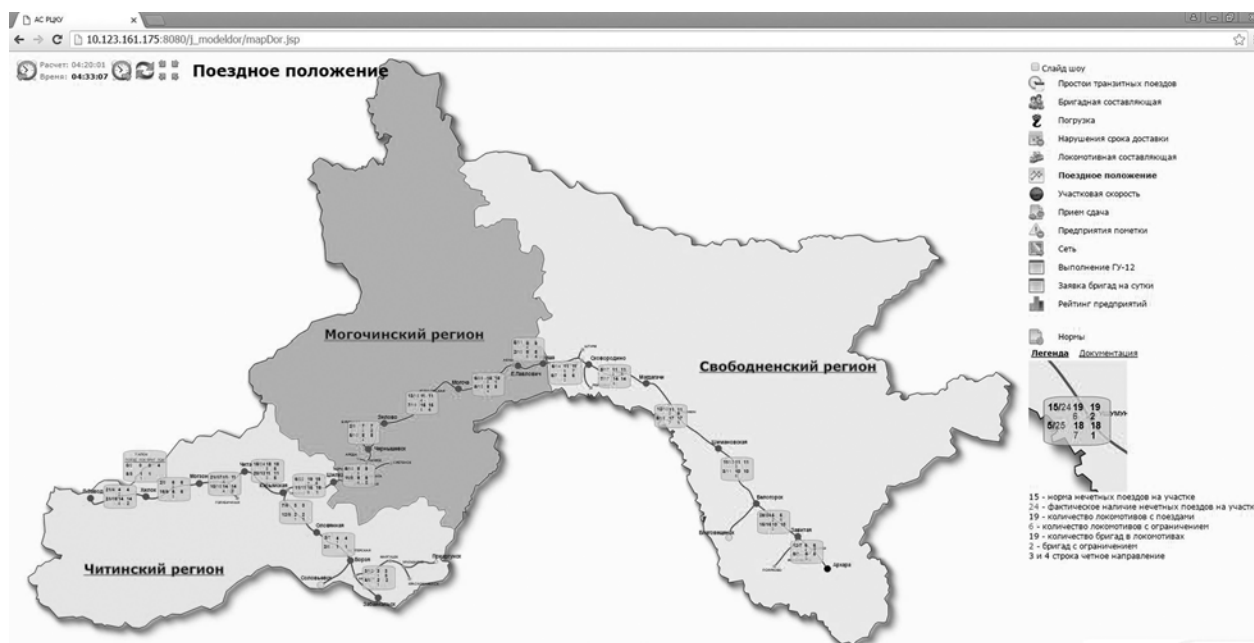


Рис. 1. Слой «Поездное положение» аппаратно-программного комплекса АС РЦКУ — ЗАБ

С помощью АС РЦКУ — ЗАБ решаются следующие задачи: обеспечение управляемости производственной деятельности в процессе структурных преобразований и в целевом состоянии вертикально интегрированных структур управления ОАО «РЖД»;

повышение эффективности качества эксплуатации объектов инфраструктуры железной дороги и снижение издержек; внедрение автоматизированных технологий планирования, регулирования, исполнения и контроля перевозочного процесса; репликация отчетных данных из существующих информационных систем;

переработка системы координации технологических процессов Регионального центра корпоративного управления (РЦКУ), показателей, норм и методик формирования управленческой отчетности.

Автоматизированная система АС РЦКУ — ЗАБ позволяет: осуществлять мониторинг поездной обстановки на железной дороге;

контролировать выполнение предприятиями требований по установленным заданиям;

повышать культуру производства и управления на линейном уровне (оперативное оповещение о состоянии перевозочного процесса);

разграничивать зоны ответственности (по предприятиям); повышать безопасность и бесперебойность движения поездов за счет минимизации влияния человеческого фактора.

Функционал АС РЦКУ — ЗАБ формируется поэтапно: сбор статистических данных о перевозочном процессе, компьютерный анализ, визуальное отображение эксплуатационной работы железной дороги, интегральные показатели производственных процессов и генерация управленческих рекомендаций (автоматические оповещения) в виде интеллектуальных

решений технологической координации. Например, на рис. 2 показан слой «Бригадная составляющая», где после соответствующего погружения в режиме онлайн на станцию Могоча видно, что 1 локомотивная бригада находится на работе с накладным временем более 2 ч.

АС РЦКУ — ЗАБ предусматривает возможность интегрировать показатели из других АСУ, применяемых в ОАО «РЖД», что позволит в будущем на конкурентной основе наполнять систему требуемыми статистическими данными из отобранных АСУ и снизить (объединить) количество действующих в холдинге программных продуктов.

Схема Забайкальской железной дороги детализируется в географическом расположении с учетом эксплуатационных показателей работы предприятий в режиме реального времени и обеспечивает:

вовлечение оперативного персонала всех уровней управления вертикально интегрированных структур на выполнение ключевых показателей работы железной дороги за счет непрерывного информирования;

трансформацию табличных форм результатов процесса в графическое представление эксплуатационной работы (визуализация выполнения, предотказного состояния и невыполнения планов);

анализ и получение документов установленных форм отчетности;

развитие культуры безопасности и системы организации эксплуатационной работы РЦКУ;

управление и контроль за производственными процессами, исполнителями и руководителями;

доступ с каждого рабочего места;

хранение и архивирование данных о производстве работ структурными подразделениями ОАО «РЖД».



Рис. 2. Слой «Бригадная составляющая» аппаратно-программного комплекса АС РЦКУ — ЗАБ

Производственный процесс декомпозируется на следующие уровни:

главный процесс (производственный процесс в деятельности структурного подразделения, который позволяет определить и согласовать требования потребителей и требования к поставщикам) — оценка работы и возможностей;

основные процессы (процессы, образовавшиеся в итоге декомпозиции главного процесса, каждый из которых разбивается на ряд подпроцессов) — регулирование и технологическая координация.

Входными данными оперативной информации для задачи «Технологическая координация эксплуатационной работы» являются: выполнение погрузки, выгрузки, эксплуатационный и тарифный грузооборот, оборот местного, транзитного, порожнего и общего парка вагонов, производительность локомотива, средний вес поезда, техническая и участковая скорость, количество поездов (прием и сдача), «окна», инциденты, вызывающие изменение графика движения поездов, и др.

Визуализация на электронной карте-табло работы железной дороги включает:

- 1) основные показатели по станциям, перегонам, структурным подразделениям;
- 2) корректировку, прогнозирование заданий;
- 3) технологическую координацию;
- 4) возможность наложения слоев с тематически заданными показателями;
- 5) рейтинг предприятий-нарушителей;
- 6) справочник нормативно-правовых документов (НСИ);
- 7) структуру подразделений бизнес-единиц, диспетчерских участков, регионов железной дороги.

Все отчеты формируются по настройке АС РЦКУ — ЗАБ для соответствующего рабочего места. В частности, пользователь

предприятия получает формы отчетов по своему предприятию, а пользователи службы получают формы отчетов по выбранным предприятиям с итогами работы в целом по службе.

Система АС РЦКУ — ЗАБ строится по принципу клиент-серверной технологии (серверной и клиентской части). Клиент получает данные в виде web-страницы с любых устройств (персональный компьютер, ноутбук, мобильное устройство). Серверная часть состоит из двух компонентов: сеансового расчета с периодом 10 мин и сервера приложений, который формирует выходной отчет по запросу пользователя. Программное обеспечение и хранилище данных полностью размещается на сервере и не требует установки на рабочих станциях пользователя каких-либо программных средств.

АС РЦКУ — ЗАБ на основе методики технологической координации структурных подразделений позволяет выполнять некоторые обязанности руководителей разных уровней управления по организации эксплуатационной работы в виде оповещений (электронные сообщения, уведомления и т. д.).

Для уровня железной дороги это предоставление информации об эксплуатационной работе дороги, визуальная оценка состояния инфраструктуры по всем объектам управления на любом уровне детализации (вагон, бригада, локомотив и т. д.), выработка (контроль) стратегических решений. Для уровня региона железной дороги — предоставление структуры региона, диспетчерского участка, помощь в принятии управленческих решений, анализ эксплуатационной работы на основе принятых нормативов и планов. Для уровня линейного предприятия — визуальная оценка работы в зоне его ответственности.

Применение АС РЦКУ — ЗАБ позволяет:

повышать оперативность принятия управленческих решений по координации эксплуатационной работы предприятий на железной дороге;

увеличивать достоверность поступающей информации о перевозочном процессе;

осуществлять оперативный анализ выполнения планов эксплуатационной работы предприятиями региона железной дороги;

разрабатывать унифицированные предложения по технологической координации перевозочного процесса;

приводить к взаимному соответствию деятельность участников перевозочного процесса при условии обеспечения его экономической эффективности;

соблюдать требования безопасности, бесперебойности движения поездов и баланса интересов всех участников технологического процесса.

В АС РЦКУ — ЗАБ реализован элемент информационно-управляющей системы, который позволяет улучшить планирование заставки локомотивных бригад на сутки по техническим станциям (рис. 3). Для этого создан алгоритм расчета подхода поездов, с помощью которого оценивается потребность в локомотивах и локомотивных бригадах.

С целью сокращения затрат времени расчет выполняется в два этапа. На первом этапе его можно проводить ежедневно для получения более точного прогноза. На втором этапе расчет выполняется каждые 10 мин для получения текущего прогноза движения поездов к искомой станции.

Первый этап сводится к расчету времени следования поездов от станций дороги к прогнозной станции:

определяются все грузовые поезда, следовавшие транзитом через прогнозируемую станцию, по историческим данным глубины в 1 месяц;

определяется время прибытия и проследования прогнозной станции по каждому поезду;

рассматриваются станции, на которых совершались операции (прибытие, проследование, отправление, прием, сдача) по каждому поезду; по времени прибытия на прогнозируемую станцию рассчитывается время следования к ней от каждой станции; вычисляется среднее время движения поезда к прогнозной станции;

заполняются таблицы времени следования поезда от станций дороги к прогнозной станции.

Второй этап сводится к расчету прогноза времени движения грузовых поездов к искомой станции на текущий момент времени:

из текущего поездного положения выбираются грузовые поезда, следовавшие транзитом через прогнозируемую станцию; на текущее поездное положение накладывается таблица прогнозного времени следования от станций дороги к прогнозной станции;

сложение прогнозного времени следования от станций к текущему времени среза поездного положения;

рассчитывается прогнозируемое время прибытия каждого поезда на искомую станцию;

группируются поезда по прогнозируемому времени прибытия на текущие и следующие отчетные сутки.

Предложенный алгоритм, реализованный в аппаратно-программном комплексе АС РЦКУ, позволяет составлять суточный прогноз потребного количества локомотивных бригад, значительно улучшая планирование по сравнению с ручными расчетами, которые выполняет диспетчерский аппарат



Рис. 3. Слой «Заявка бригад на сутки» аппаратно-программного комплекса АС РЦКУ — ЗАБ

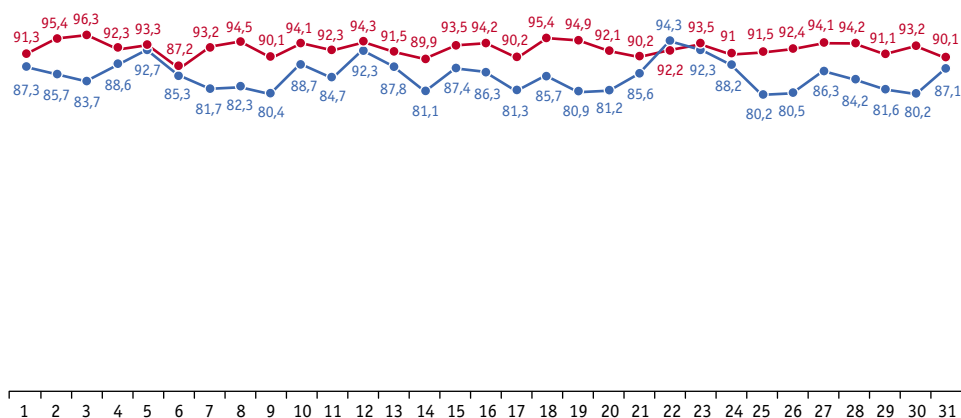


Рис. 4. Процент выполнения прогноза потребного количества локомотивных бригад по станции Могоча на основе алгоритмов АС РЦКУ (красная линия) и расчетов диспетчерского аппарата (синяя линия) в январе 2017 г.

центров по управлению перевозками. Как видно из рис. 4, процент прогноза автоматизированной системы выше, чем ручных расчетов, которые в большей степени основаны на личном опыте специалиста и его субъективном мнении о развитии поездной ситуации.

Таким образом, внедрение АС РЦКУ позволяет вывести прогнозирование потребного суточного количества локомотивных бригад на качественно новый уровень и тем самым решить задачу поэтапного перехода от информационно-аналитических к информационно-управляющим системам.

Литература

1. Зубков В. В., Смольянинов А. В. Концепция взаимодействия региональных дирекций инфраструктуры на границах железных дорог // Транспорт Урала. 2012. № 2 (33). С. 18–21. ISSN 1815-9400.
2. Сирина Н. Ф., Зубков В. В. Формирование модели управления регионом для улучшения обслуживания железной дороги // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 3. С. 40–43. ISSN 0236-1914.
3. Сирина Н. Ф., Галкин А. Г., Юшков М. Е. Интегральная оценка малодоходных 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.

References

1. Zubkov V. V., Smolyaninov A. V. Konceptsiya vzaimodeystviya regionalnykh direktсий инфраструктуры na granitsakh zheleznykh dorog [Concept of interaction of infrastructure regional boards on railway borders] // Transport Urala. 2012. № 2 (33). S. 18–21. ISSN 1815-9400.
2. Sirina N. F., Zubkov V. V. Formirovaniye modeli upravleniya regionom dlya uluchsheniya obsluzhivaniya zheleznoy dorogi [Formation of model of management by region of service by the railway] // Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. 2012. № 3. S. 40–43. ISSN 0236-1914.
3. Sirina N. F., Galkin A. G., Yushkov M. E. Integralnaya otsenka malodeyatelnykh zheleznodorozhnykh liniy OAO «RZhD» kak osnova effektivnogo i obosnovannogo ispolzovaniya 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.

УДК 656.073.235

Олег Валерьевич Москвичев, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), директор центра «Моделирование транспортных и логистических процессов», Самара, Россия

МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОНТЕЙНЕРНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО ПОДХОДА

Oleg Valeryevich Moskvichev, PhD in Economics, Associate Professor, Technology of Cargo and Commercial Work, Stations and Units Department, Samara State Transport University (SSTU), Director of the Center for Modeling Transport and Logistic Processes, Samara, Russia

Models, methods and algorithms of optimization of container transport system of railway transport based on the cluster approach

Аннотация

В работе рассмотрена основанная на долгосрочном планировании развития контейнерно-транспортной системы как части транспортного комплекса задача рационального размещения терминальной инфраструктуры относительно центров промышленного производства и потребления контейнеропригодной продукции, что, в свою очередь, создаст условия для массового использования контейнерных поездов на сети железных дорог Российской Федерации. Решения оптимизационных задач по выбору мест расположения контейнерных пунктов и контейнерных накопительно-распределительных центров при помощи графовых моделей и математического программирования при многих комбинаторных ограничениях приводят к сложным вычислительным процедурам переборного характера, что не позволяет применять их в рамках территорий федеральных округов или всей страны. Для этих целей предлагается использовать единую методологию, основанную на кластерном анализе.

Ключевые слова: контейнерно-транспортная система, кластерный анализ, контейнерные перевозки, контейнерный пункт, размещение транспортных объектов, контейнерный поезд, контейнерный накопительно-распределительный центр.

Summary

The work considers the task of rational placement of the terminal infrastructure based on the long-term planning of the development of the container transport system as part of the transport complex in relation to the centers of industrial production and consumption of container-compatible products, which in turn will create conditions for the mass use of container trains on the railways of the Russian Federation. Solutions of optimization tasks for the selection of the location of container points and container storage centers with the help of graph models and mathematical programming with many combinatorial constraints lead to complex computational procedures of an oversized nature that does not allow them to be applied within the territories of federal districts or the whole country. For these purposes, it is proposed to use a single methodology based on cluster analysis.

Keywords: container transport system, cluster analysis, container transportation, container terminal, transportation facilities placement, container train, container storage and distribution center.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-18-27

Существующая инфраструктура и технология работы контейнерно-транспортной системы (КТС) железнодорожного транспорта формировалась под задачи плановой экономики. С переходом на рыночные условия, отменой государственного заказа на перевозки и отменой государственной монополии на внешнюю торговлю были потеряны налаженные производственные связи, изменились в объемных показателях направления грузопотоков, а следовательно, и загрузка многих контейнерных терминалов.

В настоящее время реконструкция и развитие КТС железнодорожного транспорта является актуальной задачей, связанной не только с поиском оптимальных мест размещения терминальных объектов, но также с их количеством и требуемой мощностью [1].

Кроме того, оптимизация сети контейнерных терминалов на железнодорожном транспорте требует разработки и внедрения новых высокотехнологичных транспортных продуктов, основанных на максимальной маршрутизации контейнерных перевозок, и комплексного поэтапного перехода на организацию движения грузовых поездов по расписанию. Вместе с тем реализации данных технологий препятствуют трудности, обусловленные неготовностью (как в техническом, так и в технологическом плане) терминальной инфраструктуры КТС железнодорожного транспорта.

Анализ грузопотоков показывает, что основная доля формируемых в настоящее время контейнерных поездов, следующих в международном, транзитном и местном сообщениях, — это поезда «одного клиента», или, другими словами, сервис, оказываемый конкретному грузоотправителю и грузополучателю с оговоренными объемами, сроками, частотой курсирования и тарифами. Сюда, например, можно отнести сервис, который предоставляется автосборочным предприятиям, производителям электроники, крупным торговым сетям. Однако число таких клиентов ограничено, соответственно

делать ставку только на них, говоря о дальнейшей маршрутизации контейнерных перевозок и перспективах их развития, нецелесообразно [2].

Основная масса контейнеропригодной продукции производится предприятиями, которые, как правило, заключают контракты с многочисленными мелкими и средними потребителями. Это предполагает перевозку по различным направлениям, в ряде случаев не имеющих прямого железнодорожного сообщения. Сроки доставки исключают возможность использовать продолжительный период накопления в адрес одного контейнерного пункта (КП) назначения. Возникает ситуация, когда в адрес каждого КП назначения нет объема контейнеропригодной продукции, нужного для организации ускоренных контейнерных поездов, хотя общий объем позволял бы это сделать. То есть, согласно анализу производства, существует большой объем контейнеропригодной продукции, но в то же время отсутствует возможность не только формировать контейнерные поезда, но и в принципе привлекать потенциальные грузы для перевозки в контейнерах. Вследствие этого контейнеропригодная продукция отправляется повагонными отправками, а во многих случаях автомобильным транспортом на так называемые «нерентабельные» для этого вида транспорта расстояния. Таким образом, существующие в настоящее время контейнерные поезда — это, образно говоря, некий «эксперимент», который проводится на инфраструктуре, сформированной под другие задачи, потребности и технологии. В ближайшем будущем предстоит изучить преимущества массового применения контейнерных поездов на сети железных дорог Российской Федерации [3].

Сложившаяся к настоящему времени ситуация, т. е. развитие новых производств (как правило, сборочных, функционирование которых нуждается в совершенствовании транспортной инфраструктуры), закрытие или частичная консервация старых производств, необходимость применения современных и прогрессивных перевозочных технологий, требует корректировки размещения терминальных объектов КТС железнодорожного транспорта как в количественном, так и в технологическом отношении и построения новой модели ее функционирования.

В настоящей статье предлагается модель двухуровневой структуры КТС железнодорожного транспорта, которая позволит концентрировать объемы контейнеропригодной продукции, необходимой для формирования контейнерных поездов, и исключить длинные сроки накопления.

Кроме того, при реализации данной модели возможно создание инфраструктуры КТС железнодорожного транспорта, сбалансированной не только по количеству объектов терминальной инфраструктуры, но и по месту их размещения относительно промышленного производства, что обеспечит загрузку и эффективное использование транспортно-логистических объектов.

Для этого в каждом регионе предлагается создать контейнерный накопительно-распределительный центр (КНРЦ), оптимально расположенный по отношению к сети контейнерных пунктов, размещение которых, в свою очередь, должно быть оптимизировано под клиентов, т. е. под конкретные грузы.

Предлагаемая модель функционирует следующим образом. Продукция или грузы контейнеры подвозятся на КП

автомобильным транспортом, там формируются челночные контейнерные поезда (ЧКП) (могут иметь формат вывозного, передаточного) назначением на КНРЦ рассматриваемого региона. ЧКП формируются без учета конечной станции назначения конкретного груза и отправляются строго по расписанию.

Далее на территории КНРЦ контейнерные отправки, имеющие различные пункты назначения, перекомплектуются в ускоренные контейнерные поезда однородной адресации, т. е. назначением на КНРЦ соответствующего региона. После прибытия на КНРЦ ускоренный контейнерный поезд расформируется. Затем доставка контейнеров до КП станции назначения осуществляется регулярными ЧКП и далее автотранспортом до дверей получателя [1].

Схема предлагаемой модели функционирования КТС железнодорожного транспорта представлена на рис. 1.

Однако современные решения по размещению элементов железнодорожных транспортных систем не всегда отвечают требованиям рациональности из-за сложности и многовариантности задач. Основной проблемой является то, что строительство логистических и распределительных центров, складских помещений, терминальных комплексов и других объектов транспортной инфраструктуры осуществляется однократно, в то время как эксплуатация — в течение многих десятилетий.

Многие ученые и практики считают, что целостная концепция системного подхода к вопросам рационального проектирования и размещения элементов транспортной системы страны находится в настоящее время только в стадии формирования.

Анализ различных моделей и решений задач оптимизации местоположения объектов транспортной инфраструктуры, в частности терминальной инфраструктуры железнодорожного транспорта, показывает, что требуется подход, который бы увязывал данные о местоположении отдельных грузоотправителей и грузополучателей, объемы их грузовой базы с конкретной сетью железных дорог. При этом следует учитывать необходимые группы факторов, влияющих на дальнейшую эксплуатацию терминальной инфраструктуры, на основе критериев минимизации затрат при перевозках в тонно-километрах.

Так, для решения задачи по созданию современной КТС железнодорожного транспорта на основе клиентоориентированного подхода и массового внедрения технологии контейнерных поездов предлагается использовать математические методы кластеризации объектов, т. е. кластерный анализ. Кластерный анализ строится на принципах разбиения множества объектов с заданными свойствами на подмножества при заданных критериях разбиения и получения центров этих подмножеств, обладающих оптимальными свойствами.

Большое достоинство кластерного анализа и в том, что с его помощью можно производить разбиение объектов не по одному параметру, а по целому набору признаков. Литературные источники и опыт использования стандартных программных средств кластерного анализа дают основания утверждать, что он позволяет решать практические задачи большой размерности.

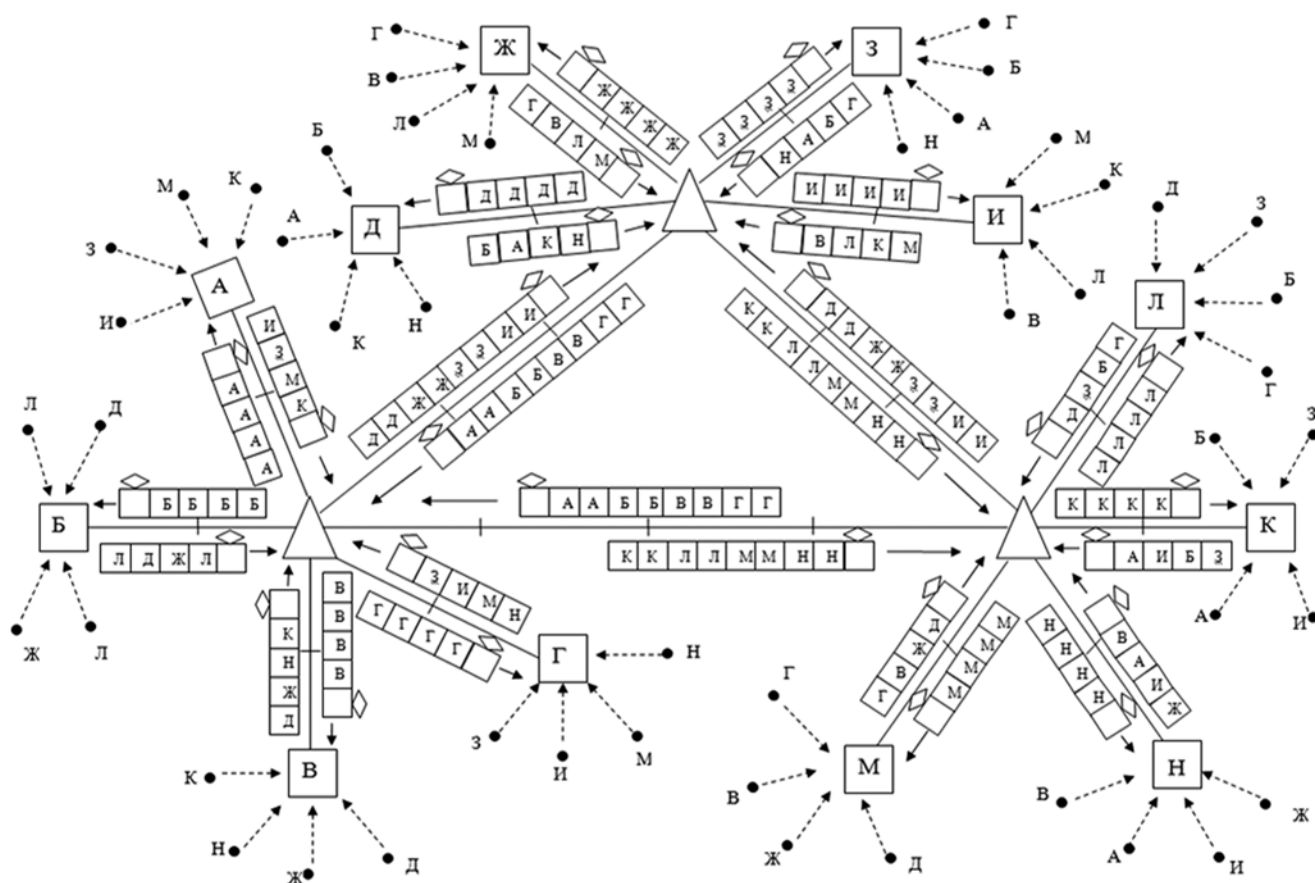


Рис. 1. Схема предлагаемой модели функционирования контейнерно-транспортной системы железнодорожного транспорта:
△ — КНРЦ; ● — грузоотправители-грузополучатели; □ — КП

На первом уровне целью оптимизации может быть сокращение затрат на перевозку в интересах грузоотправителей и грузополучателей. Для этого решается задача разбиения всего множества клиентов на подмножества с центрами, обладающими оптимальными свойствами. То есть на первом уровне центром будет контейнерный пункт, оптимальным образом расположенный относительно контейнеропригодной продукции конкретных грузоотправителей и грузополучателей. Основным условием является минимум затрат грузовладельцев на доставку груза на КП.

Действительно, геометрическая близость клиентов к центру гарантирует минимизацию расстояний при перевозке, а учет «веса» каждого объекта, выражающего объем перерабатываемой продукции, оптимизирует общие затраты перевозок в тонно-километрах.

На втором уровне полученные центры разбиваются на подмножества с центрами на сети железных дорог. На этом уровне определяются КНРЦ, для которых оптимизирующим критерием будут минимальные затраты на доставку грузов с учетом вектора критериальных параметров железнодорожных станций. Под количественно измеряемыми критериями создания КНРЦ принимаются:

1) наличие международных транспортных коридоров, проходящих по территории данного региона;

- 2) уровень контейнерной привлекательности региона;
- 3) степень готовности инфраструктуры (т. е. принцип преимущественности модернизации существующих терминалов перед строительством новых);
- 4) наличие на станции примыкания достаточного путевого развития либо резервов пропускной способности (или возможностей увеличения пропускной способности в перспективе);
- 5) близость к крупному транспортному узлу и центру массового зарождения и/или погашения грузопотоков;
- 6) наличие в зоне предполагаемого размещения КНРЦ резервных мощностей инженерных сетей (прежде всего электроэнергетики);
- 7) близость к основным (федеральным, областным) автомобильным дорогам;
- 8) близость к городской агломерации (этот фактор имеет значение для организации как дистрибуционной деятельности КНРЦ, так и доставки на терминалы обслуживающего персонала и клиентов);
- 9) наличие резервов пропускной способности железнодорожной инфраструктуры на подходах к станциям примыкания.

Анализ известных алгоритмов кластеризации показал, что в них центр кластера определяется только свойствами кластеризуемых объектов и в процедуре кластеризации отсутствует

возможность ввести ограничения на выбор этих центров. Например, при использовании алгоритмов кластеризации по методу *k-means* считается, что оптимальный центр может находиться в любой точке пространства параметров, определяющих объекты. Если параметры — это геометрические координаты производств, то центр по методу *k-means* может лежать в любой точке плоскости. На практике следует рассмотреть случай, когда центр обязательно должен размещаться в одной из заданных точек (например, на железнодорожной станции). Таким образом, при определении мест расположения КП и КНРЦ приходится решать задачу кластеризации с проекцией на функцию, когда центр обязательно должен находиться на железнодорожной станции, или с проекцией на точки.

В настоящей работе предлагается новый метод кластеризации с проекцией на множество точек — *k-means pro* — и исследуется возможность его применения в практических задачах проектирования транспортной инфраструктуры [4].

Входными данными являются множество объектов кластеризации $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, их веса $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ и допустимое множество проекций $Y = \{y_1, \dots, y_p\}$. Каждый j -й объект и каждая допустимая точка-проекция заданы в G -мерном пространстве R^G , т.е. $x_j = (x_{j1}, \dots, x_{jG})$ и $y_r = (y_{r1}, \dots, y_{rG})$.

Единственный управляющий параметр — число кластеров k , на которые производится разбиение $S = \{S_1, \dots, S_k\}$ множества X . В результате получается несмещенное разбиение $S^* = \{S_1^*, \dots, S_k^*\}$, центры которого являются оптимальным множеством проекций $C^* \subseteq Y$.

Введем обозначения: n — количество объектов кластеризации, p — количество точек допустимого множества проекций, i, i' — номер кластера, j — номер объекта, r — номер точки множества проекций, l — номер координаты точки, m — текущая итерация, G — размерность пространства, в котором выполняется кластеризация.

Расстояние между точками в заданном G -мерном пространстве определяется по Евклидовой метрике, где t_1 и t_2 — две любые точки пространства R^G :

$$d(t_1, t_2) = \sqrt{\sum_{l=1}^G (t_{1l} - t_{2l})^2}. \quad (1)$$

1. Выберем начальное разбиение $S^0 = \{S_1^0, \dots, S_k^0\}$:

$$S_i^0 = \{x_{i1}^0, \dots, x_{in}^0\}, \bigcup_{i=1}^k S_i^0 = X, S_i^0 \cap S_{i'}^0 = \emptyset, i \neq i'. \quad (2)$$

2. Пусть построено m -е разбиение $S^m = \{S_1^m, \dots, S_k^m\}$.

Вычислим набор средних векторов $E^m = \{e_1^m, \dots, e_k^m\}$, т.е.

$$e_i^m = (e_{i1}^m, \dots, e_{iG}^m),$$

здесь

$$e_{il}^m = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} v_j x_{jl}}{\sum_{j=1}^{n_i} v_j}, \quad (3)$$

где n_i — количество точек i -го кластера.

3. Определим множество проекций, средних для текущего разбиения:

$$C^m = \{y \in Y : \forall i, d^*(y, e_i^m) = \min_{1 \leq r \leq p} d(y_r, e_i^m)\}. \quad (4)$$

4. Построим минимальное дистанционное разбиение, порождаемое множеством C^m , и возьмем его в качестве $S^{m+1} = (S_1^{m+1}, \dots, S_k^{m+1})$, т.е. для первого уровня

$$S_i^{m+1} = \left\{ x \in X : d(x, c_i^m) = \min_{1 \leq i' \leq k} d(x, c_{i'}^m) \right\}, 1 \leq i \leq k. \quad (5)$$

5. Если $S^{m+1} \neq S^m$, то переходим к п. 2, заменив m на $m+1$, если $S^{m+1} = S^m$, то полагаем $S^* = S^m$, $C^* = C^m$ и заканчиваем работу алгоритма.

В качестве критерия кластеризации в данном алгоритме используется функционал [5]

$$F(S) = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} \|x - e_i(S)\|^2. \quad (6)$$

Так как на последовательности разбиений $S^0, S^1, \dots, S^m, \dots$, которая строится в алгоритме *k-средних*, функционал $F(S)$ не возрастает, причем $F(S^m) = F(S^{m+1})$, только если $S^m = S^{m+1}$, то для любого начального разбиения S^0 алгоритм через конечное число шагов заканчивает работу.

Результат классификации зависит от выбора e^0 , поэтому каждый раз получаем локальный минимум $F(S)$. Нами координаты e^0 были получены как случайные числа, равномерно распределенные в прямоугольнике возможных координат исходных точек. Для проверки устойчивости результатов и получения различных зависимостей менялся выбор e^0 .

Обоснованность формируемых кластеров, т.е. приемлемость полученных результатов по установлению мест расположения КП, определялась валидацией кластеров.

Различают два типа валидации: внутреннюю — по тому, насколько кластеры соответствуют исходным данным, и внешнюю (целевую) — по тому, насколько кластеры соответствуют информации, не учитываемой при их построении, но известной специалистам, которые используют кластеризацию в своих целях.

Для внутренней валидации применяются самые разнообразные индексы, выражающие качество результатов кластеризации. Наиболее популярным является индекс Дэвиса — Болдина [6, 7], который был использован и в нашей работе:

$$DB = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k \max_{i \neq j} \left\{ \frac{S_k(Q_i) + S_k(Q_j)}{S(Q_i, Q_j)} \right\}, \quad (7)$$

где S_k — среднее расстояние от объектов до центра кластера; $S(Q_i, Q_j)$ — расстояние между центрами кластеров.

Чем меньше значение этого индекса, тем кластеры компактнее и удаленнее друг от друга, что позволяет обосновать количество кластеров k . В нашем случае это важно, поскольку при

кластеризации производств число центров-КП k может быть в общем не задано и должно находиться из условия оптимизации какого-то дополнительного критерия.

Рассмотрим критерий, который выражает целевое предназначение нашей кластеризации: определение мест расположения контейнерных пунктов как центров кластеров среди всех заданных станций сети железных дорог региона. Здесь есть два варианта.

1. Количество центров (КП) задано. Это будет тогда, когда при проектировании определены ресурсы на создание всех КП и известна средняя нормативная стоимость одного КП. В данном случае сами затраты на создание всех КП не оптимизируются, а в качестве критерия выступают затраты на перевозку грузов от всех клиентов до своих КП:

$$E_1 = \sum_{i=1}^n D_i \cdot V_i \cdot s \rightarrow \min, \quad (8)$$

где E_1 — затраты на перевозку;

D_i — среднее расстояние от точки-производства до КП;

V_i — объем контейнеропригодной продукции;

s — расходная ставка на перевозку.

2. Количество КП не задано (k неизвестно), но известна средняя стоимость одного КП — c . Тогда в качестве критерия оптимизации выступает сумма общих затрат на перевозку и на создание КП:

$$E = \sum_{i=1}^n D_i \cdot V_i \cdot s + c \cdot k \cdot \gamma \rightarrow \min, \quad (9)$$

где γ — нормативный коэффициент эффективности.

Решать поставленную задачу можно по трем различным алгоритмам.

1. Классический алгоритм k-means. Результатом работы данного алгоритма [5] будет расположение контейнерных пунктов в геометрических центрах, обеспечивающих оптимальные свойства с позиции наименьшего для всей сети перевозок суммарного расстояния от точек-предприятий до КП. Такую кластеризацию назовем свободной, а алгоритм, реализующий ее, обозначим как алгоритм 1.

2. Алгоритм k-means с проекцией на последнем шаге. Сначала произведем кластеризацию объектов с помощью алгоритма k-means. В результате получим разбиение предприятий в виде кластеров с геометрическими центрами, а затем для каждого центра найдем ближайшую железнодорожную станцию и будем считать, что здесь должен располагаться КП. Такой алгоритм с проекцией на последней итерации назовем алгоритмом 2.

3. Модифицированный алгоритм k-means с проекцией (k-means pro). Выбираем число k и на первом шаге выбрасываем k случайных точек, называемых центрами кластеров. Затем каждое производство привязываем к ближайшему центру. В результате получаем, что каждый объект назначен определенному кластеру. Вычисляем новые центры как координатные средние кластеров, а затем проецируем их на множество железнодорожных станций. Полученный набор считаем новыми

центрами кластеров, затем объекты снова перераспределяем. Процесс вычисления центров и перераспределения объектов продолжаем до тех пор, пока кластерные центры не стабилизируются, т. е. все наблюдения принадлежат кластерам, которым они принадлежали до текущей итерации. Назовем такой алгоритм алгоритмом 3.

Для проведения экспериментальных и практических расчетов была написана программа на языке JavaScript. Она реализуется в нескольких режимах — с заданным или произвольным количеством кластеров. В первом случае реализация заключается в применении выбранного алгоритма и задании числа кластеров k . Во втором случае количество кластеров определяется согласно выбранному критерию (по минимуму суммарных затрат на перевозку и на создание k КП или по индексу Дэвиса — Болдина) с помощью перебора вариантов для каждого k . Стоит отметить, что такое разнообразие режимов работы позволяет экспериментальным образом достигнуть наилучшего результата разбиения.

На основе разработанного алгоритма и программы проведены многократные эксперименты на примере Приволжского федерального округа (ПФО). Было рассмотрено 900 промышленных предприятий и 137 железнодорожных станций. Производства определялись географическими координатами и объемом производимой и/или добываемой контейнеропригодной продукции. Множество железнодорожных станций задано на сети 6 железных дорог, проходящих по территории ПФО. На рис. 2 представлен фрагмент одной из таблиц, выдаваемых программой.

Рассмотрим некоторые данные, полученные для ПФО в режиме алгоритма k-means с проекцией, критерий — суммарное расстояние от всех точек до своих центров $D = \sum_{i=1}^n D_i$. Результат выполнения программы для $k = 25$ представлен на рис. 3 (полученное $D = 27736,88$ км). График зависимости критерия D от k показан на рис. 4, из которого видно, что при увеличении числа k суммарное расстояние $D = \sum_{i=1}^n D_i$ сокращается.

Далее для оптимизации числа кластеров k выберем индекс Дэвиса — Болдина, а алгоритм оставим прежним — кластеризацию с проекцией. Результат выполнения программы для $k = 22$ представлен на рис. 5, график зависимости критерия Дэвиса — Болдина — на рис. 6. Полученные данные: оптимальное количество кластеров $k = 22$, $DB = 0,71$.

Произведем кластеризацию при условии задания целевого критерия в случае, когда известно число k (КП), т. е. когда при проектировании заданы ресурсы на создание всех КП и известна средняя нормативная стоимость одного КП. В этом случае сами затраты на создание всех КП не оптимизируются, а в качестве критерия выступают затраты на перевозку грузов от всех клиентов до своих КП.

Выполним кластеризацию при заданных значениях k , которые будем менять от 1 до 25, по всем трем алгоритмам, описанным выше. Как видно из рис. 7, общие затраты на перевозку сокращаются при увеличении k — числа КП. С этой точки зрения чем больше количество контейнерных пунктов, тем меньше затраты на перевозку от места производства до КП.

$k = 25$ Общий объем грузов — 558296 т
 Общее расстояние — 19019,14 км
 Объем перевозок — 18234000 т·км
 Среднее расстояние до КП — 22,4 км
 Среднее расстояние между КП — 98,1 км

№	Станции-КП	Количество предприятий	Номера в списке предприятий	Объем	% от общего объема	Среднее расстояние до КП
1	Трофимовский-2	54	788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 828, 829, 830, 831, 832, 835, 837, 838, 839, 840, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852	54713	9,8	2
2	Кротовка	12	150, 151, 199, 200, 208, 576, 577, 602, 611, 723, 724, 749	35373	6,3	16

Рис. 2. Пример выдаваемых программой результатов

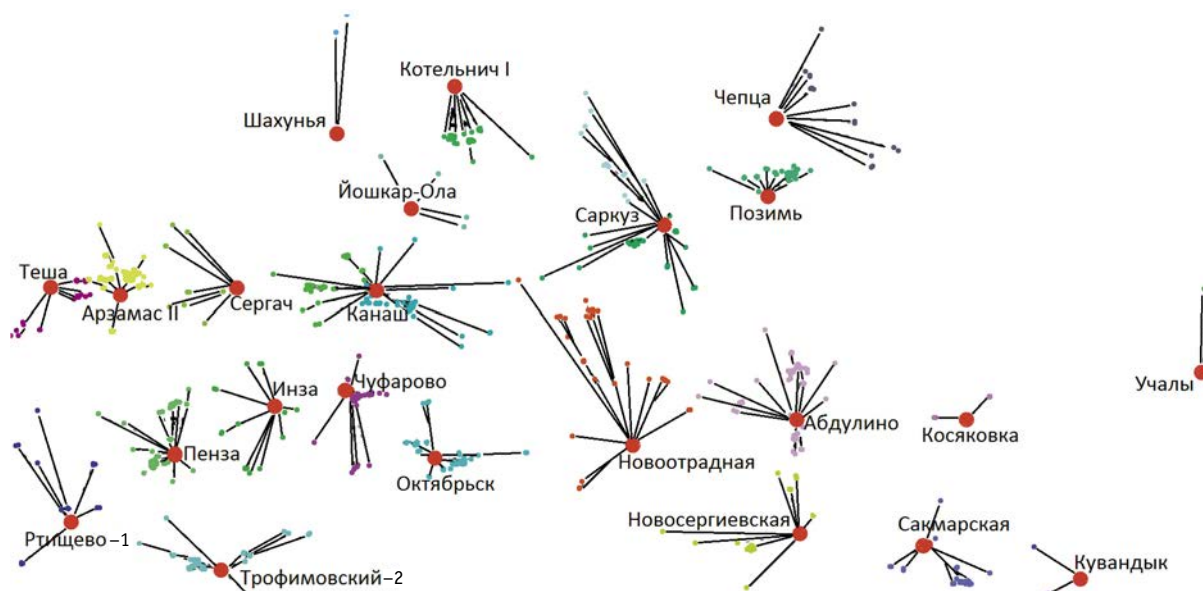


Рис. 3. Результат выполнения программы для $k = 25$ в режиме кластеризации с проекцией и критерием суммарного расстояния

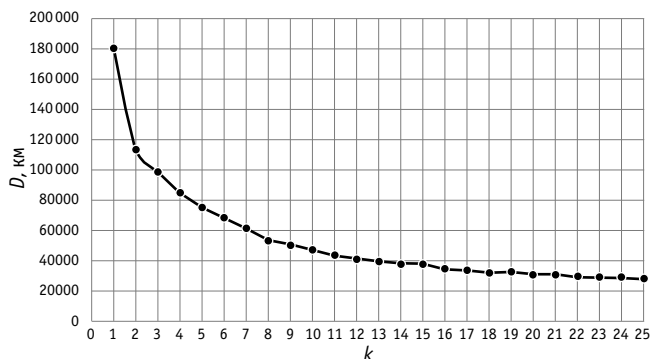


Рис. 4. График зависимости суммарного расстояния от количества кластеров:
 —●— АЛГ 3

Далее произведем кластеризацию при условии, что количество КП не задано (k неизвестно), но известна приведенная нормативная стоимость затрат на создание одного КП — c . Тогда в качестве критерия оптимизации выступает сумма общих затрат на перевозку и на создание КП.

Рассмотрим данные оптимизации количества КП по критерию общих затрат на проект создания сети E . Сравним результаты работы алгоритма 1 для ПФО при разных условных значениях c (рис. 8).

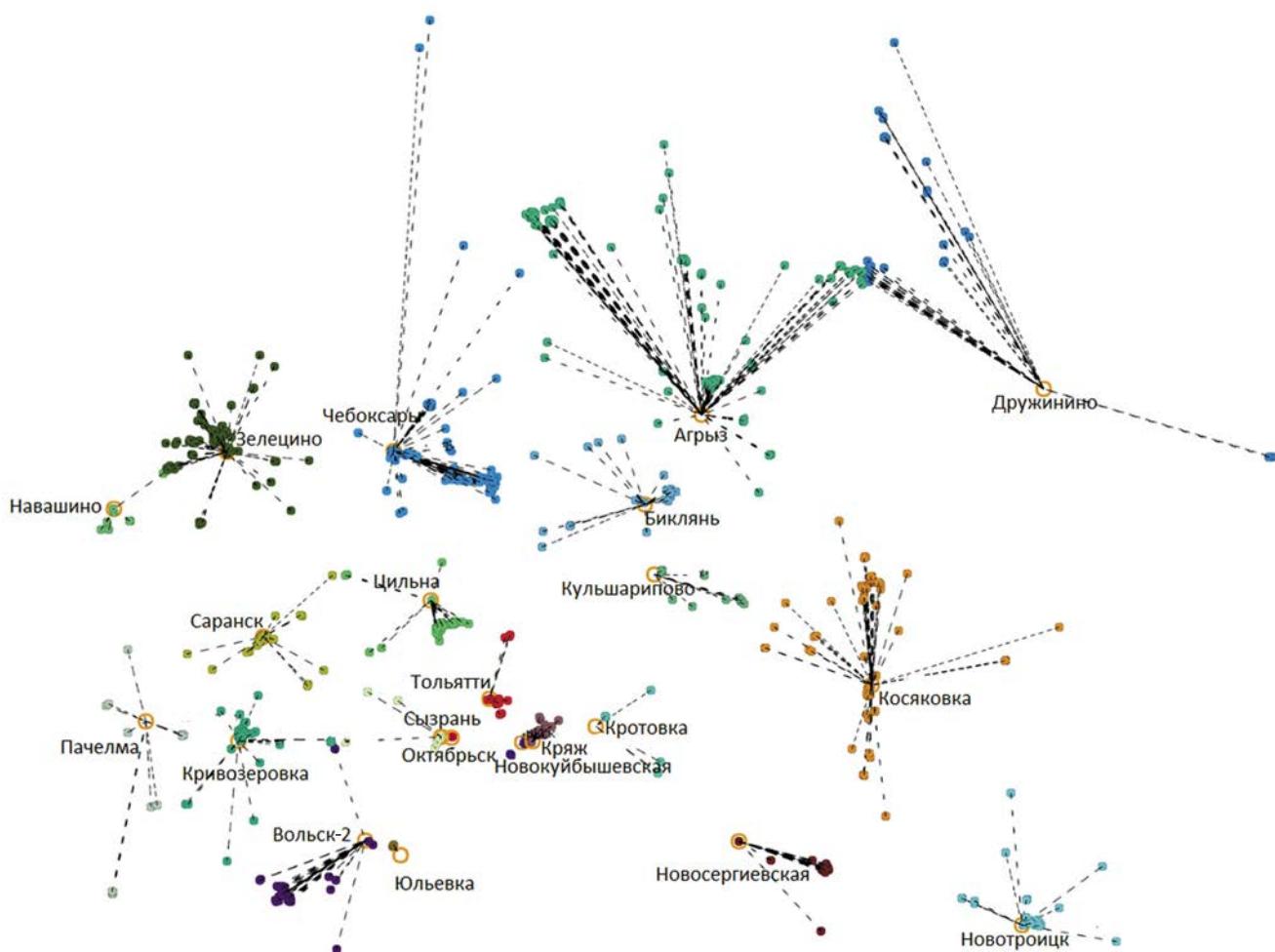


Рис. 5. Результат выполнения программы в режиме кластеризации с проекцией и критерием Дэвиса — Болдина

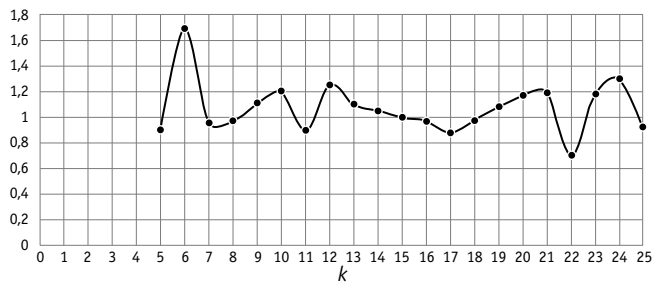


Рис. 6. График зависимости индекса Дэвиса — Болдина от количества кластеров

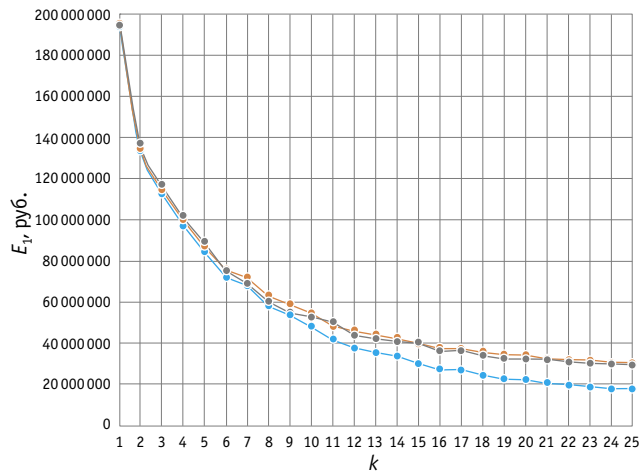


Рис. 7. График зависимости затрат на перевозку от количества кластеров k :
— ALG1; — ALG2; — ALG3

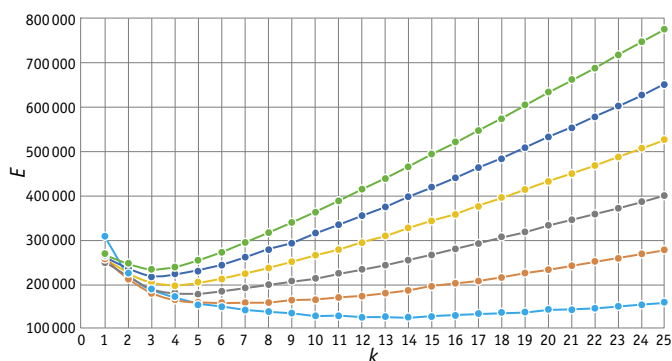


Рис. 8. Графики зависимости общих затрат от k при различных c (алгоритм 1):

— $c = 5000$; — $c = 10000$; — $c = 15000$;
 — $c = 20000$; — $c = 25000$; — $c = 30000$

Из графика видно, что оптимальный вариант будет таким:

- для $c = 5000$ — 14 кластеров;
- для $c = 10000$ — 6 кластеров;
- для $c = 15000$ — 5 кластеров;
- для $c = 20000$ — 4 кластера;
- для $c = 25000$ — 2 кластера;
- для $c = 30000$ — 2 кластера.

Результаты работы нового алгоритма k-means pro (алгоритм 3) для ПФО в виде графика зависимости общих затрат от k при различных c представлены на рис. 9.

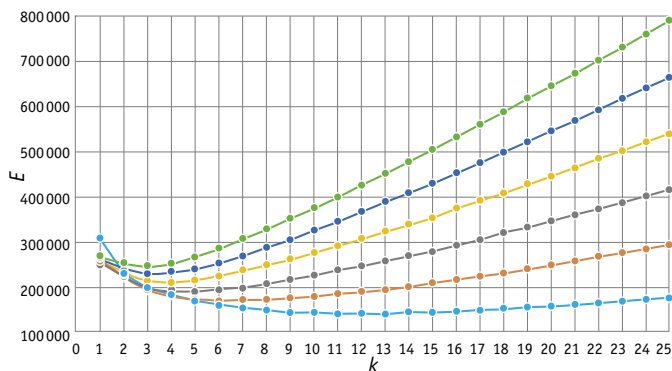


Рис. 9. Графики зависимости общих затрат от k при различных c (алгоритм 3):

— $c = 5000$; — $c = 10000$; — $c = 15000$;
 — $c = 20000$; — $c = 25000$; — $c = 30000$

Оптимальный вариант:

- для $c = 5000$ — 11 кластеров;
- для $c = 10000$ — 6 кластеров;
- для $c = 15000$ — 5 кластеров;
- для $c = 20000$ — 4 кластера;
- для $c = 25000$ — 2 кластера;
- для $c = 30000$ — 2 кластера.

В нашем случае центры кластеров обязательно должны находиться на железнодорожной линии, и это является ограничением для самого процесса кластеризации. Алгоритм k-means pro каждый раз проектирует центры кластеров на железнодорожную станцию. В результате получаем вариант кластеризации с проекцией и, очевидно, с другим значением критерия $E_{\text{пр}}$, определяемым величиной $D_{\text{пр}}$.

Для классического алгоритма k-means:

$$D = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} d(x_{ij}, e_i),$$

$$d(x_{ij}, e_i) = \sqrt{(x_{ij1} - e_{i1})^2 + (x_{ij2} - e_{i2})^2}. \quad (10)$$

Для k-means pro:

$$D_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} d(x_{ij}, c_i^*),$$

$$d(x_{ij}, c_i^*) = \sqrt{(x_{ij1} - c_{i1}^*)^2 + (x_{ij2} - c_{i2}^*)^2}. \quad (11)$$

Назовем дефектом проекции разницу критериальных величин качества свободной кластеризации и кластеризации с проекцией, т. е. $\Delta = E_{\text{пр}} - E_1$. Зависимость Δ/E_1 от k для производств ПФО представлена на рис. 10, из которого видно, что при значительном увеличении числа КП растет дефект проекции. Следовательно, в некоторых случаях, когда разница достигает 30–40 %, возможно, выгоднее строить КП, т. е. создавать новую инфраструктуру, а не размещать их на существующей инфраструктуре.

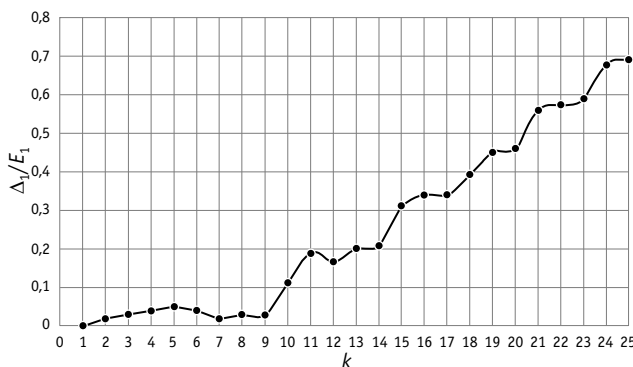


Рис. 10. Зависимость Δ/E_1 от k для производств ПФО

Для оптимизации мест размещения КНРЦ с использованием алгоритмов кластеризации была разработана следующая математическая модель.

Пусть заданы координаты и параметры железнодорожных станций (их номера $l = 1, 2, \dots, L$) и уже найдены k номеров станций из L , в которых будут КП. Необходимо найти r номеров станций, в которых будут располагаться КНРЦ.

На первом этапе будем считать, что кандидатами на размещение КНРЦ могут быть любые станции из общего списка. Представим эту задачу как задачу нахождения центров кластеров станций-КП. Решение выполняется на основе рассмотренного алгоритма *k-means pro*. При этом можно получить не только оптимальный вариант по критерию затрат на перевозку грузов от всех КП до своих КНРЦ, но и некоторое количество подоптимальных вариантов, имеющих очень близкие критерияльные значения.

На втором этапе рассмотрим свойства точек-станций и дополнительные критерии оптимальности кластеризации. То есть точка-станция имеет q координат, которые определяют ее свойства по отношению к тому, насколько данная точка удовлетворяет целям создания в ней КНРЦ. Первые две координаты — это координаты местности в плоской системе координат (x, y) . Далее идут компоненты вектора координат, количественно измеряющие девять критериев создания КНРЦ.

Каждая компонента должна быть выражена в условных единицах, сопоставимых с другими координатами. Для этого значения критериев z_1, \dots, z_9 необходимо преобразовать в безразмерные величины. Нами использован наиболее распространенный способ нормировки z в виде

$$z_{\text{норм}} = \frac{z - \bar{z}}{\sigma_z}, \quad (12)$$

где \bar{z} — среднее значение;

σ_z — среднеквадратическое отклонение величин z .

Итак, в результате решения задачи кластеризации первого уровня определяются КП. Каждая такая точка-КП помимо координат характеризуется «весом», который определяется объемом перерабатываемых контейнеров.

Далее находятся станции для КНРЦ как центры кластеров для точек-КП из условия, что КНРЦ должны быть центрами некоторых кластеров. Разбиение на кластеры в этом случае должно быть таким, чтобы с учетом объемов КП получались как можно более компактные в координатах (x, y) кластеры, а их центры как можно дальше были друг от друга. Таким образом, кластеризуемыми признаками являются лишь координаты (x, y) , а все остальные признаки будут дополнительными. С учетом объемов, как показано выше, это приводит к минимизации общих затрат на перевозку грузов от КП до КНРЦ. Все остальные критерии z_1, \dots, z_9 являются при кластеризации дополнительными и действуют как ограничения на выбор точек-КНРЦ.

На уровне предварительного проектирования мест расположения КНРЦ возможно два варианта постановки задачи.

1. При имеющихся средствах A построить $r = A/C$ КНРЦ в местах, оптимизирующих интегральный показатель эффективности B , где C — средняя стоимость КНРЦ.

2. Построить оптимальное количество КНРЦ, оптимизирующих интегральный показатель эффективности B с учетом затрат на создание сети КНРЦ. Эти затраты будут $r \cdot C$.

Для учета всех свойств точек-станций необходимо обеспечить выполнение главного правила — чем большие значения имеют компоненты координат z_1, \dots, z_9 у точек-станций, тем более целесообразно выбирать центр-КНРЦ в этой точке-станции. Строго говоря, осуществление такого правила в общем случае противоречиво, поскольку точка может быть лучше по одному критерию и хуже по другому. Если считать все компоненты z_1, \dots, z_9 независимыми, то решением задачи может быть лишь выделение из всех точек, кандидатов КНРЦ, множества Парето — безусловно несравнимых вариантов, оставшихся после отсеивания безусловно худших вариантов.

Рассмотрим итоговые результаты эскизного проектирования двухуровневой сети КП и КНРЦ ПФО: количество КП и КНРЦ не задано, а находится из условия оптимизации всего проекта создания двухуровневой сети. В расчетах условно принято $c = 2$ млрд руб., $C = 5$ млрд руб. Для этих заданных величин путем многократных просчетов получены пять вариантов сетей КП с $k = 13, k = 14, k = 15, k = 16, k = 17$. Оптимальное количество k , удовлетворяющее сумме минимальных затрат на перевозку до КП и затрат на создание КП, составляет $k = 15$. Далее для каждого из пяти вариантов построены оптимальные варианты сетей КНРЦ с $K = 2, K = 3, K = 4$. Оптимальным K , минимизирующим суммарные затраты на перевозки от КП до КНРЦ и на создание КНРЦ, будет $K = 3$.

После получения данных о соответствующих затратах для пяти вариантов расположения КП и трех вариантов размещения КНРЦ было рассмотрено 15 комбинаций структур двухуровневой сети и найдена оптимальная структура: 14 КП и 2 КНРЦ. На рис. 11 приведен вариант размещения КП и КНРЦ на территории ПФО при заданных значениях.

Таким образом, приведенные модели, алгоритмы и методики показывают возможность и порядок расчетов различных вариантов постановок задач и свою практическую направленность. Опираясь на эти возможности, лица, принимающие решения, могут количественно оценить оптимальные и подоптимальные решения в конкретных условиях при оптимизации числа терминальных объектов и мест их размещения.



1. Rezer S. M., Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E. Optimizatsiya modeli formirovaniya i funktsionirovaniya konteynernno-transportnoy sistemy strany [Optimization of formation and functioning of container transportation system of the country] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2016. № 7. S. 3–7. ISSN 0236-1914.
2. Moskvichev O. V. O novom podkhode k organizatsii konteynernykh poezdov vo vnutrennem soobshchenii [On the new approach to the organization of container trains in inland traffic] // Zheleznodorozhnyy transport. 2014. № 2. S. 56–59. ISSN 0044-4448.
3. Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E., Nikonov Yu. S. K voprosu konsolidatsii i dostavki odinochnykh i gruppovykh konteynernykh отправок в составе контейнерных поездов [Regarding the issue of consolidation and delivery of single and group container shipments in container trains] // Transport Urala. 2014. № 2 (41). S. 15–18. ISSN 1815-9400.
4. Razrabotka i issledovanie algoritma klasterizatsii s proektsiei dlya resheniya zadach optimizatsii transportnoy infrastruktury [Development and investigation of a clustering algorithm with a projection for solving the problems of optimization of transport infrastructure] / B. A. Esipov, O. V. Moskvichev, N. S. Skladnev, A. O. Aleshintsev // Perspektivnye informatsionnye tekhnologii : tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Samara : Izd-vo Samar. nauch. tsentra RAN, 2017. S. 633–637.
5. Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti [Classification and reduction of dimension] / S. A. Ayvazyan, V. M. Buhshtaber, I. S. Enyukov, L. D. Meshalkin. M. : Finansy i statistika, 1989. 607 s.
6. Mirkin B. G. Metody klaster-analiza dlya podderzhki prinyatiya resheniy [Cluster-analysis methods for decision support]. M. : Izd. dom Nats. issled. un-ta «Vyssh. shk. ekonomiki», 2011. 88 s.
7. Dragan D. D. Issledovanie algoritmov i metodov intellektualnoy podderzhki prinyatiya resheniy [Research of algorithms and methods of intellectual support of decision-making]. [Electronic resource]. URL: http://cad.kpi.ua/attachments/diplomas/presentations/2011_B_05_Dragan.pdf (access date: 15.12.2016).

УДК 656.21.001.2

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

Андрей Александрович Гордиенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Ирина Сергеевна Плахотич, ассистент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА ПО СПУСКНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ПРОХОДА ТОРМОЗНЫХ ПОЗИЦИЙ

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

Andrey Alexandrovich Gordienko, PhD in Engineering, Associate Professor, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Irina Sergeyevna Plakhovich, Assistant Lecturer, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Results of investigations of car movement parameters on the lowering part of sorting hump in different walk-through modes of brake positions

Аннотация

В статье представлены результаты вычислений линейных ускорений, времени движения и скорости скатывания вагона на элементах спускной части сортировочной горки с учетом сопротивлений различного рода (среды, стрелок, кривых, снега и инея). Построены графические зависимости этих параметров от длины спускной части горки в одном из режимов прохода вагоном тормозных позиций. Установлено, что при учете воздействия сопротивлений различного рода скорость соударения вагона «с группой стоящих вагонов» (11,3 км/ч) более чем в 2 раза превышает допустимую (5 км/ч). Соответственно это приводит к необходимости проектировать более мощные тормозные позиции и корректировать применяемые режимы торможения.

Ключевые слова: железная дорога, станция, сортировочная горка, вагон, попутный ветер, режим прохода тормозных позиций, исследования в графическом виде, анализ результатов исследований.

Summary

The article presents the results of calculations of linear accelerations, travel time and rolling speed of the car on the elements of the downhill section of the sorting hump taking into account the resistances of various kinds (environment, arrows, curves, snow and frost). Graphic dependencies of these parameters on the length of the downhill part of the slide in one of the modes of passage of the brake car are constructed. It is established that when the impact of various types of resistance is taken into account, the collision speed of the car «with a group of standing cars» (11.3 km/h) exceeds the permissible (5 km/h) by more than 2 times. Accordingly, this leads to the need to design more powerful braking positions and adjust the applied braking modes.

Keywords: railway, station, sorting hump, car, tailwind, braking positions, research in a graphic form, analysis of research results.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-28-31

Настоящая статья продолжает серию публикаций, посвященных динамике скатывания вагона по спускной части сортировочной горки [1–6].

В [2, 3] в табличном и графическом виде представлены результаты ранее выполненных исследований движения вагона по спускной части сортировочной горки от ее вершины до расчетной точки при воздействии попутного ветра малой величины. Приведены графические зависимости ускорения, времени движения и скорости скатывания вагона на всех участках спускной части сортировочной горки, рассмотрен случай, когда вагон вначале проходит длину колесной базы (КБ) на тормозной позиции, затем тормозит в зоне торможения (ЗТ), а далее проходит оставшиеся участки тормозных позиций (ОТ). В результате было установлено, что при учете воздействия сопротивлений различного рода скорость соударения вагона «с группой стоящих вагонов» (12,4 км/ч) более чем в 2 раза превышает допустимую (5 км/ч).

Кроме того, рассматривалось, что на каждом участке сортировочной горки вагон скатывается с разными по величине линейными ускорениями a_k (k — номера участков горки), временем движения t_k и скоростью скатывания $v_{ek}(t_k)$, вычисленными в среде Mathcad [7]. При этом скорость скатывания вагона в конце каждого участка v_{ek} принималась в качестве начальной для последующего участка v_{0k} [1–3].

Тем не менее до сих пор не исследовано движение вагона по спускной части сортировочной горки в случае срабатывания вагонного замедлителя при входе вагона (первой колесной пары) на участок тормозных позиций при воздействии по-

путного ветра. Для такого случая не приведены графические зависимости линейного ускорения $a_k(l_j)$, времени движения $t_k(l_j)$ и скорости скатывания вагона $v_{ek}(l_j)$ по длине спускной части горки l_j (j — длина каждого участка горки, соответствующая номеру исследуемого участка k).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнить результаты исследований движения вагона по спускной части горки при различных режимах прохода тормозных позиций, таких как вход вагона на участок колесной базы с последующим срабатыванием вагонных замедлителей [2, 3] и включение вагонных замедлителей при входе на них первой колесной пары вагона.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо результаты исследований движения вагона по спускной части горки в случае срабатывания вагонного замедлителя при входе на него первой колесной пары привести в виде (аналогично [3]), удобном для построения графических зависимостей линейных ускорений $a_k(l_j)$, времени движения $t_k(l_j)$ и скорости скатывания вагона $v_{ek}(l_j)$ по длине спускной части сортировочной горки l_j при воздействии проекции силы попутного ветра на торцевую сторону вагона $F_{\text{рвх}}$ с учетом силы сопротивлений всякого рода (от среды, стрелок, кривых, снега и инея) F_c .

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА ПО СПУСКНОЙ ЧАСТИ ГОРКИ В СЛУЧАЕ СРАБАТЫВАНИЯ ВАГОННОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ ПРИ ВХОДЕ НА НЕГО ПЕРВОЙ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ

В отличие от [3] длину каждого участка l_j спускной части сортировочной горки и время прохождения вагоном t_k этих участков представим с учетом длины l_{j-1} каждого предыдущего участка и с учетом времени движения вагона t_{k-1} по каждому предыдущему участку (табл. 1).

Все расчеты приведены для типового профиля спускной части сортировочной горки, оборудованной механизированной парковой тормозной позицией.

В табл. 1, как и в [2, 3], обозначено: ВГ — вершина горки; СК1 и СК2 — первый и второй скоростные участки горки; 1ТП, 2ТП и 3ТП — первая, вторая и третья тормозные позиции горки; ПР — промежуточный участок горки; СЗ — стрелочная зона горки; СП1 и СП2 — первый и второй участки сортировочного пути; С — разделительный стрелочный перевод (стрелка); С1, С2 и С3 — первая, вторая и третья стрелки; ЗТ — зона торможения вагона; ОТ — оставшиеся участки тормозных позиций. В отличие от [2, 3] в рассматриваемом случае, как только вагон входит на участок тормозных позиций, срабатывает вагонный замедлитель (ЗТ). Таким образом, отсутствует участок, учитывающий длину колесной базы (КБ).

Таблица 1

Кинематические параметры движения вагона по профилю сортировочной горки

Участки спускной части горки	Элементы участков спускной части горки	l , м	a_1 , м/с ²	t_1 , с	v_1	
					м/с	км/ч
1	2	3	4	5	6	7
—	ВГ	0	0	0	1,7	8,865
СК1	СК1	39,95	0,519	9,558	6,659	24,0
СК2	До С	54,957	0,323	11,7	7,351	26,5
	После С	74,59	0,2	14,281	7,866	28,3
1ТП	ЗТ	84,58	−2,027	15,881	4,622	16,6
	ОТ	104,59	0,166	19,918	5,292	19,0
ПР	До С	124,591	0,136	23,53	5,785	20,8
	После С	146,862	0,13	27,22	6,267	22,6
2ТП	ЗТ	154,244	−2,067	28,82	2,96	10,6
	ОТ	178,862	0,127	36,025	3,873	14,0
СЗ	До С1	194,862	0,048	40,055	4,067	14,6
	С1	220,552	0,041	46,181	4,32	15,6
	С2	241,552	0,041	50,935	4,514	16,3
	С3	265,552	0,041	56,128	4,728	17,0
СП1	СП1	325,732	0,044	68,185	5,254	18,9
3ТП	ЗТ	330,489	−2,15	69,285	2,674	9,6
	ОТ	341,232	−0,026	73,383	2,569	9,3
СП2	СП2	391,232	0,034	90,114	3,145	11,3

Кроме того, в табл. 1, как и в [2, 3], a_l , t_l и v_l — это ускорение, время движения и скорость скатывания вагона при воздействии проекции силы попутного ветра малой величины $F_{\text{рвх}}$ и учете силы сопротивлений всякого рода (среды, стрелок, кривых, снега и инея) F_c . В табл. 1 значение $v_l = 1,7$ м/с, или 8,87 км/ч, — это скорость надвига вагона на ВГ (или начальная скорость вагона) в случае проектирования горочной горловины на 24 пути [8]. Рассматриваются горки повышенной и большой мощности (ГПМ и ГБМ).

Используя данные третьего и четвертого столбцов табл. 1, переходим к построению графической зависимости изменения ускорения вагона a_k по длине l_j спускной части сортировочной горки при воздействии силы попутного ветра малой величины $F_{\text{рвх}}$ с учетом силы сопротивлений всякого рода F_c (рис. 1).

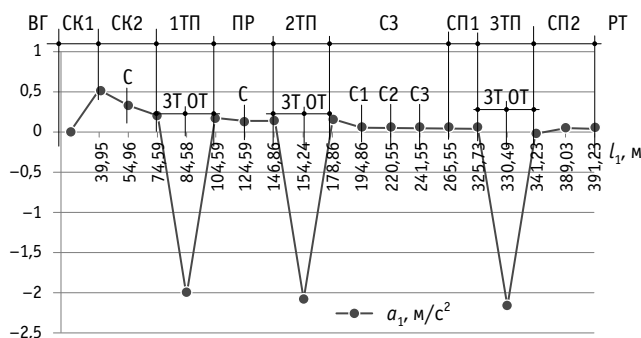


Рис. 1. Графические изменения ускорения вагона по длине спускной части сортировочной горки с учетом силы сопротивлений всякого рода F_c

Обозначения на рис. 1 такие же, как в табл. 1. Отличием данных рис. 1 от данных, приведенных в [2, 3], является отсутствие участка, учитывающего колесную базу вагона (КБ). Однако, как и в [2, 3], в зонах торможения вагон движется равнозамедленно, например на участках 1ТП, 2ТП, ЗТП, где линейные ускорения имеют отрицательные значения.

Аналогично зависимости $a_k = f(l_j)$, используя данные третьего и пятого, а также третьего, шестого и седьмого столбцов табл. 1, построим графические зависимости $t_k = f(l_j)$ (рис. 2) и $v_k = f(l_j)$ (рис. 3).

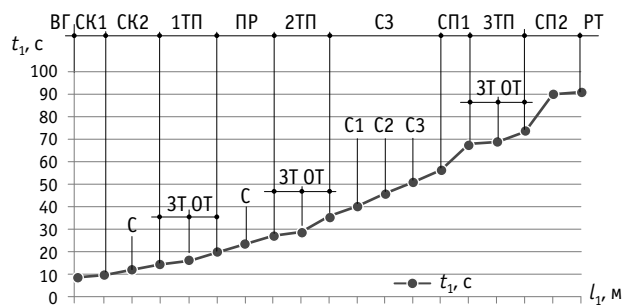


Рис. 2. Графические изменения времени движения вагона по длине спускной части сортировочной горки с учетом силы сопротивлений всякого рода F_c

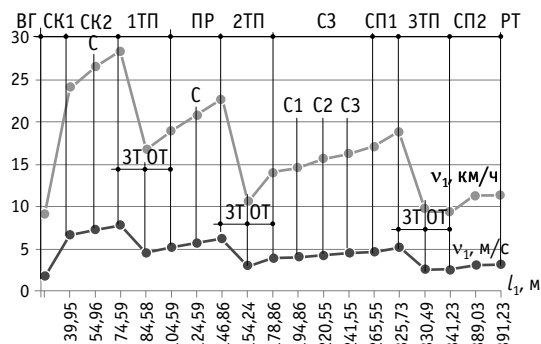


Рис. 3. Графические изменения скорости скатывания вагона по длине спускной части сортировочной горки с учетом силы сопротивлений всякого рода F_c

Обозначения на рис. 2 и 3 те же, что в табл. 1. Еще раз отметим отсутствие участков КБ. На рис. 2 и 3 аналогично [2, 3] в зонах торможения происходит снижение скорости скольжения вагона, например на участках 1ТП, 2ТП, ЗТП, где линейные ускорения имеют отрицательные значения (см. рис. 1), причем в расчетной точке (РТ) скорость принимает значение 11,3 км/ч.

Подробно анализируем второй участок сортировочного пути (СП2) длиной $l_0 = 50,0$ м (в табл. 1 было бы 391,232 м), где уклон горки $\psi_{09} = 0,0006$ рад (0,6 ‰). Скорость входа вагона на данный участок $v_{09} = 2,569$ м/с. Этот участок горки вагон проходит за время $t_0 = 17,428$ с (в табл. 1 было бы 90,811 с). При этом ускорение и скорость вагона равны $a_0 = 0,034$ м/с² и $v_0 = 3,169$ м/с (или 11,3 км/ч). Как видно, скорость соударения вагона «с группой стоящих вагонов» (11,3 км/ч) более чем в 2 раза превышает допустимую (5 км/ч) [9]. Отсюда ясно, что в сортировочном парке происходит «жесткое» соударение вагона «с группой стоящих вагонов».

ВЫВОДЫ

1. Анализ представленных графических зависимостей времени движения и скорости скатывания вагона на различных участках сортировочной горки в рассматриваемом случае позволил отметить, что при воздействии на груженный вагон проекции силы попутного ветра малой величины $F_{\text{рвх}}$ с учетом силы сопротивлений всякого рода (среды, стрелок, кривых, снега и инея) F_c скорость соударения вагона «с группой стоящих вагонов» (как и в [2, 3]) более чем в 2 раза (11,3 км/ч) превышает допустимую (5 км/ч) [9]. То есть (как и в [2, 3]) в сортировочном парке происходит «жесткое» соударение вагона «с группой стоящих вагонов», что недопустимо. Такое положение приводит к необходимости проектирования более мощных тормозных позиций, увеличению количества вагонных замедлителей или корректировке применяемых режимов торможения.

2. Сравнение кинематических параметров движения вагона при различных режимах прохода им тормозных позиций сортировочной горки показывает, что рассматриваемый случай включения вагонных замедлителей при входе на них первой колесной пары позволяет незначительно снизить скорость соударения «с группой стоящих вагонов». В двух рассматриваемых вариантах прохода будет происходить «жесткое» соударение вагона в сортировочном парке «с группой стоящих вагонов».

Литература

1. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Анализ представленных в табличном виде результатов исследований движения вагона по спускной части сортировочной горки при встречном ветре // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 14–19. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-14-19. ISSN 1815-9400.
2. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Результаты исследований движения вагона по спускной части сортировочной горки при попутном ветре // Бюллетень транспортной информации. 2016. № 12 (258). С. 31–36. ISSN 2072-8115.
3. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Графическое представление результатов исследований движения вагона по спускной части сортировочной горки при попутном ветре // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 3. С. 7–12. ISSN 0236-1914.
4. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Математическое описание движения вагона с торможением на участке первой тормозной позиции сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 10–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-10-15. ISSN 1815-9400.
5. Ситников С. А., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Уточненный пример расчета времени и скорости движения вагона на участке колесной базы первой тормозной позиции сортировочной горки при воздействии попутного ветра // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 75–80. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-75-80. ISSN 1815-9400.
6. Тимухина Е. Н., Гордиенко А. А. Исследование технологических и экономических последствий от отцепок вагонов для устранения коммерческих неисправностей // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 23–31. ISSN 1815-9400.
7. Кирьянов Д. В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. СПб. : БХВ-Петербург, 2012. 432 с.
8. Земблинов С. В., Страковский И. И. Альбом схем элементов станций и узлов. М. : Всесоюз. изд.-полигр. об-ние МПС, 1963. 89 с.
9. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. М. : ТЕХИНФОРМ, 2003. 168 с.

References

1. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Analiz predstavlenykh v tablitsnom vide rezultatov issledovaniy dvizheniya vagona po spusknoy chasti sortirovochnoy gorki pri vstrechnom vetre [The analysis of research results on car movement on the drain section of the gravity hump when exposed to headwind presented in tabular form] // Transport Urala. 2016. № 3 (50). S. 14–19. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-14-19. ISSN 1815-9400.
2. Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Plakhovich I. S. Rezultaty issledovaniy dvizheniya vagona po spusknoy chasti sortirovochnoy gorki pri poputnom vetre [The results of researches of car movement on the incline part of a marshalling hump under the fair wind] // Byulleten transportnoy informatsii. 2016. № 12 (258). S. 31–36. ISSN 2072-8115.
3. Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Plakhovich I. S. Graficheskoe predstavlenie rezultatov issledovaniy dvizheniya vagona po spusknoy chasti sortirovochnoy gorki pri poputnom vetre [Graphical presentation of researches results of car's management on the incline part of the marshalling hump with fair wind] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2017. № 3. S. 7–12. ISSN 0236-1914.
4. Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Plakhovich I. S. Matematicheskoe opisanie dvizheniya vagona s tormozheniem na uchastke pervoy tormoznoy pozitsii sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloy velichiny [Mathematical description of car movement with braking on the first portion of gravity hump at light tailwind] // Transport Urala. 2015. № 4 (47). S. 10–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-10-15. ISSN 1815-9400.
5. Sitnikov S. A., Gordienko A. A., Plakhovich I. S. Utochnennyy primer rascheta vremeni i skorosti dvizheniya vagona na uchastke kolesnoy bazy pervoy tormoznoy pozitsii sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra [Adjusted example of calculating time and speed of railway car movement on the section of wheelbase of the first retarder position of the hump yard under the influence of favourable wind] // Transport Urala. 2016. № 2 (49). S. 75–80. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-75-80. ISSN 1815-9400.
6. Timukhina E. N., Gordienko A. A. Issledovanie tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh posledstviy ot ottsepok vagonov dlya ustraneniya kommercheskikh neispravnostey [Study of process and economic effects of car uncoupling for elimination of commercial faults] // Transport Urala. 2015. № 3 (46). S. 23–31. ISSN 1815-9400.
7. Kiryanov D. V. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. SPb. : BKhV-Peterburg, 2012. 432 s.
8. Zemblinov S. V., Strakovskiy I. I. Albom skhem elementov stantsiy i uzlov [Album of diagrams of station and junction elements]. M. : Vsesoyuz. izd.-poligr. ob-nie MPS, 1963. 89 s.
9. 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.

УДК 656.222.6

Андрей Владимирович Малахов, заместитель начальника службы движения Свердловской дирекции управления движением — структурного подразделения Центральной дирекции управления движением — филиала ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия,

Вадим Юрьевич Пермикин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Эдуард Викторович Васильев, магистрант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СТЫКОВЫХ СТАНЦИЙ И СМЕЖНЫХ УЧАСТКОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Andrey Vladimirovich Malakhov, Deputy Head of the Movement Service of the Sverdlovsk Directorate for Traffic Management — a structural unit of the Central Directorate for Traffic Management — a branch of JSC Russian Railways, Ekaterinburg, Russia,

Vadim Yuriyevich Permikin, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Eduard Viktorovich Vasilyev, graduate student, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Improvement of efficiency of work of butt-joint stations and contiguous section in operation in the traffic movement of locomotive of double supply

Аннотация

Рассмотрена действующая организация эксплуатационной работы на железных дорогах, включающих в себя направления, электрифицированные на постоянном и однофазном переменном токе, в местах стыкования таких участков в масштабах укрупненных полигонов. Дана оценка негативного влияния железнодорожных станций стыкования участков, электрифицированных системами тягового электроснабжения с различным родом тока в контактной сети, на продвижение вагонопотоков.

Предложен метод организации движения тяжеловесных грузовых поездов на полигонах с разными видами тяги, позволяющий постепенно вводить в эксплуатацию двухсистемные электровозы, способные работать на постоянном и переменном токе.

Ключевые слова: эксплуатационная работа, полигонные технологии, станции стыкования, электровозы двойного питания, тяжеловесное движение.

Summary

The operating organization of operational work on railways, including directions electrified on a direct constant and single-phase alternating current, in the places of joining such areas in scales of enlarged polygons is considered. The estimation of the negative influence of railway stations connecting areas electrified by traction power supply systems with a different kind of current in the contact network, on the promotion of car traffic volume is given.

A method for organizing the movement of heavy freight trains on landfills with different types of traction is proposed, which allows the gradual commissioning of two-system electric locomotives capable of operating on a direct constant and alternating current.

Keywords: operational work, landfill technologies, butt-joint stations, double-feed locomotives, heavyweight traffic.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-32-36

На современном этапе развитие вертикали управления движением на сети ОАО «РЖД» осуществляется путем перехода от региональных принципов организации эксплуатационной работы к полигонным.

Один из важнейших недостатков признанных неэффективными региональных технологий управления движением — это географические ограничения в масштабах одной железной дороги. Сегодня ОАО «РЖД» объединяет 16 железных дорог — территориальных филиалов компании. При таком значительном их количестве возникает большое число «точек соприкосновения» — междорожных стыковых станций. Стремясь к выполнению качественных и объемных показателей работы, региональные дирекции управления движением зачастую сдерживали вагонопотоки на соседних дорогах, осложняя поездную обстановку.

В свою очередь, сквозные полигонные технологии управления эксплуатационной работой позволяют улучшить показатели деятельности укрупненных полигонов, снизить количество стыковых пунктов (одни междорожные стыковые станции перестают создавать барьеры в продвижении вагонопотоков, соединяя участки соседних железных дорог, объединенных в полигон, другие становятся межполигонными стыками), усовершенствовать тяговые плечи локомотивов и локомотивных бригад, унифицировать нормы веса и длины грузовых поездов, а в конечном счете сократить эксплуатационные расходы компании и повысить эффективность ее работы.

В основу идеологии полигонных технологий положены собственно полигоны — важнейшие грузовые направления. Полигон — часть железнодорожной сети, характеризующаяся едиными унифицированными техническими или технологическими признаками, определяющими условия эксплуатационной работы железных дорог. Полигоны различают по стандартам: длин приемо-отправочных станционных путей; обращения длинно-составных и тяжеловесных поездов; эксплуатации локомотивов по видам тяги поездов в соответствии с действующей системой тягового электроснабжения; скоростного и высокоскоростного пассажирского движения и т. д. Наиболее выражены очертания границ полигонов на железнодорожных станциях стыкования различных систем электрической тяги.

В настоящее время свыше 80 % всей перевозочной работы сети выполняется на электротяге. С позиции тягового обслуживания сеть железных дорог представляет собой систему с тремя основными стандартами: тягой постоянного тока напряжением 3 кВ, тягой однофазного переменного тока напряжением 25 кВ с частотой 50 Гц, а также автономной (тепловозной) тягой. Такое разнообразие стандартов приводит к затруднениям в организации перевозок, росту эксплуатационных расходов, снижению эффективности работы всего железнодорожного комплекса в целом.

Для соединения участков железных дорог, электрифицированных постоянным и переменным током, широкое применение получили станции стыкования. На сети дорог функционируют 27 таких станций: Адлер (для скоростных поездов на Красную Поляну), Артышта-2, Бабаево, Балезино, Белореченская, Вековка, Владимир, Вязьма, Горячий Ключ, Данилов, Дербент, Дружинино, Инзер, Иртышское, Карталы-1, Мариинск, Междуреченск, Пенза-1, Пенза-3, Пресногорьковская, Рыбное, Рязань-2, Свирь, Сухиничи-Главные, Сызрань-1 (Южный Парк), Узуново, Черепаново. Большинство из них по характеру работы — это участковые станции, главное назначение которых — смена локомотивов и локомотивных бригад одного вида тяги на другой.

Наличие станций стыкования на маршрутах следования поездов имеет ряд существенных недостатков. В среднем на смену электровоза в грузовом движении затрачивается не менее 1 ч с учетом времени на закрепление и раскрепление состава, маневровую работу на размен локомотивов и выполнение обязательного полного опробования тормозов. В элемент простоя на станциях стыкования могут входить также и непроизводительные потери, такие как время ожидания электровоза нужного рода тока, нитки графика, особенно на участках с интенсивным движением пассажирских поездов, и др. Все это негативно влияет на скорость движения поездов, т. е. на один из важнейших качественных показателей работы. В частности, из-за простоя на станции стыкования маршрутная скорость движения следующих через нее поездов снижается на 40–80 км/сут и более.

Развитие тяжеловесного и длинносоставного движения приводит к непарности, когда размеры движения одного (четного или нечетного) направления превосходят размеры движения другого. В этом случае на станциях стыкования возникает дефицит тяги одной системы и избыток противополож-

ной, что вызывает сбои в эксплуатационной работе, которые проявляются в задержках поездов «дефицитного» направления на подходах к станции. Стабилизация эксплуатационной обстановки достигается путем регулировки парка электровозов — осуществляется подсыл дефицитной тяги на станцию стыкования с поездами или резервом, чтобы вывезти составы и освободить емкости в приемо-отправочных парках для последующего приема задержанного поездопотока. Электровозы другой системы скапливаются на станции стыкования в ожидании работы, что ведет к завышению их простоя и снижает производительность. В этом случае, как правило, излишки парка локомотивов отправляются со стыковой станции резервом к местам зарождения вагонопотоков, где они будут более востребованы, или остаются на станции, если предвидится недостаточный для вывоза поездов подход электровозов этой же системы в будущем периоде.

Другим важнейшим показателем работы железнодорожного транспорта является срок доставки грузов. На отдельных направлениях сети неудовлетворительная работа ходов и станций стыкования, выраженная отсутствием электровозов одной из систем тяги, приводит к «бросанию» поездов — временному отставлению составов от движения на промежуточной станции с отцепкой локомотива до нормализации поездной обстановки. Наличие «брошенных» поездов на участке снижает его маневренность, пропускную способность, может привести к экономическим потерям перевозчика в случае предъявления претензий грузоотправителями и собственниками подвижного состава за просрочку в доставке грузов. Так, из-за неудовлетворительной работы станции Балезино Горьковской железной дороги (дефицит электровозов переменного тока серии ВЛ80с, а также значительное поездообразование выходом на стык Чепца) на Свердловской железной дороге по состоянию на 06.12.2016 г. отставлено от движения 13 поездов.

Для нормализации работы железнодорожного транспорта в масштабах сети также применяют регулировочный прием перераспределения вагонопотоков с проблемного направления на параллельные ходы, что приводит к перепробегам поездов в результате движения «кружными» маршрутами, увеличивает эксплуатационные расходы перевозчика и срок доставки грузов.

В ряде случаев из-за наличия станций стыкования на пути следования вагонопотоков возникает ситуация, когда эксплуатация локомотивов и работа локомотивных бригад происходит в условиях нерациональных тяговых плеч. Многие станции стыкования в связи с потребностью в смене электровозов ограничивают по протяженности тяговые плечи, что приводит к увеличению накладного времени работы локомотивных бригад на подготовительно-заключительные операции, перерасходу электроэнергии на маневры и простоям локомотивов в «горячем» состоянии в ожидании поездов или находящихся на отдыхе локомотивных бригад. Например, потребность в смене электровозов на станции Дружинино Свердловской железной дороги ограничивает тяговое плечо постоянного тока от станции Екатеринбург-Сортировочный до 75 км, а плечо переменного тока от станции Красноуфимск — до 140 км.

Улучшить качество работы железнодорожного транспорта, снизить неизбежные потери эксплуатационного и экономического характера при организации перевозок по полигонам железных дорог, электрифицированных различными видами электротяги, позволит реализация инфраструктурных проектов — перевод одного из направлений, как правило электрифицированного постоянным током, на противоположную систему тягового электроснабжения. Например, в 1990–2000-е гг. с постоянного тока на переменный были переведены участок Слюдянка — Иркутск — Зима на Восточно-Сибирской железной дороге, Лоухи — Мурманск на Октябрьской, Саратовский и Волгоградский узлы на Приволжской, Минеральные Воды — Кисловодск на Северо-Кавказской железной дороге. Главным недостатком такого рода проектов является их дороговизна, связанная с переустройством тяговых подстанций и контактной сети, полной заменой парка тягового подвижного состава. Единственный случай перевода с переменного тока на постоянный произошел в 1989 г. на участке Ожерелье — Узуново Павелецкого направления Московской железной дороги для исключения устройства большого количества станций стыкования на коротком расстоянии.

Более эффективным методом, позволяющим ускорить поездопоток на стыках различных систем тяги, является организация движения поездов на полигоне с использованием инновационных локомотивов — современных двухсистемных электровазозов, имеющих улучшенные тяговые характеристики и способных работать как на постоянном, так и на переменном токе.

В 2015 г. на Энгельсском локомотивном заводе ООО «Первая локомотивная компания» совместно с канадской машиностроительной компанией Bombardier создан первый двухсистемный грузовой электровазоз с асинхронными тяговыми электродвигателями серии 2ЭВ120 «Князь Владимир», который был презентован в рамках V Международного железнодорожного салона «ЭКСПО 1520» на экспериментальном кольце ВНИИЖТа в Щербинке [1, 2]. В декабре 2016 г. на направлении Челябинск — Карталы — Магнитогорск Южно-Уральской железной дороги электровазоз 2ЭВ120 прошел тягово-энергетические испытания в различных погодных условиях и с поездами разного веса.

При выборе оптимального полигона для эксплуатации локомотивов серии 2ЭВ120 «Князь Владимир» необходимо учесть ряд критериев, таких как:

обеспечение полигона грузовой базой, выраженное через грузонапряженность направления (неэффективно использовать инновационные локомотивы на малодейственных участках);

прогнозируемое перспективное увеличение грузовой базы, отсутствие резервов пропускных способностей полигона, наличие узких мест, инфраструктурных ограничений;

протяженность полигона (эффективно эксплуатировать электровазоз на удлиненных плечах обслуживания);

наличие одной или нескольких станций стыкования, оказывающих существенное сдерживающее влияние в продвижении вагонопотоков;

анализ парка действующих на полигоне электровазозов постоянного и переменного тока, их плеч обслуживания (износ локомотивного парка требует его обновления);

наличие в обращении отдельных категорий грузовых поездов (ускоренных контейнерных, рефрижераторных), главным показателем следования которых является маршрутная скорость.

В качестве основного направления для эксплуатации электровазоза 2ЭВ120 предлагается полигон тяжеловесного движения Кузбасс — Центр. Ежедневно на полигоне пропускается 50–60 пар грузовых поездов с унифицированной массой поезда в нечетном направлении 6–6,3 тыс. т. С ростом добычи угля в Кузбассе и углеводородов в Западной Сибири прогнозируется существенный рост поездопотоков.

На рассматриваемом полигоне предусмотрен вариант эксплуатации электровазозов 2ЭВ120 с поездами массой 9000 т в нечетном направлении от станции формирования Алтайская до станций распыления вагонопотоков Бекасово и Орехово-Зуево, в четном направлении — следование с порожними составами длиной 100 вагонов (первый вариант, рис. 1).

В сочетании с применением инновационных полувагонов статической нагрузкой на путь 27 тс возможен вариант эксплуатации электровазозов 2ЭВ120 от углепогрузочных станций Кузбасса до станции Смоленск-Сортировочный с нечетными поездами, следующими через Белоруссию на Калининградскую железную дорогу или в морские порты Латвии и Литвы (второй вариант).

При организации массовой эксплуатации двухсистемных электровазозов предусматривается тяговое обслуживание грузовых поездов на южном ходу Горьковской железной дороги с заходом на смежные участки Московской и Свердловской магистралей (третий вариант, рис. 2). Протяженность плеча работы локомотива составит около 1800 км.

На рассматриваемых плечах тягового обслуживания грузовых поездов в маршрут входят станции стыкования систем электротяги постоянного и переменного тока. В первом случае таких станций три: Иртышское, Дружинино, Вековка, во втором случае — пять: Артышта-2, Иртышское, Дружинино, Вековка, Вязьма, в третьем случае — две: Дружинино, Вековка.

Следует отметить, что в настоящее время эксплуатируемый парк электровазозов, как правило, имеет значительный физический и моральный износ. Так, парк локомотивов переменного тока представлен электровазозами серии ВЛ80с, самый новый из которых построен в 1996 г. На железных дорогах, электрифицированных постоянным током, наряду с новыми электровазозами 2ЭС10, 2ЭС6 и 2ЭС4к эксплуатируются электровазозы серии ВЛ10 и ВЛ11, выпущенные в 1980–1990-х гг.

На участках Свердловской, Горьковской и Московской железных дорог графиком движения предусмотрено обращение ускоренных контейнерных грузовых поездов, в том числе по проекту «Транссиб за 7 суток», тяговое обеспечение которых двухсистемными грузовыми электровазозами позволит увеличить маршрутную скорость движения на 50–70 км/сут, что может создать благоприятный транзитный имидж ОАО «РЖД» среди зарубежных грузоотправителей в странах Европейского союза и Азиатско-Тихоокеанского региона.

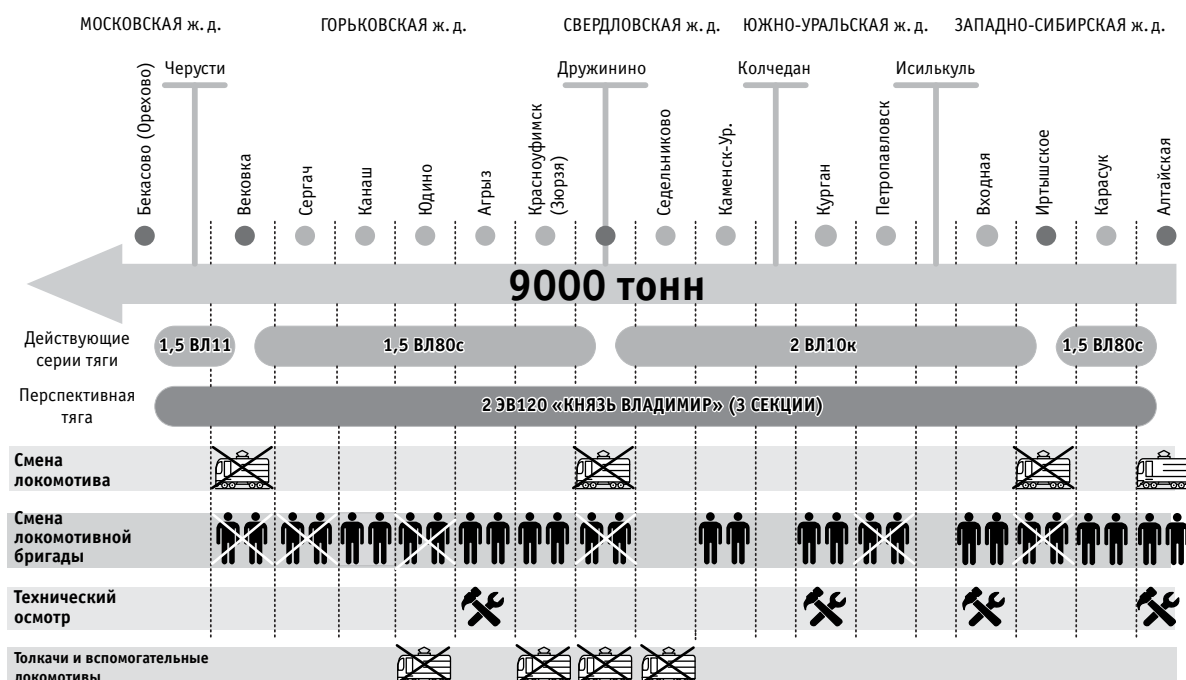


Рис. 1. Организация движения грузовых поездов повышенной массы и длины на полигоне Кузбасс — Центр электровозами двойного питания

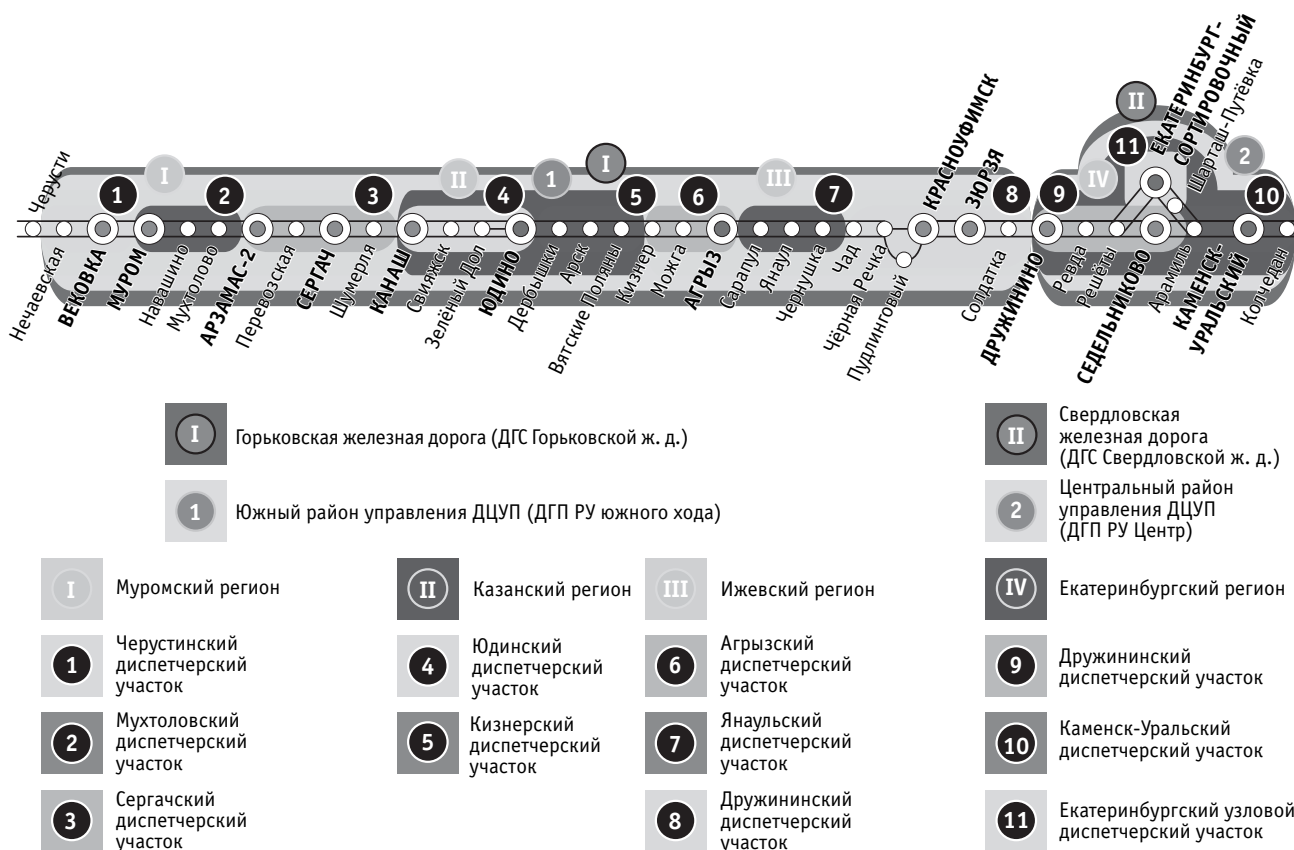


Рис. 2. Структура полигона Кузбасс — Центр в границах Свердловской и Горьковской железных дорог

Вместе с тем значительным недостатком при эксплуатации двухсистемных грузовых электровозов могут стать сложности в обслуживании. Сегодня Дирекция тяги — филиал ОАО «РЖД» эксплуатирует множество грузовых электровозов различных серий, в том числе для системы постоянного тока — 2ЭС10 «Гранит», 2ЭС6 «Синара», 2ЭС4к «Дончак», а также электровозы предыдущих поколений ВЛ10 и ВЛ11; для системы переменного тока — 2ЭС5к «Ермак», 2ЭС5 «Скиф», 2ЭС7 «Гранит» и локомотивы предыдущих поколений ВЛ80, ВЛ85. Поэтому для удобства эксплуатации необходима унификация электровоза к уже используемым на сети дорог сериям.

С вводом в эксплуатацию двухсистемных грузовых электровозов происходит процесс объединения смежных полигонов, электрифицированных постоянным и переменным током, в единый технологический комплекс, что создает устойчивые межполигонные технологические связи в организации эксплуатационной работы сети. Этот процесс может также привести к пересмотру границ действующих и формируемых полигонов, дальнейшему их укрупнению, уменьшению количества стыковых пунктов, повышению эффективности перевозочного процесса.

Таким образом, можно выделить новое понятие «межполигонные технологии в организации эксплуатационной работы», которое предполагает увязку в единый технологический

процесс нескольких (двух и более) смежных полигонов с объединением участков эксплуатации локомотивов, локомотивных бригад, тяжеловесного движения, направленных на дальнейшую унификацию норм массы и длины грузового поезда, а также на ослабление негативного влияния межполигонных стыковых пунктов.

Технологические эффекты от ввода в эксплуатацию двухсистемного электровоза как для полигона в целом, так и для станций стыкования можно оценить при помощи имитационной экспертизы. Сегодня для этого имеются все средства и возможности, а также математический аппарат решения подобных задач [3]. В частности, в 2015 г. на Свердловской железной дороге были выполнены исследования по определению возможностей станций направления Называевская — Чепца для обеспечения прогнозируемых размеров тяжеловесного движения на 2020–2025 гг. (с перспективой продолжения работы для всего полигона Кузбасс — Северо-Запад) [4–6].

В конечном счете реализация тяговых возможностей двухсистемного грузового электровоза 2ЭВ120 «Князь Владимир» на полигоне Кузбасс — Центр, а также на южном ходу Горьковской и смежных с ней Московской и Свердловской магистралах позволит повысить эффективность перевозочного процесса в масштабах сети железных дорог, пересмотреть плечи обслуживания локомотивов и локомотивных бригад.

Литература

1. Знакомьтесь: электровоз 2ЭВ120 // Локомотив. 2015. № 11 (707). С. 42–45. ISSN 0869-8147.
2. Опытные рейсы электровоза 2ЭВ120-001 // Локомотив. 2016. № 7 (715). С. 39. ISSN 0869-8147.
3. Мишарин А. С., Козлов П. А. Имитационная экспертиза проектов развития транспортной инфраструктуры // Железнодорожный транспорт. 2014. № 4. С. 52–54. ISSN 0044-4448.
4. Козлов П. А., Набойченко И. О., Пермикин В. Ю. От Кузбасса до Усть-Луги — единая модель // Железнодорожный транспорт. 2016. № 3. С. 26–29. ISSN 0044-4448.
5. Заровняев А. А., Набойченко И. О. Принципы полигонной технологии пропуска совмещенного потока поездов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 7. С. 41–43. ISSN 0044-4448.
6. Тимухина Е. Н., Пермикин В. Ю., Кашеева Н. В. Метод выявления лимитирующих железнодорожных станций для пропуска тяжеловесных поездов на полигоне дороги // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 40–44. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-40-44. ISSN 1815-9400.

References

1. Znakomtes: elektrovov 2EV120 [Meet the electric locomotive 2EV120] // Lokomotiv. 2015. № 11 (707). S. 42–45. ISSN 0869-8147.
2. Opytnye reysy elektrovova 2EV120-001 [Experimental routes of electric locomotive 2EV120-001] // Lokomotiv. 2016. № 7 (715). S. 39. ISSN 0869-8147.
3. Misharin A. S., Kozlov P. A. Imitatsionnaya ekspertiza proektov razvitiya transportnoy infrastruktury [Imitation expertise of infrastructure sites development] // Zheleznodorozhnyy transport. 2014. № 4. S. 52–54. ISSN 0044-4448.
4. Kozlov P. A., Naboychenko I. O., Permikin V. Yu. Ot Kuzbassa do Ust-Lugi — edinaya model [From Kuzbass to Ust-Luga — a unique model] // Zheleznodorozhnyy transport. 2016. № 3. S. 26–29. ISSN 0044-4448.
5. Zarovnyaev A. A., Naboychenko I. O. Printsipy poligonnoy tekhnologii propuska sovmeshchennogo potoka poezdov [Principles of the polygon technology for make way the combined flow of trains] // Zheleznodorozhnyy transport. 2016. № 7. S. 41–43. ISSN 0044-4448.
6. Timukhina E. N., Permikin V. Yu., Kasheeva N. V. Metod vyyavleniya limitiruyushchikh zheleznodorozhnykh stantsiy dlya propuska tyazhelovesnykh poezdov na poligone dorogi [The identification method of limited railway stations for passing of heavy trains on the rough road] // Transport Urala. 2017. № 1 (52). S. 40–44. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-40-44. ISSN 1815-9400.

УДК 681.518.5+656.05

Дмитрий Викторович Ефанов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Герман Владимирович Осадчий, технический директор ЗАО НТЦ «Мониторинг мостов», Санкт-Петербург, Россия,

Дмитрий Владимирович Седых, инженер ООО «Мостовое бюро», Санкт-Петербург, Россия,

Дмитрий Валерьевич Барч, начальник дорожной электротехнической лаборатории Октябрьской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД», Санкт-Петербург, Россия

ОРГАНИЗАЦИЯ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА УГЛОВ НАКЛОНА ОПОР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Dmitriy Viktorovich Efanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Automation and Telemechanics on the Railway Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

German Vladimirovich Osadchiy, Technical Director, Monitoring of Bridges CJSC NTC, St. Petersburg, Russia,

Dmitriy Vladimirovich Sedykh, Engineer, Bridge Bureau LLC, St. Petersburg, Russia,

Dmitriy Valeryevich Barch, Head of Traffic Electrical Laboratory, October Railways Infrastructure Directorate, JSC Russian Railways, St. Petersburg, Russia

Organization of health monitoring of railway catenary pillars slope angles

Аннотация

Сегодня системы непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры развиваются весьма активно. Их использование позволяет предупреждать дефекты на стадиях зарождения и организовывать обслуживание по фактическому состоянию технических объектов. В статье рассматриваются вопросы организации непрерывного мониторинга опор контактной сети (как железобетонных, так и металлических). Предложен способ непрерывного мониторинга углов наклона опор железнодорожной контактной сети, позволяющий оперативно получать данные о состоянии диагностируемых объектов. В основе способа лежит совместное использование датчиков инклинометрии и разработанной универсальной беспроводной сети передачи данных, функционирующей на нелегализуемой частоте 868,7 МГц. Кроме того, способ легко адаптируется к контролю углов наклона мачтовых светофоров, что также является актуальной задачей.

Ключевые слова: железнодорожная контактная подвеска, опоры, угол наклона, непрерывный мониторинг.

Summary

Systems of health monitoring of railway infrastructure objects are developing actively at present. Their use allows to warn defects on the stage of their incipience and organize maintenance on the actual state. In this paper authors pay attention to the problem of health monitoring of railway catenary pillars (concrete as well as metal). Authors developed the method of health monitoring of railway catenary pillars slope angles that allows to operatively get data about controlled objects. The method is based on the use of inclination sensors connected with the developed universal wireless network functioning on the unlicensed frequency 868.7 MHz. The method is easily adapted to the monitoring of signal mast slope angles that is actual too.

Keywords: railway catenary, pillars, slope angle, health monitoring.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-37-41

Разработка и внедрение в эксплуатацию средств функционального контроля и непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры позволяет сделать еще один важный шаг к совершенствованию технологии их обслуживания и тем самым к созданию высоконадежного и безопасного транспортного комплекса [1–3]. Сегодня в Российской Федерации системами непрерывного мониторинга достаточно полно оборудуются объекты железнодорожной автоматики и телемеханики [4–6]. В то же время для других объектов инфраструктуры (верхнего строения пути, мостовых сооружений, контактной подвески и пр.) используется периодический мониторинг с привлечением обслуживающего персонала. Вместе с тем отказы объектов железнодорожной инфраструктуры, в большинстве своем не имеющих 100 %-го резерва, становятся причиной продолжительных перерывов в движении поездов. Именно поэтому развитие технологий непрерывного мониторинга для фиксации предотказов технических объектов, превентивного вмешательства в их работу и обслуживания по фактическому состоянию представляется весьма актуальной задачей.

Опыт, накопленный при разработке способов непрерывного мониторинга устройств железнодорожной автоматики, а также использование методов геодезического мониторинга позволяют постепенно переходить к мониторингу технического состояния более сложных, географически распределенных объектов, таких, например, как железнодорожный путь и контактная подвеска. Первые шаги в этом направлении были сделаны в конце XX — начале XXI в. А уже в 2009 г. возникла идея технической реализации системы непрерывного мониторинга вибрационных воздействий на тросы и провода

контактной подвески. Этот проект был успешно внедрен на участке Торбино — Боровенка линии скоростного сообщения Санкт-Петербург — Москва [7–9].

Развитие технологий в области мониторинга позволило разработать технические решения по контролю усилия натяжения тросов и проводов контактной подвески, что расширило функциональность системы мониторинга контактной сети [10, 11].

Система мониторинга контактной подвески постоянно совершенствуется, используются результаты опытной эксплуатации, расширяются функциональные возможности. Гигантский шаг вперед удалось сделать после разработки универсальной сети передачи данных для систем непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры на основе радиоканала и применения собственного энергосберегающего протокола передачи [12, 13]. Появилась возможность передавать данные с удаленных объектов, что для систем мониторинга устройств инфраструктуры железных дорог в Российской Федерации было сделано впервые (исключение составляет использование стандарта сотовой связи GSM-R в системах мониторинга устройств автоматики [14]).

Очередной задачей расширения функциональных возможностей разработанной авторами системы непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры стал контроль состояния опор контактной сети (этот же подход легко транслируется при решении задачи контроля технического состояния светофорных мачт). В настоящее время предлагаемый подход не имеет аналогов на пространстве дорог ОАО «РЖД» [15–17] — известны лишь работы по периодическому контролю, основанному на ультразвуковых и виброакустических методах [18, 19].

ОПОРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Опоры контактной сети являются основными элементами подерживающих конструкций железнодорожной контактной подвески. От их технического состояния зависят качество и безопасность перевозочного процесса. При падении опор требуется больше времени для восстановления движения по участку, чем в случае других повреждений (кроме повреждений жестких и гибких поперечин), к тому же стоимость замены одной опоры весьма высока (около 0,4 млн руб. в ценах 2016 г.). Наклон или разворот опоры может привести не только к снижению качества токосъема, но и к повреждению токоприемника тягового подвижного состава, что существенно влияет на безопасность движения поездов (рис. 1). Следует также отметить, что повреждения опор никак не контролируются современными средствами железнодорожной автоматики, выполняющими информационно-вспомогательные функции регулирования движения поездов (потенциально возможна ситуация, когда на светофоре горит разрешающее показание, а опора нарушила габарит приближения строений).

Анализ состояния опор контактной сети хозяйства электрификации и энергоснабжения Октябрьской дирекции по энергообеспечению ОАО «РЖД» свидетельствует, что значительное количество опор имеет срок службы, превышающий 40 лет: среди железобетонных опор таких более 20% (свыше 27 тыс.), среди металлических — более 22% (свыше 6,7 тыс.).



Рис. 1. Разворот опоры

Целесообразно контролировать угол и параметры вибрации опор контактной сети, так как их изменение дает основание предполагать, что состояние опоры и/или ее фундамента ухудшилось. Кроме того, на участках с электротягой постоянного тока следует контролировать токи утечки, чтобы предотвратить электрокоррозию опор, а на участках переменного тока — контролировать токи утечки в работе системы автоматической локомотивной сигнализации.

СПОСОБ УСТАНОВКИ ДАТЧИКА

Первым этапом организации мониторинга состояния опор контактной сети является контроль углов и параметров вибрации за счет установки специальных диагностических приборов (рис. 2).

При разработке способа технической реализации поставленной задачи авторы использовали опыт мониторинга мостовых сооружений [20].

По результатам анализа возможностей измерительных приборов был выбран двухосевой инклинометр ADIS 16209 (на рис. 2 — ИД), имеющий диапазон измерения $\pm 30^\circ$ и шаг измерения $0,025^\circ$. Абсолютная точность измерения составляет:

- $0,1^\circ$ — в диапазоне температур от -30° до $+30^\circ$;
- $0,3^\circ$ — в расширенном диапазоне температур от -40° до $+80^\circ$.

Это значит, что при заморозке или нагреве инклинометра будет наблюдаться указанный разброс измеренных значений.

Инклинометр был смонтирован в специальном защищенном корпусе на объекте диагностирования (одна из опор участка Торбино — Боровенка на линии скоростного сообщения Санкт-Петербург — Москва, рис. 3) и в настоящее время функционирует в составе подсистемы мониторинга железнодорожной контактной подвески. Данные, получаемые диагностическим прибором непосредственно на объекте мониторинга, передаются по специальному энергосберегающему протоколу передачи на частоте 868,7 МГц на линейный пункт станции Тосно Октябрьской железной дороги.

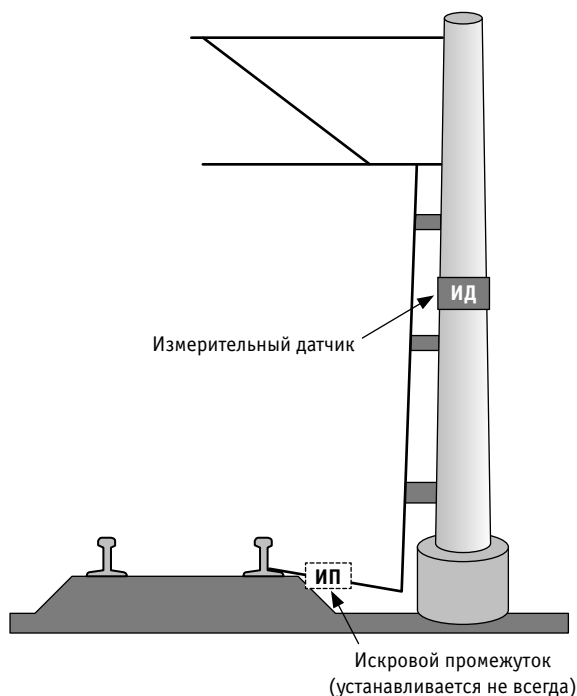


Рис. 2. Схема установки датчика



Рис. 3. Внешний вид смонтированного диагностического прибора

На линейном посту диагностическая информация представляется в графической форме в окне автоматизированного рабочего места технолога мониторинга (рис. 4), проходит обработку и архивируется. Полученные данные выводятся в специальной форме по обоим измерительным осям инклинометра (рис. 5). Данные на рис. 5 взяты по модулю и не превышают отклонения в $0,05^\circ$, что свидетельствует об отсутствии критических отклонений (данные на уровне шумов микросхемы).

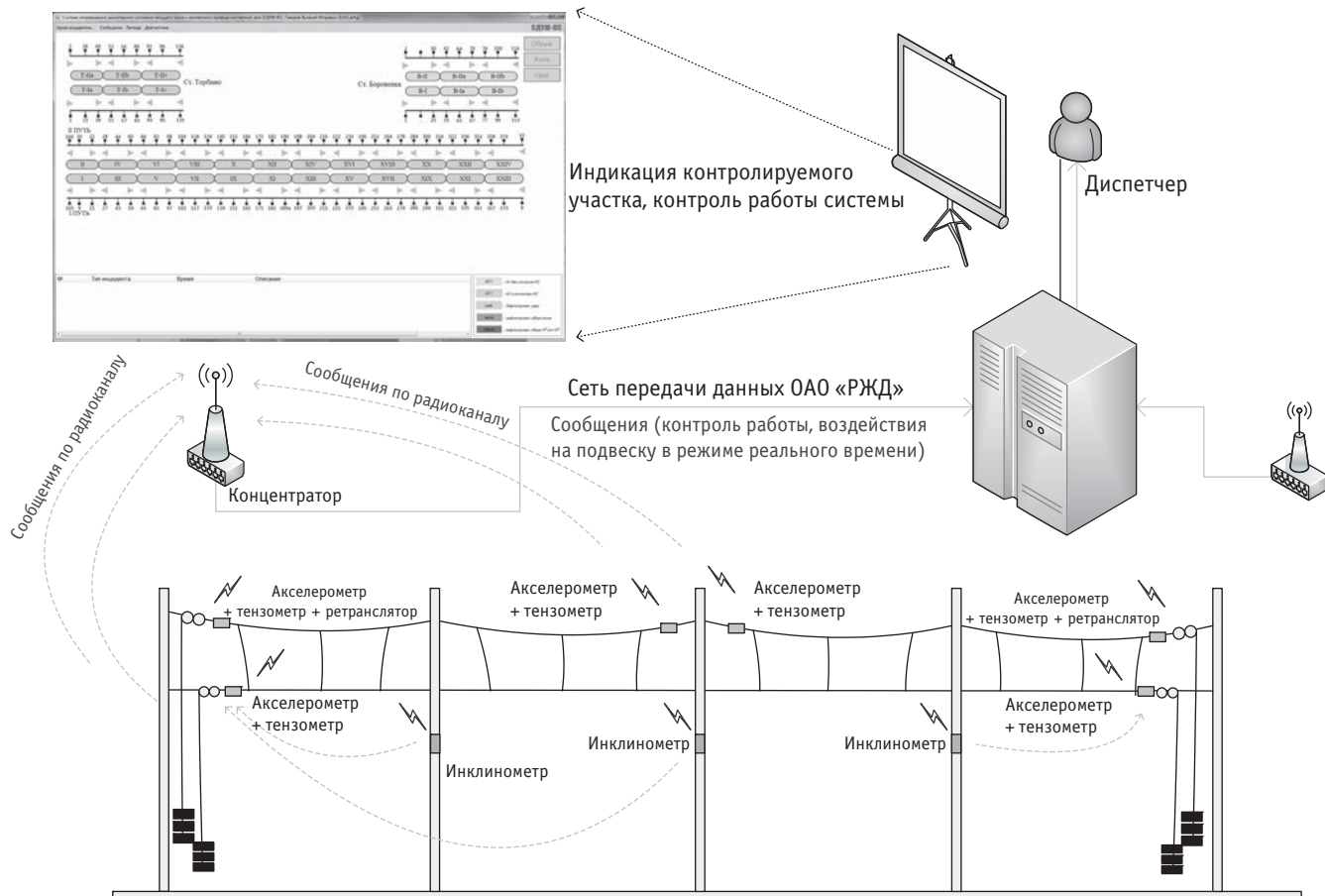


Рис. 4. Структура организации системы мониторинга

В соответствии с указаниями по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети К-146–2008 при сооружении устройств наклон оси опоры относительно вертикали в сторону, противоположную действию основных нагрузок, не должен превышать 2 %, наклон опор в сторону пути не допускается. Наклон анкерных опор после передачи на них нагрузки в сторону, противоположную действию нагрузок от анкеровки, не должен превышать 0,5 %, или 50 мм на всю высоту опоры. Наклон опоры в сторону действия основных нагрузок не допускается. В процессе эксплуатации наклон опор в сторону поля не должен превышать 200 мм, в сторону пути — 30 мм на всю высоту опоры. Наклон анкерных опор в сторону, противоположную действию нагрузок от анкеровки, не должен превышать 100 мм, а в сторону действия нагрузок — 50 мм на всю высоту опор (в качестве высоты опоры можно принять 10–10,8 м). Все нормативные параметры можно контролировать и анализировать непрерывно с помощью разработанного способа, в том числе выводить данные о критических углах наклона в окно автоматизированного рабочего места технолога по мониторингу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеграция в подсистему мониторинга железнодорожной контактной подвески разработанного авторами способа контроля технического состояния опор позволяет на этапе развития усталостных неисправностей предупреждать возможный отказ и тем самым обеспечивает оперативное информирование обслуживающего персонала о потенциальном происшествии. Более того, создаются условия для обслуживания объектов железнодорожной контактной подвески по фактическому состоянию, а человеческий фактор в профилактических действиях минимизируется.

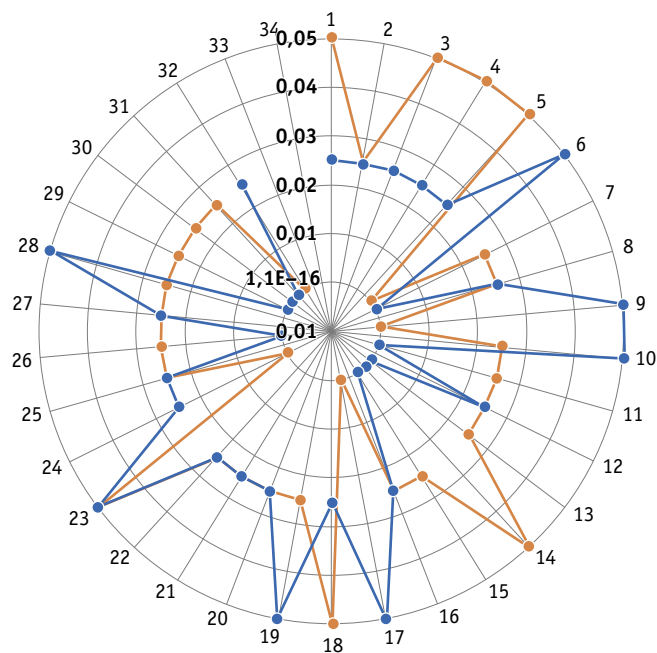


Рис. 5. Расшифровка диагностических данных:
— ось X прибора; — ось Y прибора

Полученные результаты являются важным этапом в развитии технологии мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры ОАО «РЖД». Сам предложенный способ мониторинга углов отклонения опор контактной подвески может быть использован для анализа состояния светофорных мачт, а также адаптирован для других потенциально опасных искусственных сооружений железных дорог.

Литература

- Ханычев В. В., Милованов М. А. Разработка системы интеллектуального мониторинга и контроля обстановки в целях обеспечения безопасности объектов железнодорожной инфраструктуры со стороны прилегающей водной акватории // Управление большими системами. 2012. Вып. 38. С. 91–104.
- Video image analysis in accordance with power density of arcing for current collection system in electric railway / Y. Park, K. Lee, C. Park, et al. // The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers. 2013. Vol. 62. Issue 9. P. 1343–1347.
- Бирюзов В. П. Диагностика и мониторинг объектов инфраструктуры // Евразия Вести. 2015. Июль. С. 6–7.
- Молодцов В. П., Иванов А. А. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие. СПб. : ПГУПС, 2010. 140 с.
- Федорчук А. Е., Сепетый А. А., Иванченко В. Н. Автоматизация технического диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ (система АДК-СЦБ). М. : УМЦ ЖДТ, 2013. 400 с.
- Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : моногр. СПб. : ПГУПС, 2016. 171 с.

References

- Khanychev V. V., Milovanov M. A. Razrabotka sistemy intellektualnogo monitoringa i kontrolya obstanovki v tselyakh obespecheniya bezopasnosti ob'ektov zheleznodorozhnoy infrastruktury so storony prilgayushchey vodnoy akvatorii [Development of intelligent monitoring and situation control system for railway infrastructure objects protection from adjoining water area] // Upravlenie bolshimi sistemami. 2012. Vyp. 38. S. 91–104.
- Video image analysis in accordance with power density of arcing for current collection system in electric railway / Y. Park, K. Lee, C. Park, et al. // The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers. 2013. Vol. 62. Issue 9. P. 1343–1347.
- Biryuzov V. P. Diagnostika i monitoring ob'ektov infrastruktury [Diagnostics and monitoring of infrastructure objects] // Evraziya Vesti. 2015. Iyul. S. 6–7.
- Molodtsov V. P., Ivanov A. A. Sistemy dispetcherskogo kontrolya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki : ucheb. posobie [Dispatching control and railway automation and remote control monitoring systems : textbook]. SPb. : PGUPS, 2010. 140 s.
- Fedorchuk A. E., Sepetyy A. A., Ivanchenko V. N. Avtomatizatsiya tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv ZhAT (sistema ADK-SIsB) [Automation of technical diagnostics and monitoring of Railway Automatics and Telemechanics Devices (the System of Automatization of Diagnostics and of Device Control-SIsB)]. M. : UMTs ZhDT, 2013. 400 s.
- Efanov D. V. Funktsionalnyy kontrol i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki : monogr. [Concurrent check-

7. Вибродиагностика контактной подвески на линии Санкт-Петербург — Москва / Г. Ф. Насонов, Г. В. Осадчий, Д. В. Ефанов и др. // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 2–3. С. 49–53. ISSN 1994-831X.
8. Monitoring system of vibration impacts on the structure of overhead catenary of high-speed railway lines / D. Efanov, G. Osadchty, D. Sedykh, et al. // Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. P. 201–208. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807691.
9. Ефанов Д. В., Седых Д. В., Осадчий Г. В. Результаты использования системы непрерывного мониторинга железнодорожной контактной подвески на участке Торбино — Боровенка линии скоростного сообщения Санкт-Петербург — Москва // Автоматика на транспорте. 2017. Т. 3. № 1. С. 39–53. ISSN 2412-9186.
10. Efanov D., Osadchy G., Sedykh D. Development of rail roads health monitoring technology regarding stressing of contact-wire catenary system // Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk, 2016.
11. Способ непрерывного мониторинга механического усилия в проводах и тросах контактной подвески / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, Д. В. Седых и др. // Транспорт Урала. 2016. № 1 (48). С. 9–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-9-15. ISSN 1815-9400.
12. Перспективная универсальная сеть передачи данных / Г. Ф. Насонов, В. Ф. Танаев, Д. В. Ефанов и др. // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 5. С. 29–32. ISSN 1994-831X.
13. Сети передачи данных для мониторинга объектов инфраструктуры / Г. Ф. Насонов, Г. В. Осадчий, Д. В. Ефанов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 2. С. 5–8. ISSN 0005-2329.
14. Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П. Передача данных с устройств оборудования переезда аппаратурой АПК-ДК при отсутствии физической линии и круглосуточного дежурства // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 1. С. 65–80. ISSN 2412-9186.
15. Галкин А. Г., Ковалев А. А. Обслуживание опор контактной сети // Транспорт Урала. 2008. № 1 (16). С. 60–65. ISSN 1815-9400.
16. Ковалев А. А., Лобанова Г. С., Несмелов Ф. С. Разработка метода расчета наклона опоры контактной сети на основе учета деформационных характеристик грунта // Транспорт Урала. 2010. № 1 (24). С. 69–71. ISSN 1815-9400.
17. Ковалев А. А. Формирование управляющих воздействий на контактной сети с учетом процесса разрегулировок опор : моногр. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2013. 74 с.
18. Система виброакустического контроля опор контактной сети и опорных конструкций светофоров / С. В. Алтынбаев, В. С. Фадеев, О. В. Захарова, Э. Н. Шорников // Локомотив. 2014. № 11. С. 34–36. ISSN 0869-8147.
19. Оценка состояния железобетонных опор контактной сети ультразвуковым прибором поверхностного прозвучивания / В. Н. Козлов, В. И. Подольский, А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.acsys.ru/article/otsenka-sostoyaniya-zhelezobetonnykh-opor-kontaktnoy-seti-ultrazvukovym-priborom-poverkhnostnogo-pro/> (дата обращения: 18.02.2016).
20. Белый А. А., Долинский К. Ю., Осадчий Г. В. Система мониторинга инженерных конструкций при строительстве тоннеля под рекой Смоленка (г. Санкт-Петербург) // Геотехника. 2016. № 2. С. 18–27. ISSN 2221-5514.
- ing and monitoring of railway automation and remote control devices : monograph]. SPb. : PGUPS, 2016. 171 s.
7. Vibrodiagnostika kontaktnoy podveski na linii Sankt-Peterburg — Moskva [Overhead catenary vibration monitoring on the Saint Petersburg — Moscow line] / G. F. Nasonov, G. V. Osadchty, D. V. Efanov i dr. // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2016. № 2–3. С. 49–53. ISSN 1994-831X.
8. Monitoring system of vibration impacts on the structure of overhead catenary of high-speed railway lines / D. Efanov, G. Osadchty, D. Sedykh, et al. // Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS' 2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. P. 201–208. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807691.
9. Efanov D. V., Sedykh D. V., Osadchty G. V. Rezultaty ispolzovaniya sistemy nepreryvnogo monitoringa zheleznodorozhnoy kontaktnoy podveski na uchastke Torbino — Borovenka linii skorostnogo soobshcheniya Sankt-Peterburg — Moskva [Results of the use of the continuous monitoring system of the railway contact suspension on the Torbino — Borovenka section of the St. Petersburg — Moscow high-speed line] // Avtomatika na transporte. 2017. T. 3. № 1. С. 39–53. ISSN 2412-9186.
10. Efanov D., Osadchy G., Sedykh D. Development of rail roads health monitoring technology regarding stressing of contact-wire catenary system // Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk, 2016.
11. Sposob nepreryvnogo monitoringa mekhanicheskogo usiliya v provodakh i trosakh kontaktnoy podveski / D. V. Efanov, G. V. Osadchty, D. V. Sedykh i dr. [A method for continuous monitoring of mechanical tension in catenary wires and cables] // Transport Urala. 2016. № 1 (48). С. 9–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-9-15. ISSN 1815-9400.
12. Perspektivnaya universalnaya set peredachi dannykh [Prospective data-transmission universal network] / G. F. Nasonov, V. F. Tanaev, D. V. Efanov i dr. // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2016. № 5. С. 29–32. ISSN 1994-831X.
13. Seti peredachi dannykh dlya monitoringa ob'ektov infrastruktury [Data transmission networks for infrastructure objects monitoring] / G. F. Nasonov, G. V. Osadchty, D. V. Efanov, D. V. Sedykh // Avtomatika, svyaz, informatika. 2017. № 2. С. 5–8. ISSN 0005-2329.
14. Ivanov A. A., Legonkov A. K., Molodtsov V. P. Peredacha dannykh s ustroystv oborudovaniya pereezda apparatury APK-DK pri otsutstviy fizicheskoy linii i kruglosutochnogo dezhurstva [Data transmission from APK-DK devices of rail crossing under absence of physical link and clock duty] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 1. С. 65–80. ISSN 2412-9186.
15. Galkin A. G., Kovalev A. A. Obsluzhivanie opor kontaktnoy seti [Maintaining support of the contact network] // Transport Urala. 2008. № 1 (16). С. 60–65. ISSN 1815-9400.
16. Kovalev A. A., Lobanova G. S., Nesmelov F. S. Razrabotka metoda rascheta naklona opory kontaktnoy seti na osnove ucheta deformatsionnykh kharakteristik grunta [Development of calculation method of slope of contact system mast on the basis of accounting earth deformation characteristics] // Transport Urala. 2010. № 1 (24). С. 69–71. ISSN 1815-9400.
17. Kovalev A. A. Formirovaniye upravlyayushchikh vozdeystviy na kontaktnoy seti s uchetom protsessa razregulirovok opor : monogr. [Formation of control actions on the contact network taking into account the process of misalignment of supports : monograph]. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2013. 74 s.
18. Sistema vibroakusticheskogo kontrolya opor kontaktnoy seti i opornykh konstruktсий svetoforov [System of vibroacoustic control of supports of the contact network and support structures of traffic lights] / S. V. Altynbaev, V. S. Fadeev, O. V. Zakharova, E. N. Shornikov // Lokomotiv. 2014. № 11. С. 34–36. ISSN 0869-8147.
19. Otsenka sostoyaniya zhelezobetonnykh opor kontaktnoy seti ultrazvukovym priborom poverkhnostnogo prozvuchivaniya [Assessment of the state of reinforced concrete supports of the contact network by an ultrasonic surface sounding instrument] / V. N. Kozlov, V. I. Podolskiy, A. A. Samokrutov, V. G. Shevaldykin [Electronic resource]. URL: <http://www.acsys.ru/article/otsenka-sostoyaniya-zhelezobetonnykh-opor-kontaktnoy-seti-ultrazvukovym-priborom-poverkhnostnogo-pro/> (access date: 18.02.2016).
20. Belyy A. A., Dolinskiy K. Yu., Osadchty G. V. Sistema monitoringa inzhenernykh konstruktсий pri stroitelstve tonnelya pod rekoй Smolenka (g. Sankt-Peterburg) [A structural health monitoring system during construction of a tunnel under the Smolenka River (Saint Petersburg)] // Geotekhnika. 2016. № 2. С. 18–27. ISSN 2221-5514.

УДК 62.192:519.172.1

Борис Викторович Рожкин, старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ОТКАЗОВ

Boris Viktorovich Rozhkin, Senior Lecturer, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Optimization of algorithms to failures search

Аннотация

Статья посвящена вопросам синтеза, оптимизации и оценки эффективности алгоритмов поиска отказов в технических системах. Предложен способ оптимизации алгоритмов путем приведения их к сбалансированному бинарному дереву поиска. Рассмотрена новая метрика оценки эффективности алгоритмов с учетом ранжирования возможных дефектов по их вкладу в общее количество отказов системы.

Ключевые слова: отказы, алгоритмы, оптимизация, оценка эффективности, поиск отказов, диагностические тесты, бинарные деревья поиска, асимптотическая оценка сложности алгоритмов.

Summary

This article discusses the problems of synthesis, optimization and evaluation of the efficiency of failure search algorithms in technical systems. A method for optimizing algorithms is proposed, by bringing them to a balanced binary search tree. A new metric for evaluating the effectiveness of algorithms is considered, taking into account the ranking of possible defects by their contribution to the total number of system failures.

Keywords: failures, algorithms, optimization, efficiency evaluation, failure search, diagnostic tests, binary search trees, asymptotic estimation of algorithm complexity.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-42-46

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая тенденция развития предполагает все большую роль технических устройств в реализации технологических процессов управления. При этом с усложнением внутренней структуры систем управления усложняется и процесс поиска отказов. Большое разнообразие архитектур и инженерных компромиссов, принятых в ходе синтеза управляющих систем, обуславливает высокую степень вариативности и сложность построения диагностических тестов. Эта проблема привела к развитию особой области знаний, объектом исследования которой являются методы построения оптимальных диагностических тестов. В области систем железнодорожной автоматики данная проблема решалась в трудах И. Е. Дмитренко, В. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова и других ученых [1–4].

На текущий момент разработано несколько методов построения алгоритмов поиска отказов для систем железнодорожной автоматики с различной степенью формализации [1, 3, 4]. Тем не менее остается ряд слабоизученных вопросов:

получаемые алгоритмы не всегда оптимальны по времени поиска дефекта, недостаточно исследуется их оптимизация;

предлагаемые методы оценки эффективности не учитывают критичность и степень влияния дефекта каждого узла на работу системы в целом.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСА ОПТИМИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ОТКАЗОВ

С точки зрения информатики алгоритм — это формальное описание вычислительной процедуры преобразования информации с априорно известными критериями эффективности [5, 6]. Наиболее часто критерием эффективности алгоритмов выступает вычислительная сложность — количество элементарных операций, которые необходимо сделать, чтобы получить поставленный результат. Также различают вычислительную сложность алгоритма для наилучшего и наихудшего случая композиции входных данных. За объективный критерий качества по понятным причинам выбирают вычислительную сложность алгоритма для наихудшего случая. На практике часто не различают вычислительную и временную сложность, так как в конечном счете каждая вычислительная операция требует временных затрат. Таким образом, за критерий эффективности

алгоритма примем временную сложность алгоритма для наихудшего случая, обозначаемую символом $O(\dots)$.

Проиллюстрируем, как изменится эффективность поиска дефектного узла системы при различных структурах алгоритмов проверок. На рис. 1 в виде графа представлены два алгоритма проверок одной и той же системы, оперирующие одинаковыми проверками. Вершина графа, условно обозначенная кругом, представляет собой процесс выполнения проверки — назовем ее узлом дерева поиска. Квадратная вершина графа — это листовой элемент дерева поиска, содержащий идентифицированный дефектный узел системы. Ребро с индексом 1 показывает, что данная проверка идентифицирует данную неисправность, с индексом 0 — не идентифицирует. Другими словами, индекс ребра показывает результат выполнения проверки.

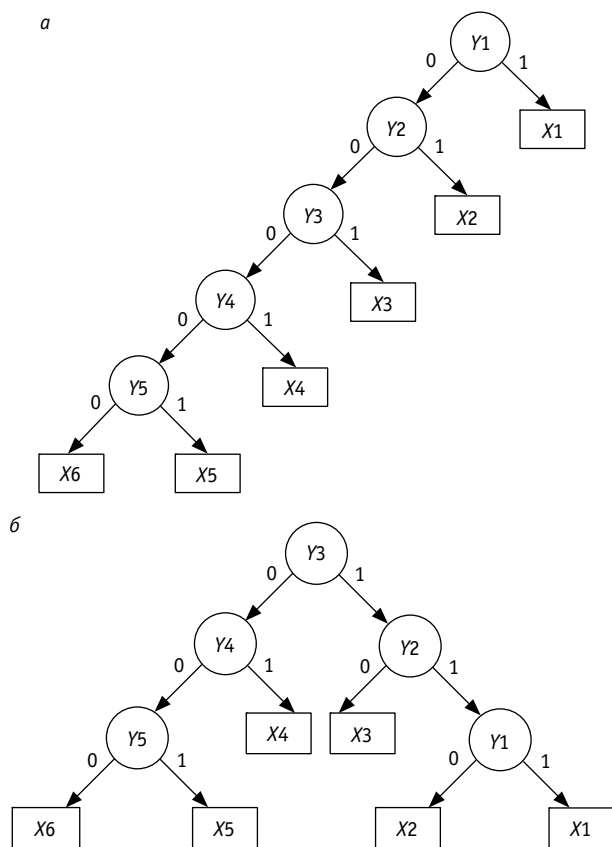


Рис 1. Варианты построения алгоритмов поиска дефектного элемента:

а и б — соответственно линейная и древовидная структура

Допустим, что в системе присутствует неисправность 5-го узла системы, обозначенная как X5, проверка, определяющая эту неисправность, обозначена Y5. Обход дерева поиска начинается с корня — самого верхнего узла. В случае линейного алгоритма (см. рис. 1а) данный дефект будет обнаружен в 5-й по счету проверке, в случае древовидного (см. рис. 1б) — на входе 3-й.

С точки зрения информатики линейный алгоритм поиска имеет линейную сложность $O(n)$, где n — количество элементов в списке или количество проверок в нашем случае. Древовидный алгоритм имеет сложность $O(\log_2 n)$ — логарифмическую сложность. При малых значениях n выигрыш от применения древовидных структур невелик, но он становится заметен с ростом количества проверок. Например, пусть алгоритм поиска дефекта в системе содержит 10 000 проверок, при древовидном алгоритме в наихудшем случае потребуются $\log_2 10000 \approx 14$ проверок вместо 10 000 при линейном. Под наихудшим случаем понимаем ситуацию наличия дефекта, который выявляется 10 000-й проверкой. Рассмотренную древовидную структуру в информатике называют бинарными деревьями поиска, линейный граф представляет собой частный, вырожденный случай бинарного дерева поиска.

Существуют различные виды бинарных деревьев поиска [5–7], но их всех объединяет условие поддержания эффективности поиска элементов: дерево должно быть сбалансировано, т. е. высота любой из ветвей дерева не должна отличаться от высоты всех остальных ветвей более чем на 1. Под высотой ветви дерева поиска понимают количество узлов от листового элемента до корня дерева. В сбалансированном дереве максимальная высота составит $\log_2 n$, где n — количество элементов, содержащихся в дереве [5–7]. Для поддержания баланса высот отдельных ветвей дерева при зафиксированном случае дисбаланса применяют операцию поворота бинарного дерева [6]. На самом деле граф на рис. 1б был получен из графа с рис. 1а путем двух поворотов вправо вокруг корня, процесс поворота показан на рис. 2.

Технически разворот направлен в сторону ветвей с наименьшей длиной и производится всегда вокруг некоторой вершины графа. В данном случае поворот производился вокруг корня и не нарушал соответствие проверок и идентифицируемых дефектов, а менял порядок проведения проверок. Так, на рис. 2а дефект X2 идентифицировался при отрицательном результате проверки Y1 и положительном результате Y2. На рис. 2б тот же дефект X2 идентифицировался при положительном результате проверки Y2 и отрицательном Y1, т. е. изменился порядок проведения проверок, определяемый алгоритмом. С точки зрения математики такая перестановка не влияет на конечный результат, так как операция применения проверок коммутативна [1]. Таким образом, можно сформулировать формальное условие и правило оптимизации.

Условие доступности оптимизации: если алгоритм представляет собой несбалансированное бинарное дерево поиска, то данный алгоритм может быть оптимизирован.

Правило оптимизации: оптимизация алгоритма представляет собой операцию балансировки бинарного дерева поиска.

Условие оптимальности алгоритма должно не только оперировать фактом выполнения проверки, но и учитывать трудозатраты на ее выполнение и критичность идентифицируемого дефекта для функционирования системы. То есть при выборе наилучшего алгоритма необходимо оценивать получаемые и исходный алгоритмы по метрикам эффективности (оптимальности).

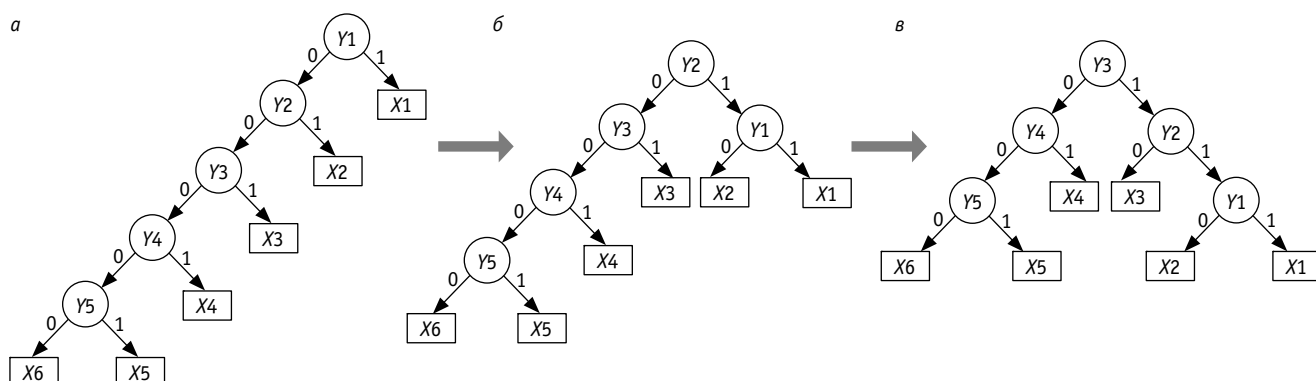


Рис. 2. Процесс балансировки бинарного дерева поиска

МЕТРИКИ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ

В работе [3] для оценки эффективности получаемого алгоритма применяется метод определения стоимости его полного обхода — выполнения всех проверок с учетом вероятности проведения конкретной проверки. Допустим, про некую систему известно, что в ней может быть пять уникальных дефектов (X_i) с известными вероятностями появления (P_i) и существуют их проверки (Y_i), а также определена стоимость (C_i) выполнения каждой проверки (табл. 1).

Таблица 1

Таблица известных дефектов, вероятности их появления и стоимости идентификации

Проверка	Дефект					C_i
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
Y_1	1	0	0	0	0	2
Y_2	0	1	0	0	0	3
Y_3	0	0	1	0	0	2
Y_4	1	1	0	1	0	7
Y_5	1	1	1	0	1	4
P_i	0,1	0,3	0,25	0,2	0,15	—

Стоимость полного обхода графа предлагается вычислять по следующей формуле [3]:

$$C = \sum_{i=1}^n P(Y_i) \cdot C(Y_i), \quad (1)$$

где n — количество дефектов в системе;

$P(Y_i)$ — вероятность выполнения конкретной проверки;

$C(Y_i)$ — стоимость конкретной проверки.

Рассматриваемый пример взят из работы [3], в ней же были рассмотрены способы построения алгоритмов поиска дефектного элемента, приведенные на рис. 3.

Представленные варианты алгоритмов были получены с использованием различных подходов к построению:

рис. 3а — не использовались специальные методы построения, вариант строился от случайно взятой проверки;

рис. 3б — применялся информационный метод, при котором в первую очередь выполнялись наиболее информативные проверки. Метод базируется на использовании формулы К.Э. Шеннона для оценки информационной энтропии;

рис. 3в — итерационный метод построения графа снизу в направлении корня с выбором наиболее эффективной итерации на основании уравнения Р.Э. Беллмана.

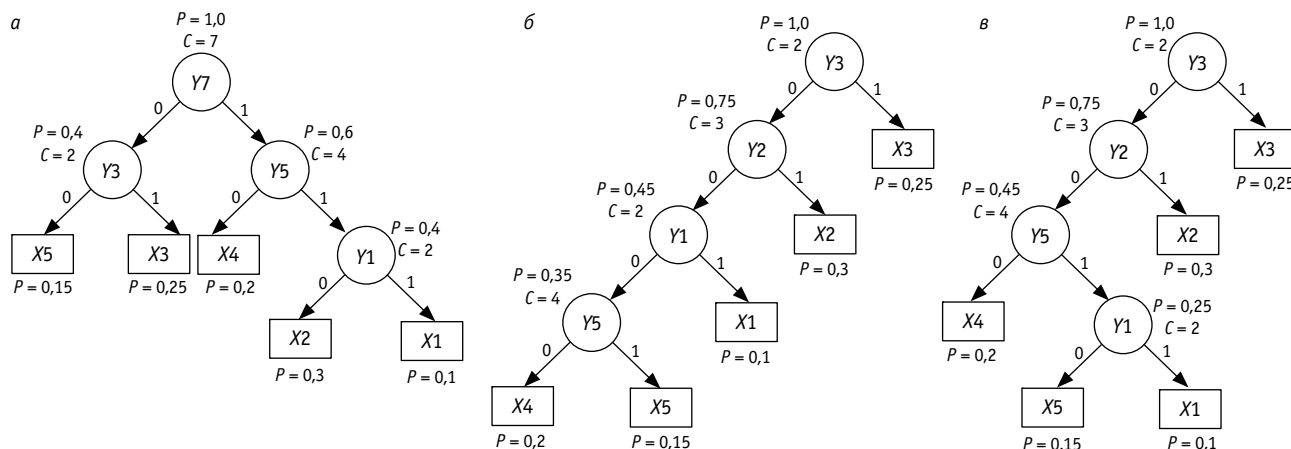


Рис. 3. Варианты алгоритмов поиска дефектного узла системы

Применяя в качестве метрики оценивания эффективности стоимость полного обхода [формула (1)], получаем численную оценку эффективности для каждого варианта. Наиболее эффективный вариант предлагается выбирать по минимальному значению стоимости полного обхода:

$$C_a = 11,0 \text{ (рис. 3а);}$$

$$C_b = 6,55 \text{ (рис. 3б);}$$

$$C_b = 6,55 \text{ (рис. 3в).}$$

Варианты, представленные на рис. 3б и 3в, имеют одинаковые значения метрики, следовательно, однозначный выбор в пользу любого из вариантов сделать невозможно. Из рис. 2 видно, что наиболее эффективные варианты алгоритмов представляют собой несбалансированное дерево бинарного поиска. После балансировки был получен алгоритм поиска неисправности, показанный на рис. 4. Стоимость его полного обхода (обозначим ее C_r) составила $C_r = 6,4$. То есть после балансировки алгоритм стал более эффективен, и снялась проблема выбора оптимального алгоритма.

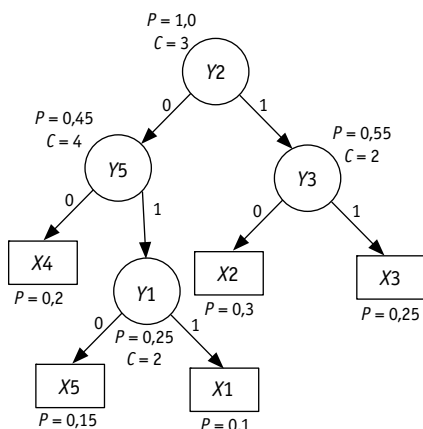


Рис. 4. Оптимизированный вариант алгоритма поиска дефекта

Апробация балансировки дерева поиска как метода оптимизации алгоритма проводилась нами в рамках учебного процесса при изучении дисциплины «Основы технической диагностики». Студентам предлагалась структурная схема надежности и вероятности отказа и стоимость проверки каждого элемента, необходимо было построить не менее четырех различных алгоритмов поиска дефекта и при возможности оптимизировать наиболее эффективный. По результатам анализа работ было установлено следующее:

в 32,4 % случаев методы, основанные на уравнениях К. Э. Шеннона и Р. Э. Беллмана, сразу строят сбалансированные бинарные деревья поиска;

если алгоритм изначально представлен несбалансированным деревом, то в 70,59 % случаев балансировка позволяет снизить стоимость полного обхода, т. е. повышает эффективность поиска отказов.

МЕТРИКА С УЧЕТОМ КРИТИЧНОСТИ ОТКАЗА ЭЛЕМЕНТА

Недостаток метрики, рассмотренной в работе [3], — отсутствие ранжирования отказов элементов по частоте их появления в общей массе отказов. На текущий момент в ОАО «РЖД» действует стандарт СТО РЖД 1.05.515.2–2009 [8], предусматривающий ранжирование факторов, влияющих на характеристики качества, с разделением их на немногочисленные важные и многочисленные незначительные.

Поэтому предлагается новая метрика оценивания эффективности алгоритма поиска дефектного узла, определяющая затраты на поиск наиболее часто отказываемых элементов. Оценка эффективности поиска каждой конкретной неисправности должна учитывать стоимость всех ранее сделанных проверок в рассматриваемой ветви дерева поиска. Таким образом, аналитически новая метрика может быть определена как

$$C^R = \sum_{j=1}^n \left(\left[\sum_{i=1}^m C(Y_i) \right] \cdot P(X_j) \right), \quad (2)$$

где n — количество наиболее частых дефектов;

m — количество проверок по алгоритму до обнаружения j -й неисправности;

$C(Y_i)$ — стоимость проверки;

$P(X_j)$ — вероятность появления j -й неисправности.

В качестве метода определения перечня наиболее частых дефектов в [8] предлагается использовать диаграмму Парето (рис. 5).

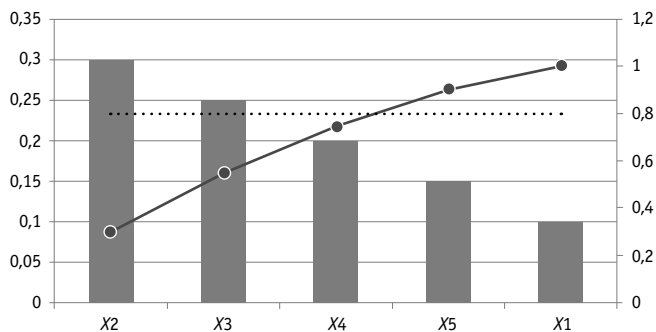


Рис. 5. Диаграмма Парето определения критичной группы дефектов:

■ — вероятность; —●— накопленная доля отказов; — порог

Из диаграммы четко определяется критическая группа из трех дефектов {X2, X3, X4}. На рис. 3 и 4 представлены четыре различных алгоритма поиска дефектных элементов, сравним их эффективность по существующей и предлагаемой метрике (табл. 2).

Справедливо, что различные метрики определяют разные алгоритмы как наиболее эффективные. Метрика, рассмотренная в работе [3], по нашему мнению, наиболее подходит для случая, когда вероятности появления различных отказов образуют статистически однородную совокупность [9], т. е. выделение критичной группы дефектов по диаграмме Парето

затруднено. Предлагаемую в данной работе метрику целесообразно применять, когда вероятности отказов образуют статистически неоднородную совокупность и выделение критической группы не составляет трудностей. Таким образом, альтернативная метрика оценивания эффективности алгоритмов позволяет сформулировать условие оптимальности алгоритма поиска дефектов.

Таблица 2

Сравнительный анализ полученных алгоритмов
по различным метрикам

Алгоритм	Рис. 3а	Рис. 3б	Рис. 3в	Рис. 4
Метрика: стоимость полного обхода графа	11,0	6,55	6,55	<u>6,40</u>
Метрика: суммарная стоимость поиска наиболее частых отказов	8,35	4,2	<u>3,8</u>	4,15

Условие оптимальности алгоритма: в оптимальном алгоритме выбранная метрика эффективности имеет наименьшее значение. Если для двух алгоритмов выбранная метрика имеет одинаковое численное значение, то оптимальным должен быть признан алгоритм с минимальным значением альтернативной метрики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ уменьшения временной сложности алгоритмов поиска дефектов путем приведения их к виду сбалансированного бинарного дерева поиска. Сформулированы условия доступности оптимизации, оптимальности алгоритмов и правило оптимизации (разворот бинарного дерева). Предложена альтернативная метрика оценивания эффективности алгоритмов, учитывающая критичность конкретного дефекта. Предложено формальное правило выбора метрики оценивания конкретного алгоритма на основании анализа статистической однородности совокупности, образованной вероятностями появления отказов узлов системы.

Литература

1. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. М. : Маршрут, 2003. 263 с.
2. Дмитренко И. Е., Сапожников В. В., Дьяков Д. В. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. И. Е. Дмитренко. М. : Транспорт, 1994. 263 с.
3. Ефанов Д. В. Построение оптимальных алгоритмов поиска неисправностей в технических объектах : учеб. пособие. СПб. : Изд-во ПГУПС, 2014. 49 с.
4. Калявин В. П., Рыбаков Л. М. Надежность и диагностика элементов электроустановок : учеб. пособие. СПб. : Элмор, 2009. 346 с.
5. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ / Пер. с англ. ; под ред. А. Шеня. М. : МЦНМО, 2002. 960 с.
6. Скиена С. Алгоритмы. Руководство по разработке / 2-е изд. ; пер с англ. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 720 с.
7. Седжвик Р. Фундаментальные алгоритмы на C++. Анализ. Структуры данных. Сортировка. Поиск / Пер. с англ. К. : Изд-во «ДиаСофт», 2001. 688 с.
8. СТО РЖД 1.05.515.2–2009. Методы и инструменты улучшений. Анализ Парето [Электронный ресурс]. URL: <http://jd-doc.ru/2009/iyun-2009/7752-standart-oao-rzhd-n-sto-rzhd-1-05-515-2-2009-ot-02-06-2009-n-1150r> (дата обращения: 30.05.2017).
9. Теория статистики : учеб. / Под. ред. проф. Р. А. Шмойловой ; 4-е изд., перераб. и доп. М. : Финансы и статистика, 2004. 656 с.

References

1. Nadezhnost sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi : ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transp. [Reliability of railway automation, telemechanics and communication systems : textbook] / V. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov, V. I. Shamanov ; pod red. V. V. Sapozhnikova. M. : Marshrut, 2003. 263 s.
2. Dmitrenko I. E., Sapozhnikov V. V., Dyakov D. V. Izmereniya i diagnostirovanie v sistemakh zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi : ucheb. dlya vuzov zh.-d. transp. [Measurements and diagnostics in railway automation, telemechanics and communication systems : textbook] / Pod red. I. E. Dmitrenko. M. : Transport, 1994. 263 s.
3. Efanov D. V. Postroenie optimalnykh algoritmov poiska neispravnostey v tekhnicheskikh ob'ektakh : ucheb. posobie [Construction of optimal algorithms for troubleshooting in technical facilities : textbook]. SPb. : Izd-vo PGUPS, 2014. 49 s.
4. Kalyavin V. P., Rybakov L. M. Nadezhnost i diagnostika elementov elektroustanovok : ucheb. posobie [Reliability and diagnostics of electrical installation elements : textbook]. SPb. : Elmor, 2009. 346 s.
5. Kormen T., Leyzerson Ch., Rivest R. Algoritmy: postroenie i analiz [Introduction to Algorithm] / Per. s angl. ; pod red. A. Sheny. M. : MTsNMO, 2002. 960 s.
6. Skiena S. Algoritmy. Rukovodstvo po razrabotke [The algorithm desing manual] / 2-e izd. ; per s angl. SPb. : BKhV-Peterburg, 2011. 720 s.
7. Sedzhvik R. Fundamentalnye algoritmy na C++. Analiz. Struktury dannykh. Sortirovka. Poisk [Algorithm in C++. Fundamentals data structures. Sorting. Searching] / Per. s angl. K. : Izd-vo «DiaSoft», 2001. 688 s.
8. STO RZhd 1.05.515.2-2009. Metody i instrumenty uluchsheniy. Analiz Pareto [Methods and tools for improvements. Pareto analysis]. [Electronic resource]. URL: <http://jd-doc.ru/2009/iyun-2009/7752-standart-oao-rzhd-n-sto-rzhd-1-05-515-2-2009-ot-02-06-2009-n-1150r> (access date: 30.05.2017).
9. Teoriya statistiki : ucheb. [Theory of statistics : textbook] / Pod. red. prof. R. A. Shmoylovoy ; 4-e izd., pererab. i dop. M. : Finansy i statistika, 2004. 656 s.

Александр Викторович Ануфренко, адъюнкт кафедры «Военные системы многоканальной электрической и оптической связи» Военной академии связи имени С. М. Буденного (ВАС), Санкт-Петербург, Россия,

Элина Валерьевна Бенета, аспирант, ассистент кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Андрей Константинович Канаев, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УЗЛА АГРЕГАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЕГО СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АГРЕГИРОВАННОГО ТРАФИКА

Alexander Viktorovich Anufrenko, adjunct, Military Systems of Multichannel Electrical and Optical Communication Department, Military Academy of Communication named after S. M. Budennyi, St. Petersburg, Russia,

Elina Valeryevna Beneta, postgraduate student, Assistant Lecturer, Electrical Communications Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Andrey Konstantinovich Kanaev, DSc in Engineering, Associate Professor, Head of Electrical Communications Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Simulation model of the aggregation node for research of the influence of its structural parameters on the characteristics of the aggregated traffic

Аннотация

Статья посвящена изучению процесса функционирования узла агрегации с учетом его структурных параметров и значений параметров выходящего из него агрегированного трафика.

Предложена имитационная модель, разработанная в расширенном редакторе GPSS World, которая позволяет рассчитывать задержку кадров, джиттер, потерю кадров в зависимости от определенной структуры, процессов отказа и восстановления элементов узла агрегации.

Практическая значимость модели заключается в том, что получаемые результаты способствуют обоснованному заданию требований к структурным параметрам узла агрегации с учетом сложившейся обстановки.

Ключевые слова: узел агрегации, телекоммуникационная сеть связи, имитационное моделирование, расширенный редактор GPSS World, трафик.

Summary

The article is devoted to the study of the functioning of the aggregation node, taking into account its structural parameters and the values of the parameters of aggregated traffic emerging from it.

A simulation model developed in the advanced editor of GPSS World is proposed, which allows calculating the frame delay, jitter, frame loss depending on the specific structure, failure processes and restoration of aggregation node elements.

The practical significance of the model lies in the fact that the results obtained contribute to a justified specification of the requirements for the structural parameters of the aggregation node, taking into account the prevailing situation.

Keywords: aggregation node, telecommunications network, simulation modeling, advanced GPSS World editor, traffic.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-47-50

В настоящее время сложно установить четкую связь между формализованными потребностями в ресурсах сети связи и ее характеристиками (характеристиками обслуживания, каналов, трактов, структуры сети и т. д.). Вызывает затруднения и четкое обоснование необходимости использования конкретного оборудования (механизмов защиты, механизмов повышения отказоустойчивости). Анализ [1–10] показывает, что непрерывное развитие телекоммуникационной инфраструктуры приводит, с одной стороны, к ужесточению требований к параметрам, определяющим качество обслуживания пользователей данной инфраструктуры, а с другой — к существенному усложнению структуры сети, где наблюдается взаимное влияние между элементами и их совокупное влияние на сетевые показатели функционирования.

Узлы агрегации (УА), совокупность которых образует уровень агрегирования сети связи [11], представляют собой связующее звено между транспортной сетью и сетью доступа. То есть от того, как функционирует УА, зависит функционирование и узлов сети доступа, и узлов транспортной сети связи. Кроме того, УА влияют на параметры трафика (задержку кадра, джиттер задержки кадра, потерю кадров), которые определяют качество обслуживания пользователей сети связи.

Таким образом, детальный анализ основных параметров УА, влияющих на характер агрегированного трафика, является актуальной задачей.

Преимущество имитационного моделирования заключается в том, что модель исследуемого объекта может быть создана с любой степенью детализации. Так как УА имеет сложную структуру, это преимущество становится необходимым для анализа параметров узла агрегации [12, 13].

Кроме связующей функции УА выполняют и ряд других: мониторинга и управления трафиком с разделением потоков по типам услуг и запросам пользователей; агрегации трафика абонентов; подключения к операторской сети различных сервисных служб (файловых или игровых серверов, головных станций IPTV);

организации шлюзов к телефонным сетям [11].

Основные технические и программные компоненты УА приведены в табл. 1 [2, 11].

Таблица 1

Технические и программные компоненты узла агрегации

Технические компоненты	Программные компоненты
1. Сетевое оборудование: сетевые адаптеры, коммутаторы, маршрутизаторы, криптомаршрутизаторы 2. Направляющие системы: кабели, разъемы, устройства передачи и приема данных в беспроводных технологиях	1. Сетевое программное обеспечение: стеки протоколов, служба удаленного доступа и т. д.

Параметры, описывающие структурно-функциональную организацию узла агрегации, представлены на рис. 1 [3, 11].

Функциональные параметры основных элементов узла агрегации приведены в табл. 2.

Имитационное моделирование УА представляет собой программу, реализованную на компьютере, описывающую (моделирующую) функционирование элементов УА, их связи между собой и внешней средой. Ввиду достоинств расширенного редактора GPSS World [9, 14, 15] для имитационного моделирования выбран именно этот программный продукт. В процессе моделирования используется математическое описание объекта при помощи теории массового обслуживания [16]. С точки зрения этой теории УА представляет собой неприоритетную (как по параметрам поступающих заявок, так и по типу обслуживания), неэкспоненциальную нелинейную разомкнутую систему массового обслуживания (количество фаз зависит от конкретной модели).

Варианты структурно-функционального построения УА различны и учитывают структуру, количество элементов, их взаимосвязь, производительность элементов, объем буфера элементов, защитные механизмы и т. д. Варианты нагрузки, поступающей на УА от каждого источника, также различны.

Разработанная имитационная модель функционирования УА позволяет исследовать влияние его основных структурно-функциональных параметров на показатели качества обслуживания сети связи (задержку, джиттер, потерю пакетов), способствует их оценке и принятию решений по улучшению качества обслуживания пользователей сети связи.

На рис. 2 представлена гистограмма, описывающая зависимость величины задержки кадра данных и джиттера задержки кадра от структуры УА.

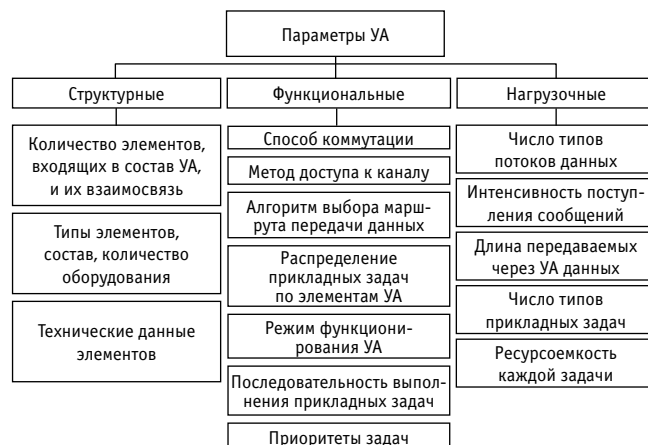


Рис. 1. Основные параметры узла агрегации

Таблица 2

Функциональные параметры основных элементов узла агрегации

Коммутаторы	Маршрутизаторы (крипомаршрутизаторы)
Скорость продвижения кадров Пропускная способность Задержка передачи кадра Режим работы Размер буфера Производительность внутренней шины Производительность процессоров Скорость фильтрации кадров	Перечень интерфейсов Количество слотов Производительность Протоколы маршрутизации

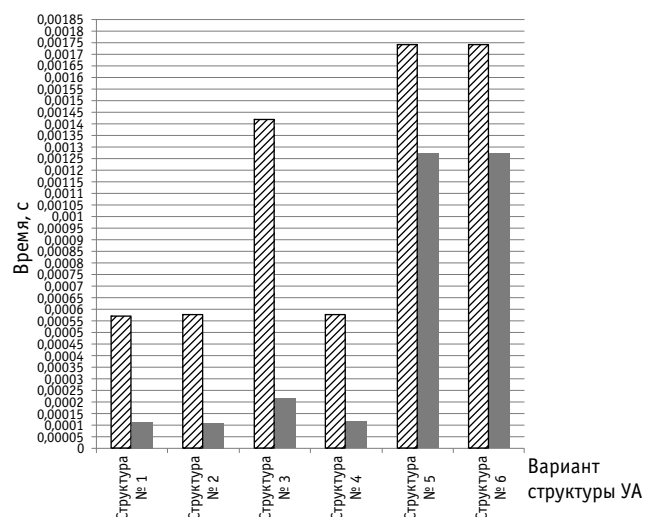


Рис. 2. Зависимость параметров агрегированного трафика от вариантов структуры узла агрегации:

▨ — задержка кадра; ■ — джиттер кадра;
структура № 1 — маршрутизатор; № 2 — коммутатор;
№ 3 — последовательно соединенные маршрутизатор и коммутатор;
№ 4 — параллельно работающие маршрутизаторы на одном узле связи;
№ 5 — две структуры № 3, работающие параллельно на одном узле связи;
№ 6 — две структуры № 3, работающие параллельно на разных узлах связи

Анализ гистограммы показывает следующее:

при прохождении агрегированного трафика через УА со структурами № 5 и № 6 значение задержки кадра больше (0,00175 с), чем при УА со структурами № 1, № 2 и № 4 (0,00055 с);

динамика зависимости джиттера задержки кадра от структуры УА соответствует динамике зависимости задержки кадра от структуры УА;

в случае прохождения агрегированного трафика через УА со структурами № 5 и № 6 соотношение между значением задержки и джиттера уменьшается;

значения джиттера одинаковы у структур № 1, № 2 и № 4, так же как и у структур № 5 и № 6.

На рис. 3 представлена гистограмма, описывающая зависимость величины задержки кадра данных и джиттера задержки кадра от механизма отказоустойчивости *EF*.

Как видно из гистограммы, величина задержки кадра и величина джиттера задержки кадра агрегированного трафика чувствительны к виду защитного механизма. Причем значения джиттера растут в прогрессии, а значения задержки кадра — линейно (при увеличении значения задержки защитного механизма на нормированную величину).

Результаты моделирования показывают, что параметры агрегированного трафика чувствительны к различным вариантам структурно-функционального устройства узла агрегации. Разница между значениями задержек кадра при различных вариантах структуры УА достигает единиц миллисекунд, что влияет на уровень качества предоставления услуг связи в целом, так как эта разница будет увеличиваться при распространении агрегированного трафика в транспортной сети.

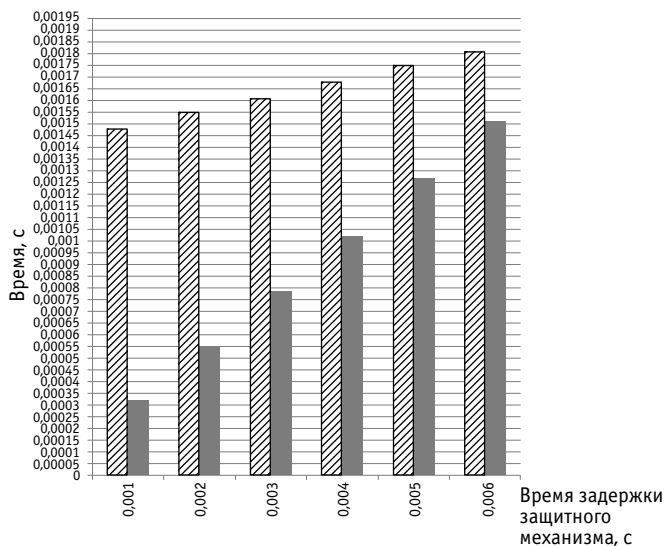


Рис. 3. Зависимость параметров агрегированного трафика от значения задержки защитного механизма:
▨ — задержка кадра; ■ — джиттер кадра

Таким образом, разработанная модель узла агрегации позволяет выявить различие значений исследуемых параметров при разном сочетании значений факторного пространства (структурно-функциональные параметры узла агрегации) модели и обосновать выбор наиболее подходящего сочетания исходя из предъявляемых требований к уровню качества обслуживания и к надежности.

Литература

1. МСЭ-T Recommendation Y.1540. IP Packet Transfer and Availability Performance parameters. December 2002.
2. Шелухин О. И., Тенякшев А. М., Осин А. В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. М. : Радиотехника, 2003. 480 с.
3. Боев В. Д., Сыпченко Р. П. Компьютерное моделирование. Элементы теории и практики. СПб. : ВАС, 2009. 436 с.
4. Дудник Б. Я., Овчаренко В. Ф., Орлов В. К. Надежность и живучесть систем связи. М. : Радио и связь, 1984. 216 с.
5. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск : Изд-во ООО «Поликом», 2010. 389 с.
6. Алиев Т. И. Сети ЭВМ и телекоммуникации : учеб. пособие. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2011. 400 с.
7. Канаев А. К., Камынина М. А. Поддержание заданных показателей качества обслуживания в условиях отсутствия информации о видах аномалий в СПД // Матер. VI Междунар. конгр. науч.-практ. конф. «Геополитические факторы устойчивого развития Арктики и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций», Санкт-Петербург, 15–16 ноября 2013 г. СПб., 2013. С. 158–163.

References

1. ITU-T Recommendation Y.1540. IP Packet Transfer and Availability Performance parameters. December 2002.
2. Sheluhin O. I., Tenyakshev A. M., Osin A. V. Fraktalnye protsessy v telekommunikatsiyakh [Fractal processes in telecommunications]. M. : Radiotekhnika, 2003. 480 s.
3. Boev V. D., Sytchenko R. P. Kompyuternoe modelirovanie. Elementy teorii i praktiki [Computer modeling. Elements of theory and practice]. Spb. : VAS, 2009. 436 s.
4. Dudnik B. Ya., Ovcharenko V. F., Orlov V. K. Nadezhnost i zhivuchest sistem svyazi [Reliability and survivability of communication systems]. M. : Radio i svyaz, 1984. 216 s.
5. Nazarov A. N., Sychev K. I. Modeli i metody rascheta pokazateley kachestva funktsionirovaniya uzlovogo oborudovaniya i strukturno-setevykh parametrov setey svyazi sleduyushchego pokoleniya [Models and methods for calculating the performance indicators for the operation of the hub equipment and the structural and network parameters of the next-generation communication networks]. Krasnoyarsk : Izd-vo ООО «Polikom», 2010. 389 s.
6. Aliev T. I. Seti EVM i telekommunikatsii : ucheb. posobie [Computer networks and telecommunications : textbook]. Spb. : SPbGU ITMO, 2011. 400 s.
7. Kanaev A. K., Kamynina M. A. Podderzhanie zadannykh pokazateley kachestva obsluzhivaniya v usloviyakh otsutstviya informatsii o vidakh anomalii v SPD [Maintaining the specified quality of service in the absence of information on the types of anomalies in the SAP] // Mater. VI Mezhdunar. kongr. nauch.-prakt. konf. «Geopoliticheskie faktory ustoychivogo razvitiya Arktiki i innovatsionnye tekhnologii prognozirovaniya

8. Канаев А. К., Сахарова М. А. Моделирование процессов обработки потоков IP-пакетов с различными типами информационных составляющих на основе глубокого анализа трафика // Бюллетень результатов научных исследований. 2014. № 3 (12). С. 85–93. eISSN 2223-9987.
9. Ануфренко А. В., Волков Д. В., Канаев А. К. Принцип организации узла агрегации мультисервисной сети связи // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : сб. науч. статей IV Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. СПб., 2015. С. 203–206.
10. Ануфренко А. В., Баранцев А. В., Канаев А. К. Обеспечение отказоустойчивости сетей связи, функционирующих на базе пакетно-ориентированных технологий : сб. тр. Юбилейн. 70-й всерос. науч.-техн. конф., посвящ. Дню радио. СПб., 2015. С. 304–306.
11. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учеб. для вузов ; 4-е изд. СПб. : Питер, 2012. 944 с.
12. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
13. Боев В. Д. Исследование адекватности GPSS World и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов : моногр. СПб. : ВАС, 2011. 404 с.
14. Бахарева Н. Ф., Тарасов В. Н. Аппроксимативные методы и модели массового обслуживания. Исследование компьютерных сетей. Самара : Изд-во СНЦ РАН, 2011. 327 с.
15. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World : учеб. пособие. СПб. : БХВ-Петербург, 2004. 368 с.
16. Модели узла агрегации в телекоммуникационной сети / А. В. Ануфренко, Е. Л. Васильев, А. К. Канаев, Д. В. Субботин : матер. II межвуз. науч.-техн. конф. «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». СПб., 2017. С. 63–65.
- и predotvrashcheniya chrezvychaynykh situatsiy», Sankt-Peterburg, 15–16 noyabrya 2013 g. SPb., 2013. S. 158–163.
8. Kanaev A. K., Sakharova M. A. Modelirovaniye protsessov obrabotki potokov IP-paketov s razlichnymi tipami informatsionnykh sostavlyayushchikh na osnove glubokogo analiza trafika [Modeling of the IP-packets stream processing for different types of components, based on the in-depth traffic analysis] // Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy. 2014. № 3 (12). S. 85–93. eISSN 2223-9987.
9. Anufrenko A. V., Volkov D. V., Kanaev A. K. Printsip organizatsii uzla agregatsii multiservisnoy seti svyazi [The principle of node aggregation multi-service communication network] // Aktualnye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii : sb. nauch. statey IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. i nauch.-metod. konf. SPb., 2015. S. 203–206.
10. Anufrenko A. V., Barantsev A. V., Kanaev A. K. Obespechenie otkazoustoychivosti setey svyazi, funktsioniruyushchikh na baze paketno-orientirovannykh tekhnologiy [Ensuring the fault tolerance of communication networks operating on the basis of packet-oriented technologies] : sb. tr. Yubileyn. 70-y vseros. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. Dnyu radio. SPb., 2015. S. 304–306.
11. Olifer V., Olifer N. Kompyuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies, protocols] : ucheb. dlya vuzov ; 4-e izd. SPb. : Piter, 2012. 944 s.
12. Aliev T. I. Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem [Fundamentals of simulation of discrete system]. SPb. : SPbGU ITMO, 2009. 363 s.
13. Boev V. D. Issledovanie adekvatnosti GPSS World i AnyLogic pri modelirovanii diskretno-sobytiynykh protsessov : monogr. [Study of the adequacy of GPSS World and AnyLogic in the simulation of discrete-event processes : monograph]. SPb. : VAS, 2011. 404 s.
14. Bakhareva N. F., Tarasov V. N. Approksimativnyye metody i modeli massovogo obsluzhivaniya. Issledovanie kompyuternykh setey [Approximation methods and queuing models. Research of computer networks]. Samara : Izd-vo SNTs RAN, 2011. 327 s.
15. Boev V. D. Modelirovaniye sistem. Instrumentalnye sredstva GPSS World : ucheb. posobie [Modeling of systems. GPSS World : textbook]. SPb. : BKhV-Peterburg, 2004. 368 s.
16. Modeli uzla agregatsii v telekommunikatsionnoy seti [Models of the aggregation node in the telecommunications network] / A. V. Anufrenko, E. L. Vasilyev, A. K. Kanaev, D. V. Subbotin : mater. II mezhvuz. nauch.-tekhn. konf. «Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennykh usloviyakh». SPb., 2017. S. 63–65.

УДК 625.1

Александр Александрович Севостьянов, контролер состояния железнодорожного пути Прокопьевской дистанции пути Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД», Прокопьевск, Россия,

Дмитрий Валерьевич Величко, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ РЕЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Alexander Alexandrovich Sevostyanov, controller of the railway track condition, Prokopyevsk Track Distance, West-Siberian Infrastructure Directorate of JSC Russian Railways, Prokopyevsk, Russia,

Dmitriy Valeryevich Velichko, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

Main causes of rail breakdowns in the operation process

Аннотация

В статье представлены результаты анализа выхода рельсов на 28 участках (общая протяженность — 406 км) Транссибирской магистрали за период с 2008 по 2015 г. в современных эксплуатационных условиях (рельсы категории Т1, бесстыковые плети длиной в перегон, высокая грузонапряженность до 110–130 млн т-км брутто/км в год, сверхнормативный пропущенный тоннаж до 1,3 млрд т брутто). Для каждого участка выявлены дефекты, по причине которых производилась замена рельсов. Определено процентное соотношение всех дефектов, проявивших себя на данных участках, отдельно по группе и коду. Установлено, что основная доля отказов приходится на дефекты 1-й и 2-й групп — соответственно 61,95 и 17,10% (5-я группа — 6,87%, все остальные группы — 14,07%). Также установлено, что наиболее распространенными причинами отказов рельсов, оказывающими влияние на срок службы верхнего строения пути, являются коды дефектов 10 (42,5%), 21 (15,1%) и 11 (13,1%). Полученные в ходе анализа данные позволяют продолжить разработку и реализацию мероприятий по предупреждению и борьбе с наиболее опасными причинами отказов рельсов и по увеличению межремонтного периода железнодорожного пути до 1500 млн т и более.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельс, выход рельсов, тоннаж, дефекты, прогнозирование отказов.

Summary

The article presents the results of the analysis of the derailing on 28 sections (total length — 406 km) of the Trans-Siberian Railway for the period from 2008 to 2015 in modern operating conditions (rails of category T1, unshielded lengths in distillation, high load strength up to 110–130 million tons-km gross / km per year, excess tonnage overdue to 1.3 billion tones gross). For each site, defects were identified, due to which the rails were replaced. The percentage of all defects that have manifested themselves in these areas is determined separately by group and code. It has been established that the main share of breakdowns is accounted for by defects of the 1st and 2nd groups, respectively 61.95 and 17.10 % (group 5 — 6.87 %, all other groups — 14.07 %). It is also established that the most common causes of rail failure that affect the service life of the track's upper structure are defect codes 10 (42.5 %), 21 (15.1 %) and 11 (13.1 %). The data obtained in the course of the analysis will allow to continue the development and implementation of measures to prevent and combat the most dangerous causes of rail breakdown and to increase the inter-repair period of the railway track to 1500 million tons or more.

Keywords: railway track, rail, derailing, tonnage, defects, breakdown forecasting.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-51-54

Рельс представляет собой самый материалоемкий элемент верхнего строения железнодорожного пути, от состояния которого в большой степени зависит обеспечение надежности всего пути [1–3]. Для выполнения стратегической задачи ОАО «РЖД» по увеличению срока службы железнодорожного пути до 1500 млн т требуется повышение эксплуатационной надежности рельсов. Соответственно необходимо знать основные причины отказов рельсов, приводящие к сокращению межремонтного периода, что позволит назначать мероприятия по снижению этих дефектов.

Анализ состояния рельсов Транссибирской магистрали проводился для участков Чулымской (ПЧ Ч) и Барабинской дистанций пути (ПЧ Б) Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры. Всего выделено 28 участков I и II пути длиной от 7 до 27 км (табл. 1 и 2). Анализ данных по замене дефектных рельсов за период 2008–2015 гг. позволил определить влияние срока эксплуатации, выраженного в пропущенном тоннаже, на количество замененных рельсов и причины этих замен. Согласно действующим нормативным документам, срок службы железнодорожного пути 1-го класса определяется по следующим критериям: пропущенный тоннаж — 750 млн т, одиночный выход рельсов — более 4 шт./км [4].

Конструкция пути рассматриваемых участков бесстыковая, рельсы Р65 категории качества Т1, исключение — участок 18, где рельсы Р65 сырые. На I пути максимальная грузонапряженность составляет 130 млн т-км брутто/км в год, на II пути — 76 млн т-км брутто/км в год. Установленная скорость движения 120 км/ч для пассажирских и 80 км/ч — для грузовых поездов.

Основная информация, необходимая для анализа, взята из следующих источников: пятой таблицы технического паспорта дистанции пути; ведомости по замене рельсов на участках с 2008 по 2015 г. (по ней определялись дефекты замененных рельсов); ведомости технического состояния бесстыкового пути.

Общая длина всех участков 406 км — 184 км на I пути и 222 км на II пути. На основе данных пятой таблицы технического паспорта дистанции пути были построены графики зависимости замены рельсов от пропущенного тоннажа (рис. 1–4).

51

Апрель – Июнь

Таблица 1

Основные эксплуатационные и технические характеристики участков I пути направления Омск — Новосибирск

№ участка	Дистанция пути	Класс, группа, категория	Грузонапряженность, млн т·км брутто/км в год	Длина участка, км	Границы участка, км	Максимальный тоннаж, млн т
1	ПЧ Ч	1А2	109	27	3206–3235	1181
2	ПЧ Ч	1А2	109	7	3278–3284	1091
3	ПЧ Ч	1А2	109	7	3270–3277	1091
4	ПЧ Ч	1А2	109	7	3237–3244	1131
5	ПЧ Ч	1А2	109	10	3249–3260	1131
6	ПЧ Ч	1А2	108,2	15	3184–3200	1284
7	ПЧ Ч	1А2	108,2	17	3162–3180	1093
8	ПЧ Б	1А2	129,7	17	3098–3116	1314
9	ПЧ Б	1А2	129,7	21	3120–3143	1226
10	ПЧ Б	1А2	129,7	12	3062–3074	1427
11	ПЧ Б	1А2	112,7	12	3020–3031	1221
12	ПЧ Б	1А2	129,7	7	3079–3085	1133
13	ПЧ Б	1А2	129,7	11	3086–3097	1206
14	ПЧ Б	1А2	129,7	14	3145–3161	1308

Таблица 2

Основные эксплуатационные и технические характеристики рассматриваемых участков II пути

№ участка	Дистанция пути	Класс, группа, категория	Грузонапряженность, млн т·км брутто/км в год	Длина участка, км	Границы участка, км	Максимальный тоннаж, млн т
15	ПЧ Ч	1Б2	76,3	24	3270–3298	1063
16	ПЧ Ч	1Б2	76,3	15	3184–3200	1061
17	ПЧ Ч	1Б2	76,3	18	3162–3180	1138
18	ПЧ Ч	1Б2	76,5	17	3206–3224	1068
19	ПЧ Ч	1Б2	76,3	19	3249–3268	1142
20	ПЧ Ч	1Б2	76,3	8	3237–3244	1030
21	ПЧ Ч	1Б2	76,3	7	3225–3232	1137
22	ПЧ Б	1Б2	76,3	12	3020–3032	649
23	ПЧ Б	1Б2	76,3	23	3050–3076	697
24	ПЧ Б	1Б2	76,3	16	3099–3116	1047
25	ПЧ Б	1Б2	76,3	12	3145–3147	621
26	ПЧ Б	1Б2	76,3	10	3038–3047	1038
27	ПЧ Б	1Б2	76,3	18	3079–3097	870
28	ПЧ Б	1Б2	76,3	23	3120–3143	1065

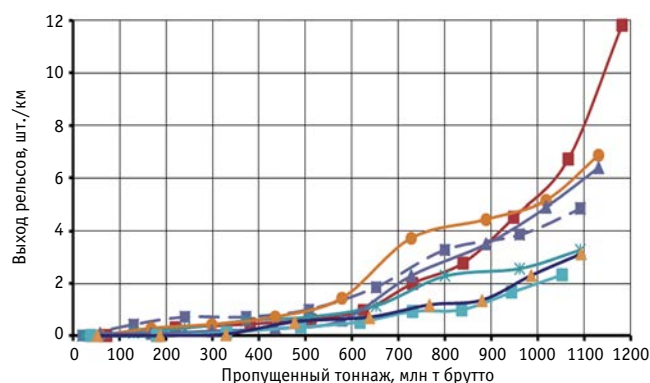


Рис. 1. Графики зависимости выхода рельсов от пропущенного тоннажа на I пути ПЧ Ч:

— 1-й участок; — 2-й участок; — 3-й участок;
— 4-й участок; — 5-й участок;
— 6-й участок; — 7-й участок

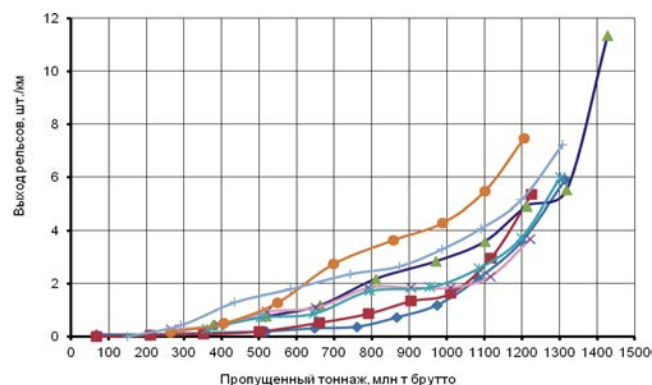


Рис. 2. Графики зависимости выхода рельсов от пропущенного тоннажа на I пути ПЧ Б:

— 8-й участок; — 9-й участок; — 10-й участок;
— 11-й участок; — 12-й участок;
— 13-й участок; — 14-й участок

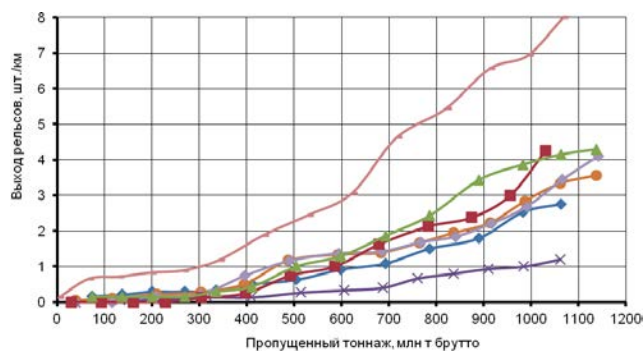


Рис. 3. Графики зависимости выхода рельсов от пропущенного тоннажа на II пути ПЧ Ч

— 15-й участок; — 16-й участок; — 17-й участок;
— 18-й участок; — 19-й участок;
— 20-й участок; — 21-й участок

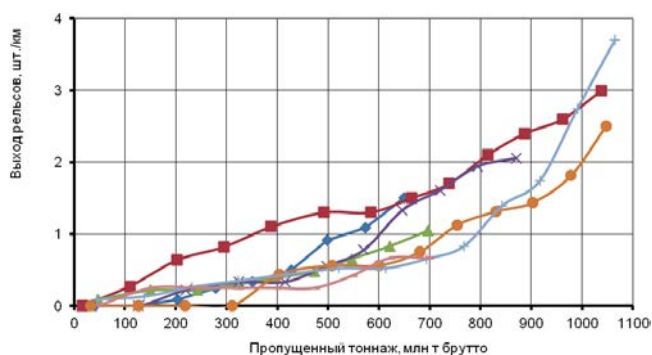


Рис. 4. Графики зависимости выхода рельсов от пропущенного тоннажа на II пути ПЧ Б

— 22-й участок; — 23-й участок; — 24-й участок;
— 25-й участок; — 26-й участок;
— 27-й участок; — 28-й участок

Анализ графиков показал, что с ростом пропущенного тоннажа существенно увеличивается число рельсов, требующих замены, и что для всех рассматриваемых участков фактический срок эксплуатации значительно превышает нормативный — достигает 1000–1200 млн т.

Характерный перелом и резкий рост выхода рельсов происходит после пропуска тоннажа в 650–750 млн т, кроме того, при пропуске тоннажа в 1200 млн т число отказов рельсов увеличивается в 3 раза по сравнению с отказами при пропуске нормативного тоннажа, что особенно характерно для участков I пути (см. рис. 1 и 2).

Для определения основных дефектов, влияющих на отказ рельсов, использовались данные по замене рельсов за период с 2008 по 2015 г. Сравнение групп дефектов [5] по I и II путям ПЧ Ч и ПЧ Б приведено на рис. 5 и 6. В целом на всех анализируемых участках доля первой группы составляет 61,95 %, второй — 17,10 %, пятой — 6,87 %, остальных групп — 14,07 %.

Как показывает процентное соотношение кодов дефектов, проявивших себя за 8 лет (рис. 7), на рассматриваемых участках преобладают дефекты первой группы. В частности, отслоение и выкрашивание металла на поверхности катания рельсов из-за недостатков или нарушения технологии изготовле-

ния рельсов при прокате (10.1 и 10.2) составляет 42,56 % от всех дефектов; поперечные трещины головки рельса вследствие неоднородности рельсовой стали (21.1) — 15,08 %; выкрашивание металла на боковой рабочей выкружке головки за счет недостаточной контактно-усталостной прочности металла, а также недостаточного качества рельсовой стали (11.1 и 11.2) — 13,13 %.

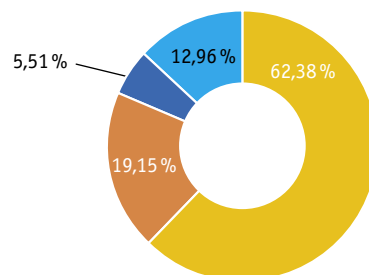


Рис. 5. Основные группы дефектов на I пути (1–14-й участки):

■ — 1-я группа; ■ — 2-я группа; ■ — 5-я группа; ■ — прочие

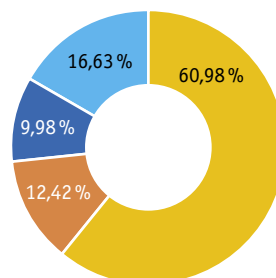


Рис. 6. Основные группы дефектов на II пути (15–28-й участки):

■ — 1-я группа; ■ — 2-я группа; ■ — 5-я группа; ■ — прочие

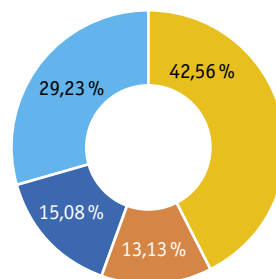


Рис. 7. Основные коды дефектов на всех рассматриваемых участках:

■ — 10-й код; ■ — 11-й код; ■ — 21-й код; ■ — прочие

Поскольку в основном к отказу рельсов на исследованных участках приводят дефекты 1-й и 2-й групп, построены графики средней годовой интенсивности выхода рельсов по причине данных дефектов, как зависящих, так и не зависящих от пропущенного тоннажа (рис. 8). Установлено, что средний выход рельсов из-за дефектов 1-й и 2-й групп имеет одну и ту же динамику, однако влияние дефектов 1-й группы значительно больше. В частности, при пропуске тоннажа в 700 млн т разница между числом дефектов 1-й и 2-й групп составляет 31 %, а при пропуске 1100 млн т — 76 %.

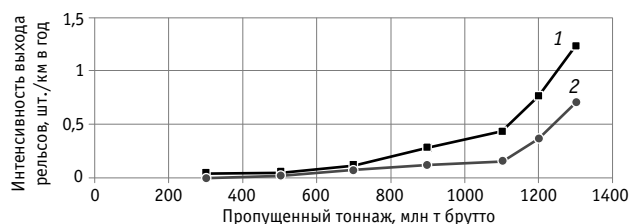


Рис. 8. Средняя годовая интенсивность выхода рельсов по причине дефектов 1-й (1) и 2-й (2) группы

ВЫВОДЫ

В результате анализа 28 участков по обоим путям Транссибирской магистрали определено, что в современных эксплуатационных условиях (рельсы категории Т1, бесстыковые плети длиной в перегон, высокая грузонапряженность до 110–130 млн т-км брутто/км в год, сверхнормативный пропущенный тоннаж до 1,3 млрд т брутто) основной причиной отказов рельсов являются дефекты 1-й и 2-й группы — соответственно 61,95 и 17,10% (5-я группа — 6,87%, все остальные группы — 14,07%).

Установлено, что наиболее распространенными причинами отказов рельсов являются: код дефекта 10.1 и 10.2 — отслоение и выкрашивание металла на поверхности ката-

ния рельсов из-за недостатков или нарушения технологии изготовления рельсов при прокате (42,56%); код дефекта 21.1 — поперечные трещины головки рельса вследствие неоднородности рельсовой стали (15,08%); код дефекта 11.1 и 11.2 — выкрашивание металла на боковой рабочей выкружке головки за счет недостаточной контактно-усталостной прочности металла, а также недостаточного качества рельсовой стали (13,13%).

Кроме того, выявлены зависимости средней годовой интенсивности отказов рельсов по дефектам 1-й и 2-й группы от периода эксплуатации (300–1300 млн т), показывающие резкий рост отказов при пропуске сверхнормативного тоннажа. В частности, среднегодовая интенсивность отказов рельсов из-за дефектов 1-й группы выросла в 4 раза (с 0,1 шт./км при 700 млн т до 0,4 шт./км при 1100 млн т).

На основании полученных в ходе анализа данных следует, что для увеличения срока службы железнодорожного пути (до 1500 млн т и более) необходимо продолжить осуществление комплекса мероприятий (использование новых технологий производства рельсов, новых марок рельсовой стали, улучшение геометрических характеристик рельсов, увеличение длины рельсов до 50–100 м и более и т. п.), направленных на предупреждение и борьбу с выявленными наиболее опасными причинами отказов рельсов.

Литература

1. Карпушенко Н. И., Величко Д. В. Обеспечение надежности железнодорожного пути и безопасности движения поездов / СГУПС. Новосибирск, 2008. 321 с.
2. Карпушенко Н. И., Величко Д. В. Проблемы рельсового хозяйства // Вестник СГУПС. 2006. № 14. С. 37–48. ISSN 1815-9265.
3. Карпушенко Н. И., Труханов П. С. Оценка и прогнозирование надежности рельсов в различных эксплуатационных условиях // Известия Транссиба. 2016. № 2 (26). С. 118–126. ISSN 2220-4245.
4. Положение о системе ведения путевого хозяйства ОАО «Российские железные дороги»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 31.12.2015 г. № 3212р. М., 2016. 96 с.
5. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 г. № 2499р. М., 2014. 140 с.

References

1. Karpushchenko N. I., Velichko D. V. Obespechenie nadezhnosti zheleznodorozhnogo puti i bezopasnosti dvizheniya poezdov [Ensuring reliability of a railway track and traffic safety of trains] / SGUPS. Novosibirsk, 2008. 321 s.
2. Karpushchenko N. I., Velichko D. V. Problemy relsovogo khozyaystva [Problems of rail facilities] // Vestnik SGUPS. 2006. № 14. S. 37–48. ISSN 1815-9265.
3. Karpushchenko N. I., Trukhanov P. S. Otsenka i prognozirovaniye nadezhnosti relsrov v razlichnykh ekspluatatsionnykh usloviyakh [Assessment and forecasting of reliability of rails in various operational conditions] // Izvestiya Transsiba. 2016. № 2 (26). S. 118–126. ISSN 2220-4245.
4. Polozhenie o sisteme vedeniya putevogo khozyaystva OAO «Rossiyskie zheleznnye dorogi»: utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 31.12.2015 g. № 3212r [Regulations on the system of track maintenance of JSC Russian Railways: approved by the order of JSC Russian Railways of 31.12.2015 № 3212r]. M., 2016. 96 s.
5. Defekty relsrov. Klassifikatsiya, katalog i parametry defektnykh i ostrdefektnykh relsrov: utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 23.10.2014 g. № 2499r [Defects of rails. Classification, catalog and parameters of defective and highly defective rails: approved by the order of JSC Russian Railways of 23.10.2014 № 2499r]. M., 2014. 140 s.

УДК 621.331: 629.4

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

Александр Сергеевич Вильгельм, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», старший научный сотрудник научно-исследовательской части Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ НА УРОВЕНЬ ПОТЕРЬ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

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,

Alexander Sergeyevich Vilgelm, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Senior Researcher, Research Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Influence of the recovery energy on the level of losses in the traction power supply system

Аннотация

Введено понятие коэффициента разности потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения, приобретаемой у энергоснабжающих организаций, для случаев работы участка железной дороги с применением и без применения рекуперативного торможения. Описана методика определения данного коэффициента, который является критерием, определяющим характер влияния рекуперации на потери энергии в системе тягового электроснабжения. Выполнен корреляционный анализ, позволивший составить перечень факторов, от которых зависит величина потерь энергии при применении рекуперации. Получено эмпирическое уравнение регрессии для определения коэффициента разности потерь энергии. Проанализирован характер влияния рекуперации на величину потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения, приобретаемой у энергоснабжающих организаций, для участков постоянного и переменного тока.

Ключевые слова: энергия рекуперации, система тягового электроснабжения, потери энергии, энергетическая эффективность, тяговые расчеты.

Summary

The concept of the difference coefficient in electric energy losses in the traction power supply system purchased from power supply organizations was introduced for the cases of a railway section operation with and without the use of regenerative braking. The technique for determining this coefficient, which is the criterion determining the nature of the recuperation effect on energy losses in the traction power supply system, is described. A correlation analysis has been performed, which made it possible to determine the list of factors that affect the amount of energy loss when using recuperation. An empirical regression equation was obtained to determine the coefficient of the energy loss difference. The character of the recuperation effect on the amount of electricity losses in the traction power supply system purchased from power supply organizations, for DC and AC sections is analyzed.

Keywords: energy recovery, traction power supply system, energy losses, energy efficiency, traction calculations.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-55-60

Рекуперативное торможение получило широкое распространение на сети электрифицированных железных дорог как средство обеспечения безопасности движения поездов и как средство повышения энергетической эффективности железнодорожного транспорта. Проведенные теоретические исследования и натурные эксперименты [1, с. 22–39] позволили выявить факторы, влияющие на возможность применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации [2], разработать методическую базу для оценки потенциала применения рекуперативного торможения по участкам [3], определения энергетической [4] и экономической [5] эффективности использования энергии рекуперации.

Необходимо понимать, что энергия рекуперации, генерируемая тяговыми двигателями электроподвижного состава (ЭПС), в первую очередь расходуется на питание его электрических машин собственных нужд. Та часть энергии рекуперации, которая учтена счетчиками рекуперации на рекупирующем ЭПС, расходуется на тягу других поездов, а при возврате энергии на тяговые подстанции расходуется на их собственные нужды, а также расходуется железнодорожными и сторонними потребителями, получающими питание от электросетей районов электроснабжения и линий продольного электроснабжения. Кроме того, в отдельных случаях имеет место возврат энергии рекуперации в систему внешнего электроснабжения.

Анализ статистической отчетности ОАО «РЖД» о расходе электроэнергии на тягу поездов показывает, что с увеличением применения рекуперативного торможения на участках железных дорог уровень потерь в тяговой сети возрастает, что подтверждается результатами имитационного моделирования [6]. Это объясняется появлением дополнительных потерь от протекания энергии рекуперации. Однако при оценке энергетической и экономической эффективности использования энергии

рекуперации необходимо определить, насколько изменяются потери от протекания в элементах системы тягового электро-снабжения (СТЭ) электроэнергии, приобретенной у энерго-снабжающих организаций по счетчикам тяговых подстанций, иными словами, потери оплаченной электроэнергии.

Организация натурных экспериментов по оценке потерь электроэнергии в элементах СТЭ для случаев применения и неприменения рекуперативного торможения требует наличия синхронизированных по времени систем учета электроэнергии на фидерах контактной сети тяговых подстанций и ЭПС, а также наличия на ЭПС систем GPS/ГЛОНАСС для обеспечения контроля его месторасположения в границах межподстанционных зон в любой момент времени. Концепция создания такой системы, называемой автоматизированной системой мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса (АСМЭПП), рассмотрена в [7], а результаты апробации ее применения на участке Шалы — Подволошная Свердловской железной дороги приведены в [8]. Однако внедрение АСМЭПП является затратным мероприятием как по времени, так и по финансам. Кроме того, даже при условии ее внедрения временный отказ от применения рекуперативного торможения на участках железных дорог приведет к увеличению расхода электроэнергии на тягу поездов. Поэтому наиболее целесообразно выполнять оценку влияния энергии рекуперации на потери в СТЭ расчетно-аналитическим путем.

Среди существующих аппаратно-программных средств, позволяющих решить данную задачу, можно выделить программный комплекс КОРТЭС, обладающий рядом преимуществ перед другими известными средствами для имитационного моделирования работы СТЭ [1, с. 17–22]. Предложенная в [4] методика оценки эффективности использования энергии рекуперации содержит алгоритм, позволяющий оценить влияние протекания энергии рекуперации в элементах СТЭ на уровень потерь в ней. Концепция методики сводится к последовательному выделению эффективных составляющих использования энергии рекуперации и потерь энергии рекуперации. Осуществляется это посредством введения ряда коэффициентов, используя которые пользователь методики распределяет величину отчетного объема рекуперации на расчетном участке по составляющим. К данным коэффициентам относятся:

коэффициент эффективности использования энергии рекуперации за вычетом потерь в тяговой сети;

коэффициент возврата энергии рекуперации на тяговые подстанции;

коэффициент потерь энергии рекуперации в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций (для участков постоянного тока);

коэффициент использования электрических машин собственных нужд ЭПС;

коэффициент времени в режиме рекуперативного торможения.

С помощью этих коэффициентов определяется доля энергии рекуперации, потребленная на собственные нужды рекуперирующего ЭПС и не учтенная его счетчиками рекуперации, доля энергии рекуперации, потребленная другими ЭПС на участке, а также доля энергии, возвращенной на тяговые подстанции

участка. Кроме того, для участков постоянного тока аналитическим путем высчитываются величины возврата энергии рекуперации по присоединениям шин 6/10 кВ (ЛПЭ, ТСН и др.) и возврата энергии рекуперации по вводам высшего напряжения тяговых подстанций в систему внешнего электроснабжения. Для участков переменного тока аналогично определяется возврат энергии рекуперации по присоединениям шин 27,5 кВ, возврат энергии рекуперации по вводам 6/10/35 кВ и возврат части энергии рекуперации по вводам высшего напряжения тяговых подстанций в систему внешнего электроснабжения.

Таким образом, абсолютное значение полезного (эффективного) использования энергии рекуперации на участке постоянного тока складывается из следующих составляющих, кВт·ч:

$$W_{\text{рек}}^{\text{эф}} = W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС с.н}} + W_{\text{рек}}^{\text{ЭПСдр}} + \sum_n W_{\text{рек}}^{\text{CH6/10n}} + \sum_n W_{\text{рек}}^{\text{ВНn}} + (\Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{СТЭ}} - \Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{СТЭ}}), \quad (1)$$

где $W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС с.н}}$ — величина энергии рекуперации, потребленная на собственные нужды рекуперирующего ЭПС;

$W_{\text{рек}}^{\text{ЭПСдр}}$ — величина энергии рекуперации, потребленная на тягу другим ЭПС на участке;

$\sum_n W_{\text{рек}}^{\text{CH6/10n}}$ — величина возвращенной на тяговые подстанции энергии рекуперации, отпущенной железнодорожным и сторонним потребителям электроэнергии по присоединениям шин 6/10 кВ (ЛПЭ, ТСН и др.) тяговых подстанций участка;

$\sum_n W_{\text{рек}}^{\text{ВНn}}$ — величина энергии рекуперации, возвращенной на тяговые подстанции по вводам высшего напряжения тяговых подстанций в систему внешнего электроснабжения;

$(\Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{СТЭ}} - \Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{СТЭ}})$ — разность потерь энергии в СТЭ от протекания оплаченной по счетчикам тяговых подстанций электроэнергии для случаев с применением и без применения рекуперативного торможения.

Для участков переменного тока абсолютное значение полезного (эффективного) использования энергии рекуперации складывается из следующих составляющих, кВт·ч:

$$W_{\text{рек}}^{\text{эф}} = W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС с.н}} + W_{\text{рек}}^{\text{ЭПСдр}} + \sum_n W_{\text{рек}}^{\text{CH27,5n}} + \sum_n W_{\text{рек}}^{\text{CH6/10/35n}} + \sum_n W_{\text{рек}}^{\text{ВНn}} + (\Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{СТЭ}} - \Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{СТЭ}}), \quad (2)$$

где $\sum_n W_{\text{рек}}^{\text{CH27,5n}}$ — величина возвращенной на тяговые подстанции энергии рекуперации, отпущенной по присоединениям шин 27,5 кВ тяговых подстанций участка;

$\sum_n W_{\text{рек}}^{\text{CH6/10/35n}}$ — величина возвращенной на тяговые подстанции энергии рекуперации, отпущенной по вводам 6/10/35 кВ тяговых подстанций участка.

Разность потерь энергии $(\Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{СТЭ}} - \Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{СТЭ}})$ можно определить расчетным путем при помощи выполнения двух идентичных расчетов с одинаковыми тяговыми расчетами (отлича-

ющимися наличием или отсутствием рекуперации), графиками движения поездов и принятыми параметрами СТЭ. Далее целесообразно ввести коэффициент, характеризующий разность потерь энергии в СТЭ для двух видов расчета, и после выполнения множества аналогичных расчетов с различными параметрами тяговых расчетов, графиков движения поездов и устройств СТЭ с помощью корреляционного анализа установить степень влияния различных факторов на коэффициенты, определяющие эффективность использования энергии рекуперации на участке, в том числе и коэффициент разности потерь.

Исходя из принципиального отличия процессов распределения энергии рекуперации и потерь энергии для участков постоянного и переменного тока, однопутных и двухпутных участков следует сформировать несколько отдельных расчетных моделей по вышеописанному принципу.

С этой целью в программном комплексе КОРТЭС отдельно для участков постоянного и переменного тока, однопутных и двухпутных участков были созданы расчетные модели на основе тяговых расчетов, по результатам которых фиксировались параметры для грузового, пассажирского и пригородного движения в четном и нечетном направлении: серии ЭПС, массы составов, время чистого движения поезда по участку, время стоянок поезда на участке, техническая и участковая скорости движения поездов, расход энергии и рекуперация, коэффициент (доля) времени в режиме рекуперации по отношению к общему времени движения поезда по участку.

Все указанные параметры варьировались в максимально возможных диапазонах. Далее на каждый тяговый расчет составлено по два одинаковых графика движения поездов — один с учетом применения рекуперации, другой без рекуперации. Размеры движения в созданных графиках также варьировались в диапазоне от минимального количества поездов на участке до максимального по пропускной способности, которая определяется заданными параметрами СТЭ. К параметрам СТЭ, влияние которых анализировалось при разработке методики, можно отнести тип контактной подвески, коэффициент резерва контактного провода на участках постоянного тока, схему питания межподстанционных зон, характеристики трансформаторов тяговых подстанций, количество тяговых подстанций с ВИП на участках постоянного тока.

При этом первые три параметра учитывались через среднее сопротивление контактной сети участка, характеристики трансформаторов — через мощность потерь холостого хода и короткого замыкания, а количество ВИП от расчета к расчету изменялось от нуля до значения числа тяговых подстанций участка.

Каждое изменение вышеуказанных параметров сопровождалось выполнением двух электрических расчетов — с использованием графика движения поездов с рекуперацией и без рекуперации. По результатам расчетов фиксировались значения расхода и возврата энергии по счетчикам тяговых подстанций, значения потерь в контактной сети и трансформаторах с разделением потерь энергии от расхода на тягу и от протекания тока рекуперации.

Разность потерь энергии в СТЭ для случаев с применением и без применения рекуперативного торможения для каждой пары расчетов определялась по формуле, кВт·ч:

$$(\Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{СТЭ}} - \Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{СТЭ}}) = \Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{КС}} + \Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{Тр.нагр}} + \Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{Тр.х.х}} - \Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{КС}} - \Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{Тр.нагр}} - \Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{Тр.х.х}}, \quad (3)$$

где $\Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{КС}}$ и $\Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{КС}}$ — величина потерь энергии в контактной сети участка соответственно для случаев без применения и с применением рекуперации;

$\Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{Тр.нагр}}$ и $\Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{Тр.нагр}}$ — величина нагрузочных потерь энергии в трансформаторах тяговых подстанций участка соответственно для случаев без применения и с применением рекуперации;

$\Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{Тр.х.х}}$ и $\Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{Тр.х.х}}$ — величина потерь холостого хода в трансформаторах тяговых подстанций участка соответственно для случаев без применения и с применением рекуперации.

В величинах $\Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{КС}}$, $\Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{Тр.нагр}}$, $\Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{Тр.х.х}}$ учитывались только потери от передачи энергии от тяговых подстанций поездам в режиме тяги.

Далее наряду с коэффициентами, определяющими эффективность использования энергии рекуперации, о которых говорилось выше, вводилось понятие коэффициента разности потерь оплаченной энергии в случаях с применением и без применения рекуперации, который для каждой пары расчетов определяется по формуле

$$k_{\Delta \text{пот}}^{\text{СТЭ}} = \frac{(\Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{СТЭ}} - \Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{СТЭ}})}{W_{\text{рек}} \cdot (1 - k_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}}) + \Delta W_{\text{рек}}^{\text{Тр}}}, \quad (4)$$

где $W_{\text{рек}}$ — величина энергии рекуперации на участке, эффективность использования которой оценивается по предлагаемой методике, кВт·ч;

$k_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}}$ — коэффициент эффективности использования энергии рекуперации за вычетом потерь в контактной сети;

$\Delta W_{\text{рек}}^{\text{Тр}}$ — величина потерь энергии рекуперации в трансформаторах тяговых подстанций участка, кВт·ч.

По результатам корреляционного анализа влияния расчетных параметров на коэффициент $k_{\Delta \text{пот}}^{\text{СТЭ}}$ были определены влияющие факторы и соответствующие эмпирические коэффициенты для них, используемые в уравнении регрессии вида

$$k_{\Delta \text{пот}}^{\text{СТЭ}} = l + \sum_i (q_i \cdot X_i^{\text{СТЭ}}), \quad (5)$$

где l , q_i — эмпирические коэффициенты для i -го влияющего фактора $X_i^{\text{СТЭ}}$.

Перечень анализируемых факторов и степень их корреляции с коэффициентом $k_{\Delta \text{пот}}^{\text{СТЭ}}$ для участков переменного тока представлены в табл. 1, для участков постоянного тока — в табл. 2.

Необходимо пояснить, что в табл. 1 и 2 сложным считается более энергозатратное для движения поездов направление расчетного участка (четное или нечетное) по характеристикам профиля пути. В предлагаемой методике средние массы грузовых поездов учитываются отдельно для сложного и легкого направления движения поездов.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции и наблюдаемые значения критерия между коэффициентом $k_{\Delta\text{пот}}^{\text{СТЭ}}$ и влияющими факторами для участков переменного тока

Влияющий фактор	Коэффициенты корреляции q_i (наблюдаемые значения критерия $T_{\text{набл}}$)	
	для двухпутных участков	для однопутных участков
Массы грузовых поездов в легком направлении	–0,59 (7,12)	–0,03 (0,26)
Массы грузовых поездов в сложном направлении	–0,32 (3,29)	–0,26 (2,36)
Средняя техническая скорость в грузовом движении	0,59 (7,12)	0,22 (1,98)
Средняя участковая скорость в грузовом движении	0,54 (6,25)	0,24 (2,17)
Суммарные размеры движения поездов	0,58 (6,94)	–0,74 (9,65)
Размеры движения поездов в грузовом движении	0,65 (8,34)	–0,71 (8,85)
Тип контактной подвески	0,22 (2,20)	–0,2 (1,79)
Схема питания межподстанционных зон	–0,33 (3,41)	–0,12 (1,06)

Таблица 2

Коэффициенты корреляции и наблюдаемые значения критерия между коэффициентом $k_{\Delta\text{пот}}^{\text{СТЭ}}$ и влияющими факторами для участков постоянного тока

Влияющий фактор	Коэффициенты корреляции q_i (наблюдаемые значения критерия $T_{\text{набл}}$)	
	для двухпутных участков	для однопутных участков
Массы грузовых поездов в легком направлении	–0,39 (4,19)	–0,31 (2,61)
Массы грузовых поездов в сложном направлении	–0,31 (3,23)	–0,15 (1,21)
Средняя техническая скорость в грузовом движении	0,38 (4,07)	0,37 (3,19)
Средняя участковая скорость в грузовом движении	0,26 (2,67)	0,32 (2,70)
Суммарные размеры движения поездов	0,55 (6,52)	–0,09 (0,72)
Размеры движения поездов в грузовом движении	0,56 (6,69)	0,05 (0,40)
Тип контактной подвески	0,45 (4,99)	0,19 (1,55)
Схема питания межподстанционных зон	–0,06 (0,60)	0,05 (0,40)

Для определения коэффициента $k_{\Delta\text{пот}}^{\text{СТЭ}}$ по формуле (5) необходимо учитывать основные влияющие факторы, у которых наблюдаемые значения критерия превышают значение критической точки 1,94 (см. табл. 1 и 2) для уровня значимости $\alpha = 0,05$ двухсторонней критической области по таблице критических точек распределения Стьюдента.

Для полученных уравнений регрессии (5) коэффициент детерминации R^2 составил:

для двухпутных участков переменного тока $R^2 = 0,56$;

для однопутных участков переменного тока $R^2 = 0,69$;

для двухпутных участков постоянного тока $R^2 = 0,42$;

для однопутных участков постоянного тока $R^2 = 0,39$.

На рис. 1 представлены результаты расчетов коэффициента $k_{\Delta\text{пот}}^{\text{СТЭ}}$ по имитационной модели и уравнению регрессии для однопутных и двухпутных участков постоянного и переменного тока в отдельности. Очевидно, что положительные значения рассчитанного коэффициента говорят о положительном значении разности потерь оплаченной электроэнергии ($\Delta W_{\text{без рек.}}^{\text{СТЭ}} - \Delta W_{\text{с рек.}}^{\text{СТЭ}}$), т. е. об увеличении технических потерь энергии в СТЭ при отсутствии рекуперативного торможения на участке при прочих равных условиях.

Исходя из полученных результатов (см. рис. 1) можно сделать следующий вывод: для однопутных участков постоянного тока во всех расчетных случаях разность потерь имеет положительное значение, а для двухпутных участков постоянного тока отрицательные значения $k_{\Delta\text{пот}}^{\text{СТЭ}}$ зафиксированы лишь в четырех случаях из ста, что свидетельствует об очевидном сокращении технических потерь энергии в элементах СТЭ при применении рекуперации на участках постоянного тока.

Для участков переменного тока количество отрицательных значений $k_{\Delta\text{пот}}^{\text{СТЭ}}$ существенно больше, а следовательно, выше потери в элементах СТЭ при применении рекуперативного торможения (см. рис. 1): для двухпутных участков — 15 значений из 97 расчетов (15,5%), для однопутных — 30 значений из 79 расчетов (38,0%). Объяснить это можно в первую очередь большей длиной межподстанционных зон на участках переменного тока в сравнении с участками постоянного тока, что в совокупности с применением рекуперации и определенным сочетанием других факторов может отрицательно влиять на величину потерь энергии в СТЭ. Кроме того, применение рекуперации электровозами переменного тока приводит к росту потребления реактивной энергии, соответственно к росту потребления полной энергии, а также к снижению коэффициента мощности и, как следствие, к росту потерь активной энергии, что и является логичным объяснением отрицательных значений коэффициента $k_{\Delta\text{пот}}^{\text{СТЭ}}$ для участков переменного тока.

Проверка гипотезы о нормальном распределении выборок полученных значений изменений потерь для четырех рассматриваемых случаев выполнена с помощью критерия Пирсона. Во всех случаях уровень значимости был принят 0,05, а число степеней свободы равным шести. При этом для двухпутных участков постоянного тока (рис. 2) наблюдаемое значение критерия составило $\chi_{\text{набл}}^2 = 7,73$, т. е. меньше критического $\chi_{\text{крит}}^2 = 12,59$, и говорит о том, что гипотеза о нормальном законе распределения принимается.

Таким образом, применение рекуперативного торможения на двухпутных участках постоянного тока может в определенных случаях приводить к росту технологических потерь до 2,0% или снижению их на величину до 15,6%. При этом математическое ожидание выборки полученных расчетных значений составило 6,3% сокращения потерь энергии в СТЭ при применении рекуперации, среднеквадратическое отклонение $\pm 3,9\%$.

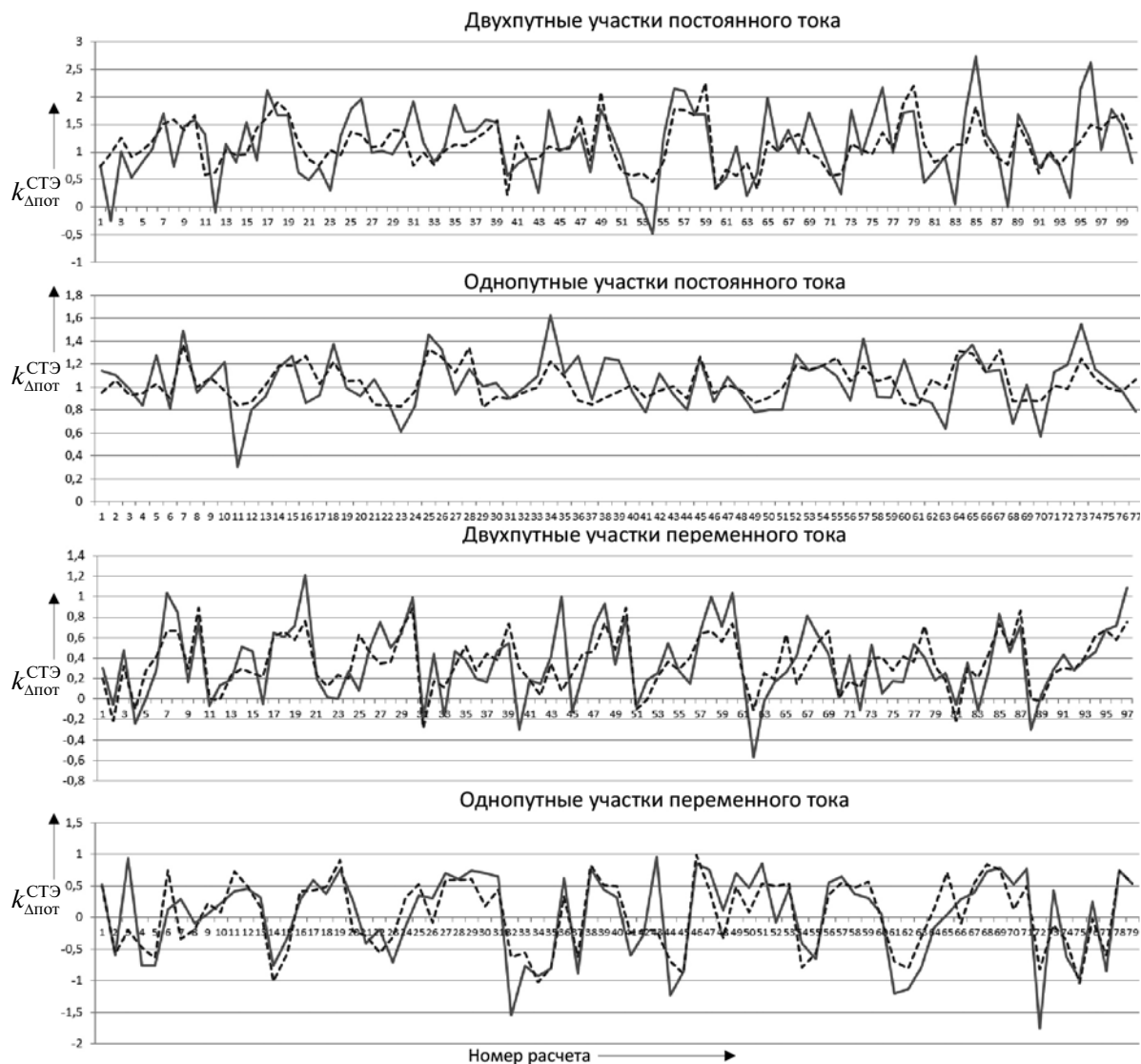


Рис. 1. Результаты расчетов коэффициента $k_{\Delta_{пот}}^{СТЭ}$ по имитационной модели и уравнению регрессии:
 — расчет по имитационной модели; ---- расчет по уравнению регрессии

На двухпутных участках переменного тока увеличение потерь может достигать 4,3 %, а снижение — 6,1 %. Наблюдаемое значение критерия составило $\chi^2_{набл} = 6,39$, что также меньше критического $\chi^2_{крит} = 12,59$. Математическое ожидание выборки полученных расчетных значений составило 2,4 % сокращения потерь энергии в СТЭ при применении рекуперации, среднеквадратическое отклонение $\pm 2,5$ %.

Аналогично на однопутных участках постоянного тока снижение потерь в СТЭ при применении рекуперативного торможения составляет от 1,5 до 21,7 % от уровня потерь электроэнергии без применения рекуперативного торможения. Наблюдаемое значение критерия $\chi^2_{набл} = 1,03$ меньше критического $\chi^2_{крит} = 12,59$. Математическое ожидание выборки полученных расчетных значений составило 10,8 % сокращения потерь энергии в СТЭ при применении рекуперации, среднеквадратическое отклонение $\pm 4,5$ %.

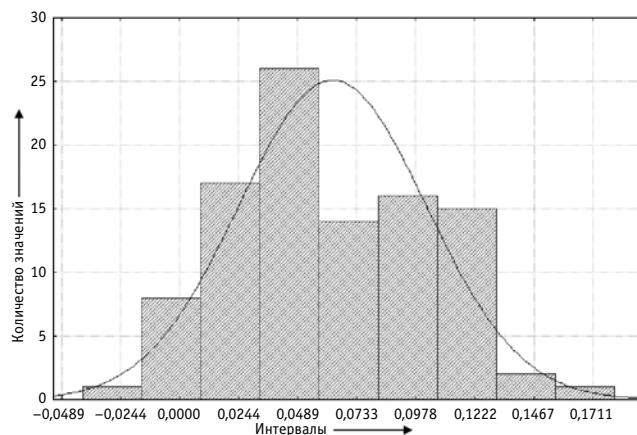


Рис. 2. Распределение относительных величин изменения потерь энергии в СТЭ при применении рекуперации

На однопутных участках переменного тока может наблюдаться рост потерь на величину до 11,2% или снижение на 8,6%. Наблюдаемое значение критерия $\chi^2_{\text{набл}} = 8,34$ меньше критического $\chi^2_{\text{крит}} = 12,59$. Математическое ожидание выборки полученных расчетных значений составило 0,5% сокращения потерь энергии в СТЭ при применении рекуперации, среднеквадратическое отклонение $\pm 3,9\%$.

ВЫВОДЫ

1. Предложена концепция анализа эффективности использования энергии рекуперации, предполагающая последовательное выделение ее составляющих за счет введения соответствующих коэффициентов, определенных путем имитационного моделирования, что позволяет выполнять оценку эффективности использования энергии рекуперации на основании отчетных данных об объеме рекуперации на участке.

2. Выполнено имитационное моделирование взаимодействия СТЭ и электроподвижного состава при наличии и отсутствии рекуперативного торможения для однопутных и двухпутных участков постоянного и переменного тока при изменении в максимально широком диапазоне характеристик оборудова-

ния тяговых подстанций, контактной сети и параметров размеров движения поездов.

3. Получены эмпирические коэффициенты, используемые в уравнениях регрессии, определяющих величину изменения потерь в СТЭ электроэнергии, оплаченной по счетчикам тяговых подстанций, для случаев с применением и без применения рекуперации для однопутных и двухпутных участков постоянного и переменного тока. Коэффициенты детерминации R^2 при этом составили для двухпутных участков переменного тока 0,56, для однопутных участков переменного тока — 0,69, для двухпутных участков постоянного тока — 0,42, для однопутных участков постоянного тока — 0,39.

4. По результатам имитационного моделирования определены диапазоны и законы распределения величин изменения потерь в СТЭ электроэнергии, оплаченной по счетчикам тяговых подстанций, при применении рекуперативного торможения. В среднем снижение уровня потерь оплаченной электроэнергии в СТЭ при применении рекуперации ожидается:

для двухпутных участков постоянного тока — на 6,3%;
однопутных участков постоянного тока — на 10,8%;
двухпутных участков переменного тока — на 2,4%;
однопутных участков переменного тока — на 0,5%.

Литература

1. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на полигоне постоянного тока : моногр. / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, А. С. Вильгельм. Омск : ОмГУПС, 2016. 176 с.
2. Черемисин В. Т., Никифоров М. М., Вильгельм А. С. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации // Известия Транссиба. 2016. № 1 (25). С. 60–70. ISSN 2220-4245.
3. Никифоров М. М., Каштанов А. Л., Кандаев В. А. Методика оценки потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения // Известия Транссиба. 2012. № 1. С. 72–78. ISSN 2220-4245.
4. Черемисин В. Т., Никифоров М. М., Вильгельм А. С. Основные положения методики оценки эффективности использования энергии рекуперации // Вестник РГУПС. 2017. № 1 (65). С. 114–120. ISSN 0201-727X.
5. Черемисин В. Т., Никифоров М. М., Вильгельм А. С. Методика расчета экономической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 95–99. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-95-99. ISSN 1815-9400.
6. Черемисин В. Т., Тарута П. В. Анализ влияния рекуперации электрической энергии на технологические потери в системе тягового электроснабжения постоянного тока // Улучшение качества и снижение потерь электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог : межвуз. темат. сб. науч. тр. / ОмГУПС. Омск, 2004. С. 66–71.
7. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, Д. В. Пашков, М. М. Никифоров // Железнодорожный транспорт. 2015. № 3. С. 45–49. ISSN 0044-4448.
8. Никифоров М. М. Аprobация технологии функционирования автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса // Инновации в системах обеспечения движения поездов : матер. I Междунар. науч.-практ. конф. Самара : Изд-во СамГУПС, 2016. С. 70–73.

References

1. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti rekupeativnogo tormozheniya na poligone postoyannogo toka : monogr. [Increasing the energy efficiency of regenerative braking at the DC range : monograph] / V. T. Cheremisin, M. M. Nikiforov, A. L. Kashtanov, A. S. Vilgelm. Omsk : OmGUPS, 2016. 176 s.
2. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Metodologiya otsenki energeticheskoy effektivnosti primeneniya rekupeativnogo tormozheniya i ispolzovaniya energii rekupeatsii [Methodology for assessing the energy efficiency of regenerative braking the use and energy recovery] // Izvestiya Transsiba. 2016. № 1 (25). S. 60–70. ISSN 2220-4245.
3. Nikiforov M. M., Kashtanov A. L., Kandaev V. A. Metodika otsenki potentsiala energoeffektivnosti primeneniya rekupeativnogo tormozheniya [Method of assessment of potential energy regenerative braking] // Izvestiya Transsiba. 2012. № 1. S. 72–78. ISSN 2220-4245.
4. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Osnovnye polozheniya metodiki otsenki effektivnosti ispolzovaniya energii rekupeatsii [Main thesis of methodology for assessing useful energy recovery efficiency] // Vestnik RGUPS. 2017. № 1 (65). S. 114–120. ISSN 0201-727X.
5. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Metodika rascheta ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya rekupeativnogo tormozheniya i ispolzovaniya energii rekupeatsii [Calculation of economic efficiency of regeneration braking application and use of regeneration energy] // Transport Urala. 2016. № 3 (50). S. 95–99. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-95-99. ISSN 1815-9400.
6. Cheremisin V. T., Taruta P. V. Analiz vliyaniya rekupeatsii elektricheskoy energii na tekhnologicheskie poteri v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka [Analysis of the effect of the recovery of electrical energy on technological losses in the traction supply system of direct current] // Uluchshenie kachestva i snizhenie poter elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog : mezhvuz. temat. sb. nauch. tr. / OmGUPS. Omsk, 2004. S. 66–71.
7. Etapy realizatsii avtomatizirovannoy sistemy monitoringa energoeffektivnosti perevoznogo protsessa [Stages of implementation of an automated system for monitoring the energy efficiency of the transportation process] / V. T. Cheremisin, S. Yu. Ushakov, D. V. Pashkov, M. M. Nikiforov // Zheleznodorozhnyy transport. 2015. № 3. S. 45–49. ISSN 0044-4448.
8. Nikiforov M. M. Aprobatsiya tekhnologii funktsionirovaniya avtomatizirovannoy sistemy monitoringa energoeffektivnosti perevoznogo protsessa [Approval of the technology of functioning of the automated system for monitoring the energy efficiency of the transportation process] // Innovatsii v sistemakh obespecheniya dvizheniya poezdov : mater. I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Samara : Izd-vo SamGUPS, 2016. S. 70–73.

УДК 629.423.3

Алексей Владимирович Владыкин, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Николай Олегович Фролов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МЕТРО С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ

Alexey Vladimirovich Vladyskin, postgraduate student, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikolay Olegovich Frolov, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Determination of efficiency of operating activity of the subway from the point of view of energy consumption by driving mobility composition

Аннотация

Повышение энергоэффективности подвижного состава является актуальной задачей, вместе с тем оценка качества текущего использования подвижного состава нередко требует выполнения большого количества расчетов. В статье на основе анализа данных по энергопотреблению электропоездов и пассажиропотоку метрополитена предложен быстрый способ определения текущей эффективности использования подвижного состава, позволяющий выводить в эксплуатацию оптимальное количество единиц вагонов метро.

Ключевые слова: метрополитен, электропоезд, эффективность использования, энергопотребление, пассажиропоток.

Summary

Improving the energy efficiency of rolling stock is an urgent task, however, the assessment of the quality of the current use of rolling stock often requires a large number of calculations. In the article, based on the analysis of data on the energy consumption of electric trains and the passenger flow of the subway, a quick method for determining the current efficiency of the use of rolling stock is proposed, which makes it possible to put into operation the optimal number of units of subway cars.

Keywords: subway, electric train, efficiency of use, power consumption, passenger flow.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-61-63

Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 г. предопределены инновационные направления развития транспорта общего пользования [1, 2]. К числу таких направлений относится оптимизация подвижного состава метрополитена как инструмент достижения максимальной эффективности по показателям энергопотребления [3, 4] и высокого уровня качества проектирования.

Одним из способов оценки эффективности использования подвижного состава метро может служить регрессионный анализ, выполненный для энергопотребления подвижными единицами и пассажиропотока. При изучении системы признаков (энергопотребление x и пассажиропоток y) прежде всего необходимо исследовать коррелированность и линейную зависимость. Если принять, что регрессия линейная, то следует определить выборочное уравнение прямой регрессии (1) и его коэффициенты:

$$y = ax + b, \quad (1)$$

где a, b — выборочные коэффициенты регрессии пассажиропотока на потребление электроэнергии.

Прямая зависимость этих показателей, получаемая в результате тяговых расчетов участка по известным методикам, указывает на высокие значения коэффициента корреляции между рассматриваемыми параметрами и может характеризовать степень эффективности использования подвижного состава.

На рис. 1 представлены уровень энергопотребления подвижным составом за три года (семейство характеристик А) и соответствующие показатели пассажиропотока Екатеринбургского метрополитена (семейство характеристик Б).

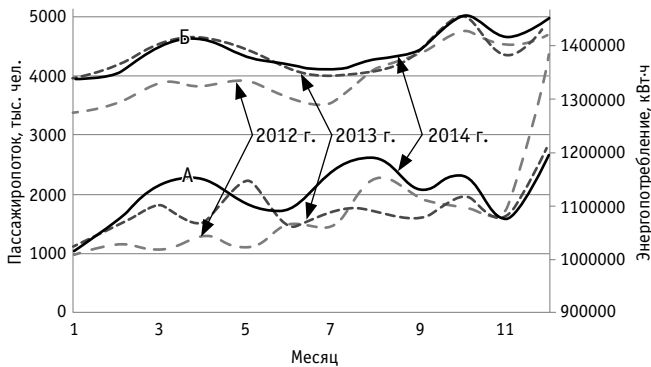


Рис. 1. Уровень энергопотребления (А) и пассажиропотока (Б) в Екатеринбургском метрополитене за 2012–2014 гг.

Постановка первоначальной задачи о коррелированности рассматриваемых признаков предполагает наличие гипотезы о значимости выборочного коэффициента корреляции [5], причем значение выбирается как нулевое.

Значимость выборочного коэффициента корреляции r_{x-y}^B определяется критерием K , зависящим от величин рассматриваемых критериев [5]:

$$K = \frac{r_{x-y}^B \cdot \sqrt{T}}{\sqrt{1 - (r_{x-y}^B)^2}}, \quad (2)$$

где T — количество степеней свободы, равное количеству измерений, уменьшенному на две единицы.

Следует иметь в виду, что в случае значимости коррелированности рассматриваемых параметров имеет место распределение Стьюдента.

По данным энергопотребления и пассажиропотока метро вычисляется наблюдаемая величина критерия $K_{\text{набл}}$, в которой учитывается выборочный коэффициент корреляции [5]:

$$r_{x-y}^B = \frac{\sum_i x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{n \sigma_x^B \sigma_y^B}, \quad (3)$$

где \bar{x} , \bar{y} — средние выборочные значения соответственно по признакам «энергопотребление» и «пассажиропоток»;

σ_x^B , σ_y^B — выборочные среднеквадратические отклонения.

Из специальной таблицы [6] в зависимости от заданного уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы k определяется критическое значение $K_{\text{крит}}$ распределения Стьюдента.

В результате расчета наблюдаемое значение $K_{\text{набл}}$ составляет 4,48, что на порядок больше критического значения $K_{\text{крит}}$ равного 2,03. Полученные значения говорят о ранее неверно выбранном предположении о равенстве коэффициента корреляции нулю ($K_{\text{крит}} < K_{\text{набл}}$) и значимости связи между рассматриваемыми признаками.

Определение выборочных коэффициентов a и b прямой регрессии (1) возможно с помощью метода наименьших квадратов, суть которого состоит в определении минимума функции суммы квадратов отклонений [6]:

$$R(a, b) = \sum_i [y(x_i) - y_i]^2 = \sum_i (ax_i + b - y_i)^2; \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sum_i y_i^2 a + \sum_i x_i b = \sum_i x_i y_i \\ \sum_i x_i a + nb = \sum_i y_i \end{cases} \quad (5)$$

Значения коэффициентов будут определяться выражениями [6]:

$$b = \frac{\sum_i x_i^2 \sum_i y_i - \sum_i x_i \sum_i x_i y_i}{n \sum_i x_i^2 - \left(\sum_i x_i \right)^2}; \quad (6)$$

$$a = \frac{n \sum_i x_i y_i - \sum_i x_i \sum_i y_i}{n \sum_i x_i^2 - \left(\sum_i x_i \right)^2} = r_{x-y}^B \frac{\sigma_y^B}{\sigma_x^B}. \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой уравнение прямой линии регрессии пассажиропотока на энергопотребление (рис. 2):

$$x - \bar{x} = r_{x-y}^B \frac{\sigma_y^B}{\sigma_x^B} (y - \bar{y}). \quad (8)$$

В результате уравнение регрессии признаков принимает вид

$$y = 104,07 \cdot x + 658\,365,60.$$

При необходимости построения обратной линии регрессии признаков уравнение определяется подобным образом.

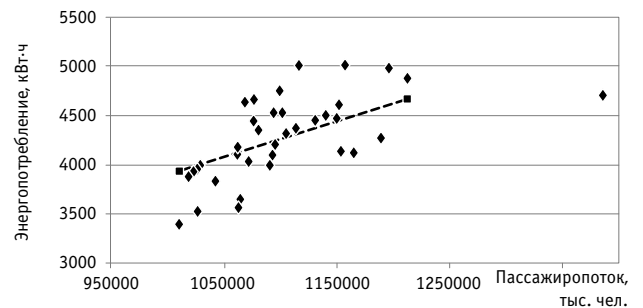


Рис. 2. Регрессия пассажиропотока на энергопотребление поездами метро

Значимость линейной зависимости пассажиропотока от потребления электроэнергии, рассмотренной ранее, устанавливается с помощью критерия Фишера [6]. Для этого ведется расчет следующих величин:

а) регрессионной суммы квадратов отклонений, показывающей отклонение наблюдений от среднего значения в соответствии с моделью регрессии,

$$\sum_{\text{пер}} = a^2 n D_x^B, \quad (9)$$

где D_x^B — выборочная дисперсия 1-го признака;

б) остаточной суммы квадратов отклонений, показывающей разброс значений наблюдений от среднего значения в силу случайных причин в соответствии с моделью регрессии,

$$\sum_{\text{ост}} = \sum_i [y_i - y(x_i)]^2; \quad (10)$$

в) общей суммы квадратов отклонений, показывающей исходный разброс значений наблюдений от среднего значения в соответствии с моделью регрессии,

$$\sum_{\text{общ}} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 = nD_x^B, \quad (11)$$

где D_x^B — выборочная дисперсия 2-го признака.

Значения исправленной регрессионной и остаточной дисперсий могут быть найдены следующим способом [6]:

$$S_{\text{регр}}^2 = \frac{\sum_{\text{регр}}}{k_1}, \quad (12)$$

где k_1 — число степеней свободы, $k_1 = 1$ при двух признаках;

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{\text{ост}}}{k_2}, \quad (13)$$

где k_2 — число степеней свободы, $k_2 = n - 2$.

Полученные результаты показывают, что $S_{\text{регр}}^2 = 2,30 \cdot 10^6$ по значению больше на порядок, чем $S_{\text{ост}}^2 = 1,14 \cdot 10^5$. Следовательно, вычисляем наблюдаемое значение критерия Фишера, которое равно отношению регрессионной и остаточной дисперсий. Так проверяется гипотеза о значимости выборочного коэффициента регрессии:

$$Z_{\text{набл}} = \frac{S_{\text{регр}}^2}{S_{\text{ост}}^2} = \frac{2,30 \cdot 10^6}{1,14 \cdot 10^5} = 20,13. \quad (14)$$

В соответствии с таблицей критических значений распределения Фишера в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы k_1 и k_2 определяется $Z_{\text{крит}}$. В условиях данной задачи при уровне значимости, равном 5%, и степеней свободы $k_1 = 1$ и $k_2 = 5$ критическое значение распределения Фишера $Z_{\text{крит}} = 4,13$.

Следовательно, изначально принятая гипотеза о линейной зависимости верна и параметры пассажиропотока и энергопотребления могут быть связаны линейной зависимостью (см. рис. 2).

Невысокое значение коэффициента корреляции $r_{1-2}^B \approx 0,61$ говорит о средней степени зависимости и означает лишь наилучшую эффективность использования подвижного состава рассматриваемого метрополитена, т. е. значительный уровень соотношения перевозки тары к пассажирам (кг). Невысокий уровень плотности пассажиров и значительная масса тары поезда (33,5–34 т/вагон) — причины, способствующие снижению коэффициента корреляции.

Литература

1. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года (Белая книга ОАО «РЖД») [Электронный ресурс]. URL: http://rzd-expo.ru/innovation/Strategia_in_razvit.pdf (дата обращения: 05.04.2017).
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 17.06.08 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: 05.04.2017).
3. Владыкин А. В., Фролов Н. О. К вопросу снижения энергопотребления тяговым приводом электропоезда метрополитена // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 92–94. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-92-94. ISSN 1815-9400.
4. Владыкин А. В., Фролов Н. О. Поиск оптимального состояния привода с точки зрения энергоэффективности подвижной единицы // Инновационный транспорт. 2016. № 3 (21). С. 36–38. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-3-36-38. ISSN 2311-164X.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. М. : Высшая школа, 2002. 575 с.
6. Горелова Г. В., Кацко И. А. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel : учеб. пособие для вузов. Ростов н/Д : Феникс, 2002. 400 с.

References

1. Strategiya innovatsionnogo razvitiya ОАО «Rossiyskie zheleznyye dorogi» na period do 2015 goda (Belaya kniga ОАО «RZhD») [The strategy of innovation development of JSC Russian Railways for the period until 2015 (White Book of JSC Russian Railways)]. [Electronic resource]. URL: http://rzd-expo.ru/innovation/Strategia_in_razvit.pdf (access date: 05.04.2017).
2. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda : rasporyazhenie Pravitelstva Ros. Federatsii ot 17.06.08 g. № 877-r [Strategy for the development of rail transport in the Russian Federation until 2030 : Order of the Government of the Russian Federation of 17.06.08 № 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: 05.04.2017).
3. Vladynkin A. V., Frolov N. O. K voprosu snizheniya energopotrebleniya tyagovym privodom elektropoezda metropolitena [The issue of reducing energy consumption of the electric subway train traction drive] // Transport Urala. 2016. № 3 (50). S. 92–94. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-92-94. ISSN 1815-9400.
4. Vladynkin A. V., Frolov N. O. Poisk optimalnogo sostoyaniya privoda s tochi ki zreniya energoeffektivnosti podvizhnoy edynitsy [Search for the best status of a drive from the point of view of energy efficiency of a mobile unit] // Innovatsionnyy transport. 2016. № 3 (21). S. 36–38. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-3-36-38. ISSN 2311-164X.
5. Venttsel E. S. Teoriya veroyatnostey : ucheb. dlya vuzov [Theory of probability : textbook]. M. : Vysshaya shkola, 2002. 575 s.
6. Gorelova G. V., Katsko I. A. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika v primerakh i zadachakh s primeneniem Excel : ucheb. posobie dlya vuzov [Theory of probability and mathematical statistics in examples and problems with the use of Excel : textbook]. Rostov n/D : Feniks, 2002. 400 s.

УДК 621.315

Татьяна Анатольевна Несенюк, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» 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

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ АЭРОМОБИЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Tatyana Anatolyevna Nesenyuk, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Machinery Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

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

Operational aeromobile control of the overhead transmission line with the unmanned aerial vehicle

Аннотация

Рассмотрены проблемы поиска неисправной изоляции в системе электроснабжения, обоснована необходимость совершенствования применяемых в настоящее время методов контроля состояния изоляторов. Для усовершенствования контроля элементов линии электропередачи (ЛЭП) предложен аэромобильный способ с использованием RFID-технологии.

Описаны преимущества RFID-технологии: непрерывный и независимый от питания ЛЭП контроль состояния изоляторов при плановых или внеплановых осмотрах; возможность наделять изолятор со встроенной RFID-меткой интеллектом путем ее кодирования и введения информации о производителе, технических параметрах, перевозчике, времени, месте установки и др.

Для осмотра элементов ЛЭП предложено использовать аэромобильный беспилотный летательный аппарат (БПЛА), позволяющий приблизиться к объекту исследования и тем самым повысить надежность считывания пассивной RFID-метки. Рассмотрены возможности применения БПЛА самолетного и вертолетного типа для комплексной диагностики ЛЭП. Приведено сравнение пешего топографического осмотра и осмотра с использованием БПЛА.

Предлагаемое решение комплексного исследования ЛЭП с применением RFID-технологии позволит энергообслуживающим предприятиям перейти от периодических ремонтов к ремонтам по отказам, снизить риски отказов элементов в системе электроснабжения, сократить время на поиск неисправностей, повысить рентабельность хозяйства электроснабжения.

Ключевые слова: изолятор, эксплуатационный контроль, беспилотный летательный аппарат, RFID-технологии, воздушная линия электропередачи.

Summary

The problems of searching for faulty insulation in the power supply system are considered, and the necessity of improving the current methods for monitoring the state of insulators is grounded. To improve control of electricity transmission line (ETL), an airmobile method using RFID technology is proposed.

Advantages of RFID technology are described: a continuous and independent from power line power supply monitoring of the state of insulators during planned or unscheduled inspections; the ability to confer an isolator with an integrated RFID tag intelligence by encoding it and introducing information about the manufacturer, technical parameters, carrier, time, location, etc.

To examine the elements of ETL, it is proposed to use an aeromobile unmanned aerial vehicle (UAV), which makes it possible to approach the object of research and thereby increase the reliability of reading a passive RFID tag. Possibilities of using UAVs of aircraft and helicopter type for complex diagnostics of ETL are considered. A comparison of foot survey and inspection using UAV is given.

The proposed solution for a comprehensive power line survey using RFID technology will allow energy service enterprises to switch from periodic repairs to failover repairs, reduce the risk of breakdowns in the power supply system, shorten troubleshooting time, and improve the profitability of the electricity supply business.

Keywords: insulator, operational control, unmanned aerial vehicle, RFID technologies, overhead transmission line.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-64-72

Сложные условия эксплуатации приводят к снижению диэлектрической прочности изоляции и, как следствие, к прохождению тока утечки, тока пробоя, вызывая однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые составляют более 75 % всех видов замыканий. ОЗЗ нарушают работу энергосистемы, приводят к рискам отказов высоковольтного оборудования, создают условия повышенной опасности при воздействии электрического тока, увеличивают потери и снижают качество электрической энергии [1, 2]. Применяемые в настоящее время методы бесконтактного контроля, кроме визуального, используются в основном при включенной магистрали воздушной линии (ВЛ) электропередачи или контактной сети (КС), при работе распределительных устройств тяговых и трансформаторных подстанций, находящихся под напряжением. При этом результаты диагностики в некоторой степени несут недостоверную информацию о состоянии оборудования [3, 4]. Это связано с отстройкой приборов и устройств от нагрузки, уровня напряжения, с влиянием климатических и эксплуатационных факторов, дальностью расположения приборов относительно объекта исследования. Топографические методы при осмотрах линии электропередачи (ЛЭП) требуют значительного времени, затратны, их трудно назвать оперативными.

Для снижения рисков отказов ВЛ и усовершенствования контроля элементов ЛЭП предлагается использовать аэромобильный способ с применением RFID-технологии.

Данный способ имеет ряд преимуществ. Во-первых, его можно использовать как при включенной ЛЭП, так и при отключении питания [1, 5, 6]. Это дает возможность непрерывно и независимо от питания ЛЭП отслеживать состояние изоляторов при плановых или внеплановых осмотрах и передавать результаты для принятия решения о восстановлении изоляции.

Во-вторых, применение RFID-меток позволяет наделить изолятор неким интеллектом путем кодирования. Код метки может содержать информацию о производителе, номере выпускаемой партии, дате изготовления, технических параметрах, о складировании, перевозчике, времени и месте установки, причинах и времени отказов ЛЭП, сроках технического обслуживания изоляторов, а также другую полезную информацию, необходимую заказчику для определения риска отказов при эксплуатации ЛЭП. На рис. 1 показаны процессы, позволяющие контролировать жизненный цикл изоляторов при помощи RFID-технологии.

Для реализации данного решения необходимо на стадии проектирования учесть конструктивные особенности изоляторов, климатические и эксплуатационные условия. Требуется детальная проработка как технологии изготовления изоляторов, так и прикрепления к ним пассивных меток на заводе-изготовителе. Код метки может вести учет и контроль всех этапов производства, логистики, торговли и эксплуатации. Данные кода можно применять при эксплуатационном контроле изолятора и при анализе работы энергосистемы по совокупности полученных результатов.

В-третьих, пассивные метки не требуют дополнительного источника питания: им не нужны ни аккумуляторная батарея, ни подключение к ЛЭП, дополнительной питающей линии или какому-либо альтернативному источнику — они работают за счет зондирующего сигнала считывателя (рис. 2).

В-четвертых, изоляторы со встроенными RFID-метками наделяются дополнительной функцией контроля их диэлектрического состояния. Примеры крепления RFID-метки к разным типам изоляторов показаны на рис. 3 [6].

Контроль диэлектрического состояния изолятора заключается в ответном сигнале от пассивной метки и фиксировании полученных результатов считывания запрограммированных меток на мониторе с дальнейшей передачей данных в эксплуатирующую организацию. С помощью зондирующего сигнала метка формирует ответный сигнал и передает его обратно считывателю (см. рис. 2). Сигнал принимается антенной считывателя, обрабатывается его электронным блоком и по интерфейсу направляется в компьютер [1, 2].

Исправность пассивной метки определяется функционированием интегральной микросхемы. Устройство RFID-метки позволяет идентифицировать метку в случае нормальной работы и не идентифицировать при изменении диэлектрических свойств изолятора.



Рис. 1. Применение RFID-технологии для контроля изоляторов



Рис. 2. Принцип передачи данных RFID-технологии

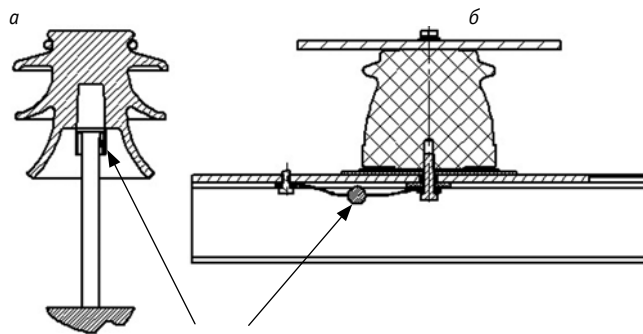


Рис. 3. Варианты крепления RFID-метки на штыревом (а) и опорном (б) изоляторе

Микросхема пассивной метки способна работать в сложных климатических и эксплуатационных условиях и является надежным элементом. В частности, в лабораторных и экспериментальных исследованиях, проведенных в лабораториях УрГУПС, в дорожной электротехнической лаборатории службы электрификации и электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры структурного подразделения Центральной дирекции — филиала ОАО «РЖД», изучалось воздействие на RFID-метки внешних эксплуатационных факторов, таких как электрическое поле, температура, увлажнение и загрязнение [1, 4]. В результате испытаний установлено, что изменение температуры и влажности, загрязненности поверхностного слоя изолятора, электрические разряды, а также род тока несущественно влияют на RFID-технологии.

Нарушение работы метки происходит при прохождении направленного тока пробоя (утечки) на интегральную микросхему, что помогает оценить состояние идентифицированного изолятора. Описание принципа действия работы сигнального устройства приведено в [2, 4].

Все закодированные метки отображаются на экране монитора считывателя независимо от того, исправна метка или нет. В случае ответа метки (ее исправности) при подаче сигнала считывателя в сторону метки знак вопроса «?» красного цвета меняется на знак «V» зеленого цвета. Если знак не изменился, то метка не находится считывателем, что и позволяет делать выводы о ее неисправности, а следовательно, о потере диэлектрических свойств изолятора. В считывателе есть функциональные кнопки «Отображать все», «Отображать найденные» и «Отображать найденные», что ускоряет и упрощает поиск меток, закрепленных на изоляторе (рис. 4 и 5), и определяет их состояние. Дополнительная функция выборки считывателя — сканирование меток: «Сканировать все», «Сканировать по одной», «Сканировать текущую». Эта функция определяется поставленными задачами: «Сканировать все» — при исследовании всего участка ЛЭП, «Сканировать по одной» — для проверки функциональности метки при кодировании на месте установки изолятора, «Сканировать текущую» — при детальном изучении в случае, когда метка отобразилась как найденная, для повторного сканирования и дальнейшего определения причин ее нефункционирования, например при потере диэлектрических свойств изолятора.

Все метки предлагается кодировать по местоположению изолятора (например, по километру, номеру опоры, фазе). Таким образом решается проблема оперативности поиска и сокращается время на ликвидацию неисправности. Кроме того, RFID-считывателем можно не только установить точное местоположение метки по ГЛОНАСС, но и задать координаты того местоположения, где связь между считывателем и RFID-меткой будет устойчивой. Это свойство может пригодиться для выбора путевого задания беспилотному летающему аппарату, к которому будет прикреплен RFID-считыватель. Считыватель имеет видео- и фотокамеру, при помощи которой можно наблюдать за происходящими процессами и фиксировать их на фотоснимке. Результаты отслеживаются в режиме онлайн или после осмотра оборудования.



Рис. 4. Внешний вид считывателя ATID AT570RF 5

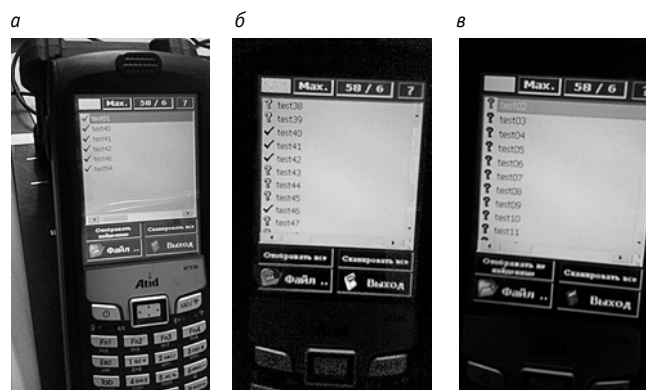


Рис. 5. Пример отображения меток на мониторе считывателя:
а — с найденными метками; б — со всеми метками;
в — с найденными метками

Рассмотрим неравномерное деление нагрузки между элементами в гирлянде изоляторов на переменном токе. Структурная схема надежности в этом случае отражает условие работоспособности резервированного объекта с пассивным резервированием, нагруженным резервом и перераспределением нагрузки между элементами при отказе отдельных изоляторов [6]. Неравномерность деления напряжения обусловлена влиянием электрической емкости. Каждый тарельчатый изолятор представляет собой конденсатор с обкладками. Чем больше емкость такого конденсатора, тем больше емкостный ток, протекающий вдоль гирлянды. Гирлянда изоляторов находится в сильно неоднородном поле между проводом и опорой, напряжение вдоль нее распределяется неравномерно. Наибольшее падение напряжения оказывается на изоляторе, расположенном вблизи провода. Расчетная схема для нахождения напряжений на изоляторах гирлянды показана на рис. 6а. Зависимость падения напряжения на изоляторе с номером K от заданного конца гирлянды

$$\Delta U_K = \frac{U_c}{(C_3 + C_n)sh(a \cdot n_n)} \{C_3[sh(a \cdot k) - sh(a \cdot (k-1))] - C_n[sh(a \cdot (n_n - k)) - sh(a \cdot (n_n - k + 1))]\},$$

где U_c — напряжение на проводе;

C_3 — частичная емкость сцепной арматуры (шапка и пестик) изолятора на землю;

C_{Π} — частичная емкость сцепной арматуры изолятора на провод;

n_{Π} — число изоляторов в гирлянде;

$$a = \sqrt{\frac{C_{\Pi} + C_3}{C_{\Pi}}},$$

где C_{Π} — емкость одного изолятора.

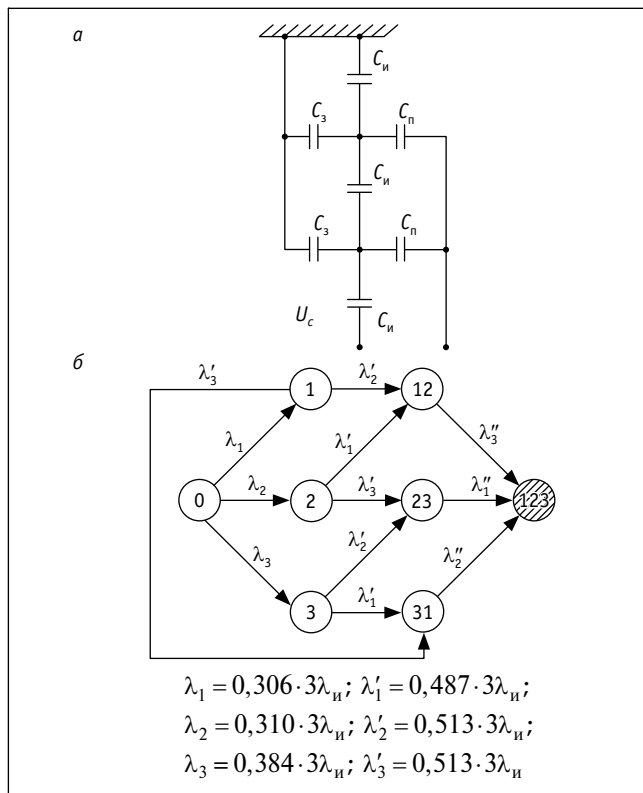


Рис. 6. Гирлянда из трех изоляторов переменного тока:
а — схема замещения; б — граф состояний и переходов

Уравнения Колмогорова для первых четырех состояний модели рассматриваемого объекта запишутся в виде

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_0(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - (\lambda'_2 + \lambda'_3)P_1(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_0(t) - (\lambda'_1 + \lambda'_3)P_2(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_3 P_0(t) - (\lambda'_1 + \lambda'_2)P_3(t) \\ \dots \end{cases}$$

Для остальных состояний уравнения запишутся по аналогичному правилу. Система уравнений может быть дополнена нормировочным условием

$$\sum_i P_i(t) = 1.$$

Если задать начальные условия и исходные данные по интенсивностям отказов изоляторов, а также предполагаемой периодичности осмотров RFID-меток, можно получить показатели надежности, например интенсивность отказов изоляторов при отсутствии резерва $\lambda_{\text{нр}}$, при наличии резерва без RFID-меток λ_p и при наличии RFID-меток с периодическим их осмотром λ_{RFID} (рис. 7).

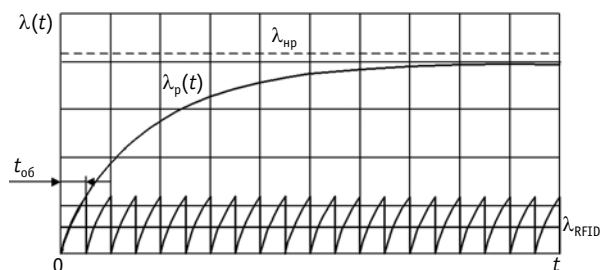


Рис. 7. Интенсивность отказов изоляторов

При постоянных интенсивностях отказов отдельных изоляторов интенсивность отказов резервированного объекта возрастает со временем от нуля до установившегося значения, равного интенсивности отказов нерезервированного устройства. Однако наличие RFID-меток и возможность периодического контроля через $t_{\text{об}}$ приводит к существенному снижению средней интенсивности отказов гирлянды изоляторов λ_{RFID} . Это особенно актуально, учитывая, что отдельные гирлянды соединены между собой в ЛЭП (по надежности) последовательно. Достаточно отказать единственной гирлянде изоляторов (отказ типа электрического пробоя), как весь участок ЛЭП становится неработоспособным.

В-пятых, при помощи метки, закрепленной на изоляторе, можно осуществлять индивидуальный контроль изоляторов в гирлянде, что позволяет сократить время испытаний, повысить безопасность обслуживающего персонала, снизить вероятность ошибок при монтаже и демонтаже, при этом нет необходимости отключать потребителя (тягового и нетягового) ЛЭП.

В-шестых, метки антивандальны, так как закреплены на высоте. Кроме того, покрытие метки надежно защищает микросхему от внешних климатических и эксплуатационных факторов. Эти свойства положительно отражаются на работоспособности и длительном сроке службы метки, позволяя предотвратить риски отказов.

Таким образом, выбор пассивной RFID-метки в качестве средства идентификации обусловлен ее техническими и эксплуатационными свойствами: отсутствием необходимости в контакте и прямой видимости, быстрым и точным считыванием, одновременной идентификацией нескольких объектов, возможным применением в агрессивных средах, антивандальностью, длительным сроком эксплуатации.

Эти широкие возможности позволяют осуществлять индивидуальную диагностику изоляторов мобильно, надежно и безопасно в сложных условиях эксплуатации. Эксплуатационный контроль изоляторов можно выполнять как при обходе с осмотром ЛЭП, так и при движении вдоль трассы на передвижном транспортном средстве (автомобиль, электропоезд, беспилотный летательный аппарат). При этом необходимо учитывать особенности пассивной метки, ее ограничения в дальности считывания. Аэромобильный беспилотный летательный аппарат (БПЛА), предлагаемый нами в качестве одного из передвижных мобильных транспортных средств, позволит максимально приблизиться к объекту исследования и тем самым повысить надежность считывания пассивной RFID-метки.

При монтаже изолятора рекомендуется по коду встроенной RFID-метки зафиксировать ее местоположение и дополнительно задать координаты для БПЛА. Это даст возможность аэромобильному аппарату на некоторое время зависнуть около объекта исследования, где вероятность считывания имеет наибольшее значение, и получить достоверный результат эксплуатационного контроля.

Таким образом, радиочастотные технологии позволяют усовершенствовать эксплуатационный контроль, а применение БПЛА повысит вероятность считывания пассивной метки. При помощи БПЛА можно производить осмотр изоляторов в труднодоступных местах, так как эти аппараты мобильны, маневренны, способны передавать полученную информацию на расстоянии, к тому же их использование снижает вероятность попадания эксплуатационного персонала под напряжение.

При выборе аэромобильных беспилотных летающих аппаратов необходимо учитывать их тип — самолетный или вертолетный.

Летающие аппараты самолетного типа имеют аэродинамическую схему с фиксированным крылом (рис. 8) [7], взлет осуществляется эластичной катапультной, посадка — на парашюте. Основные преимущества таких БПЛА — скорость и дальность полета (табл. 1).

а



б



Рис. 8. Беспилотные летательные аппараты самолетного типа [7]: а — Геоскан 201; б — Besra

В вертолетном типе беспилотного летающего аппарата (табл. 2) предусмотрена многороторная система с четырьмя/шестью/восемью роторами, вращающимися диагонально в противоположных направлениях (рис. 9). Такая конструкция позволяет многопозиционно изменять положение закрепленной аппаратуры, рассматривать объект с разных ракурсов под разными углами для его детального изучения.

Таблица 1

Характеристики самолетного БПЛА










Характеристики	Supercam S100	Supercam S240	Supercam S350	Swallow
Внешний вид				
Время полета, мин	90	120	270	40–50
Вес полезной нагрузки, кг	0,4	1	2,5	0,5
Максимальная дальность полета, км	90	120	240	5
Радиус действия радиоканала, км	50	70	90	5
Радиус действия видеоканала, км	25	50	50	—
Скорость полета, км/ч	65–120	65–120	65–120	81–101
Максимальная высота полета, м	4500	5000	4500	3000
Взлетный вес, кг	2,5	5,5	9,5–11,5	2,5
Размах крыла/диаметр аппарата, м	1	2,4	3,2	1
Максимальная скорость ветра при взлете, м/с	15	15	15	—
Диапазон рабочих температур, °С	От –35 до +40	От –35 до +40	От –35 до +40	От –20 до +60

Таблица 2

Характеристики вертолетного БПЛА

Характеристики	Geoscan 401 V	R.A.L. X6T	ERA-101	Гексакон	ERA-102
Внешний вид					
Цена, млн руб.	2,15	2,2	По запросу	По запросу	По запросу
Время полета, мин	60	45	60	90	360
Вес полезной нагрузки, кг	2	5	7	2	7
Максимальная дальность полета, км	15	15	120	50	1000
Радиус действия видеоканала, км	—	30	120	4	450
Скорость полета, км/ч	0–50	0–80	0–200	50	0–200
Максимальная высота полета, м	500	3000	4000	10	4000
Взлетный вес, кг	9,5	10,5	25	7,5	25
Размах крыла/диаметр аппарата, м	1,56	0,94	1,3	—	1,3
Максимальная скорость ветра при взлете, м/с	100	30	—	10	—
Диапазон рабочих температур, °С	От –20 до +40	От –30 до +60	—	От –20 до +40	—

При автоматической аэрофотосъемке, благодаря которой можно создавать ортофотопланы и модели трассы (рис. 10), координаты опор, предлагается использовать БПЛА самолетного типа [8, 9].

БПЛА вертолетного типа (с учетом данных, полученных при обследовании трасс

самолетным БПЛА) поможет произвести детальный осмотр с дальнейшей оценкой состояния оборудования ЛЭП (рис. 11).

Для расширения возможностей эксплуатационной диагностики элементов ЛЭП предлагается использовать не только радиочастотный и оптический, но также

инфракрасный и ультрафиолетовый методы. Эксплуатационный контроль предусматривает осмотр состояния трассы, осмотр проводов, опор ВЛ, кронштейнов и траверс, изоляторов. В табл. 3 приведены методы диагностики, применяемые при обходе с осмотром.

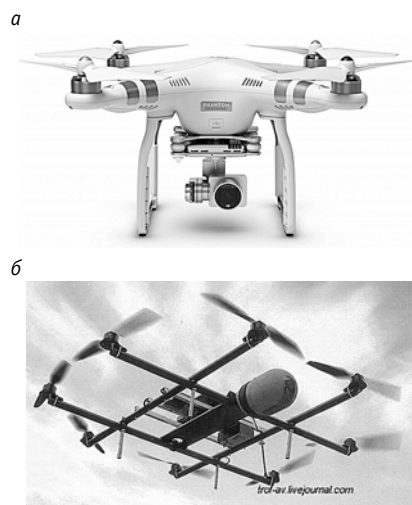


Рис. 9. Беспилотные летательные аппараты вертолетного типа:
а — с четырьмя роторами (DJI Phantom 3 Professional);
б — с восемью роторами (ZALA 421–22)



Рис. 10. Аэрофотосъемка для создания ортофотопланов и моделей трассы

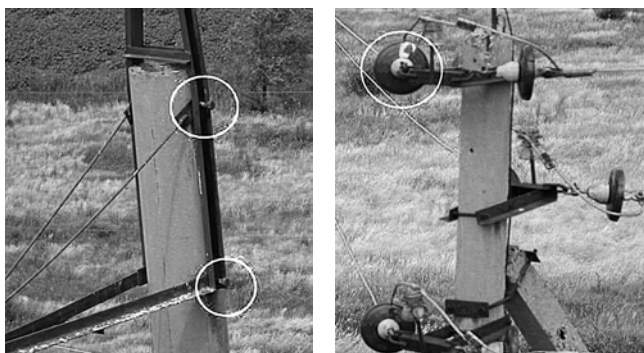


Рис. 11. Детальная аэрофотосъемка

Таблица 3

Методы диагностики состояния устройств электроснабжения ВЛ 6 (10) кВ при обходе с осмотром

Эксплуатационный контроль ЛЭП	Метод				
	Оптический	УФ	ИК	ЧР	RFID
Осмотр состояния трассы: наличие посторонних предметов, деревьев с опасным приближением	+				
Осмотр проводов: положение и натяжение проводов; правильность транспозиций и пересечений; крепление проводов к изоляторам; состояние проводов в местах стыковки, пайки; обрывы жил	+		+		
Осмотр опор ВЛ: наличие посторонних предметов; отклонение вершин опор от вертикальной оси; вспучивание, смещение грунта вблизи стоек; наличие защитных ограждений, знаков; наличие трещин и сколов на опоре; крепление опоры (к приставкам, к фундаменту); состояние сварных соединений, анкерных болтов	+				
Осмотр кронштейнов и траверс: крепление на опорах кронштейнов и траверс; срыв штыревых изоляторов; надежность крепления и состояния кронштейнов; наличие закладных деталей, хомутов к спуску	+				
Осмотр изоляторов: внешнее состояние изоляторов; отсутствие перекрытия, коронирования; механические повреждения; поджигание подвесных изоляторов к заземленным конструкциям под воздействием низких температур воздуха, порывов ветра, автоколебаний	+	+	+	+	+

Как видно из табл. 3, наиболее значимым и сложно диагностируемым узлом ЛЭП являются изоляторы, для проверки диэлектрических свойств которых и используется несколько методов.

Основным недостатком диагностических методов при рассмотрении изоляторов с поверхности земли является то, что объект диагностики находится на значительном расстоянии. Этого недостатка, как уже было отмечено, лишены БПЛА, которые могут максимально приблизиться к объекту исследования. Аэромобильные аппараты со встроенной техникой способны выбрать позицию, удобную для изучения пространственного положения изолятора как относительно земли, так и относительно токопроводящей поверхности проводника. А сопоставление результатов, полученных двумя и более аппаратами, на экране монитора позволяет выявлять неисправности на ранней стадии развития дефекта. Выбор аэродинамического устройства имеет особое значение и зависит не только от технических и эксплуатационных характеристик диагностических аппаратов, но также от целей и задач исследования ЛЭП. С одной стороны, можно диагностировать изоляторы на протяженном участке ЛЭП, а с другой — детально изучать узлы и детали опорных и поддерживающих конструкций (включая изоляторы и провода), можно исследовать пространство в прилегающей зоне ЛЭП, а можно находить причины короткого замыкания или замыкания на землю на выделенном релейной защитой участке ЛЭП.

Ручное управление аэромобильным аппаратом может производиться оператором, который определяет объект исследования, скорость передвижения аппарата, курс, высоту полета с учетом нагруженности БПЛА [10]. При использовании беспилотного транспортного средства вдоль трассы ЛЭП необходимо учитывать возможность его попадания в зону опасного действия: ЛЭП находится под напряжением, электрический ток и электрическое поле создают ряд ограничивающих факторов приближения беспилотного аппарата к объектам ВЛ и КС. Выбор высот БПЛА определяется видом диагностики и объектами исследования (опоры, изоляторы, провода и контактные соединения, арматура, тросы и др.). При формировании полетного задания для диагностики ЛЭП требуются данные о местоположении трассы с учетом ее рельефа, размещения опор, габаритных размеров ЛЭП и т. д. Независимо от типа БПЛА облеты рекомендуется проводить слева и справа от трассы по пути следования аэромобильного устройства, т. е. в прямом и обратном направлении. Обозначив участок ЛЭП по наименованию в эксплуатационной схеме, запрограммировав RFID-метку по месту, где она закреплена, настроив и согласовав текущее время запуска на устройствах контроля, оператор может производить диагностику, определяя характер неисправности при помощи электронно-оптического, тепловизионного метода или ультразвуковой дефектоскопии. Нагревы, разрядные процессы, визуальное состояние трассы, зафиксированные встроенными на БПЛА устройствами, необходимо досконально изучить и зафиксировать в протоколе исследования трассы ВЛ или КС.

Наглядно показать преимущества нового аэромобильного эксплуатационного подхода позволяет его сравнение с пешим осмотром состояния устройств электроснабжения ВЛ (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение топографического осмотра
устройств электроснабжения ВЛ и осмотра с применением БПЛА

№ п/п	Осмотр оборудования ЛЭП	Особенности пешего осмотра	Особенности осмотра с применением БПЛА
1	Состав исполнителей		
1.1	Начальник района электроснабжения или электромеханик; электромонтер 4-го разряда	2 чел.	1 чел.
2	Условия выполнения работ		
2.1	Исследование до частей, находящихся под напряжением, без подъема на высоту	Из-за дальности от объекта исследования сложность в обнаружении неисправности при осмотре оборудования	Позволяет детально изучить элементы ЛЭП и их крепление, обнаруживает неисправность на ранней стадии развития
2.2	По распоряжению и с уведомлением энергосдиспетчера о месте и времени обхода	Да	Да
3	Защитные средства, приборы, инструмент, приспособление и материалы		
3.1	Жилеты сигнальные, сигнальные принадлежности, бинокль, рулетка измерительная, молоток, блокнот для записи	Для визуального обнаружения при движении вдоль трассы на 2 чел.	Для наблюдения на расстоянии вдали от трассы и внесения записей в компьютер
4	Подготовительные работы		
4.1	Получить распоряжение на выполнение работ и пройти инструктаж по технике безопасности	Для топографического осмотра	Для применения БПЛА
4.2	Подобрать сигнальные принадлежности, приборы, инструмент, проверить их исправность	Для движения вдоль трассы для 2 чел.	Для наблюдения на расстоянии вдали от трассы и внесения записей в компьютер
4.3	Уведомить диспетчера о предстоящем обходе с осмотром и проверкой состояния устройств электроснабжения, указать место и время начала осмотра	Для ведения безопасного координирования при движении вдоль трасс двух исполнителей	Для ведения безопасного координирования при движении БПЛА вдоль трасс
4.4	Прибыть к месту начала обхода	Для топографического изучения трассы на всем протяжении исследуемого участка	Возможность рассмотрения с середины трассы для исследования ЛЭП в прямом и обратном направлении
4.5	Производителю работ провести инструктаж для члена бригады, объяснить ему порядок и условия выполнения осмотра	Необходимость проведения инструктажа для безопасности двух человек	Скоординировать датчики безопасного перемещения БПЛА вдоль трассы
5	Схема последовательного технологического процесса		
	Осмотр состояния трассы ВЛ; осмотр проводов; осмотр кабельных вставок; осмотр опор ВЛ; осмотр кронштейнов и траверс; осмотр изоляторов; осмотр оборудования КТП, ТП, силовых опор	Требует значительного времени при движении по трассе и визуального осмотра на значительном расстоянии с разных позиций относительно опоры ЛЭП	Сокращает время на передвижение и осмотр за счет скорости БПЛА, мобильности, возможности приблизиться к объекту осмотра и диагностировать фото-, УФ-, ИФ-камерами, считывателем
6	Окончание работ		
6.1	Уведомить энергосдиспетчера об окончании и результатах обхода, возвратиться на производственную базу	По телефонной мобильной связи	По телефонной мобильной связи
6.2	Сделать запись в «Книге произведенных работ»	Письменно	Письменно или в электронном виде
6.3	Результаты обхода занести в книгу осмотров и неисправностей	Письменно и дополнительно в ПК	Заполнить отчетную таблицу осмотров, проанализировать полученные результаты

На основании данных, приведенных в табл. 4, можно сделать выводы о тех преимуществах, которые дает применение БПЛА: это снижение времени на осмотр трассы, сокращение числа исполнителей и повышение их безопасности при прохождении вдоль ЛЭП, возможность детального изучения трассы за счет максимального приближения переносных устройств диагностики (фото-, УФ- и ИФ-камер, RFID-считывателя) к объектам осмотра.

Таким образом, предлагаемый аэромобильный способ контроля за состоянием элементов ЛЭП с использованием RFID-технологии позволит уменьшить риски отказов, сократить потери электрической энергии, обеспечить безопасность обслуживающего персонала, снизить транспортные расходы и расходы на оплату труда (в связи с сокращением штатного расписания), распознать неисправность на ранней стадии ее развития, а значит, предотвратить аварийные ситуации в системе электроснабжения и повысить надежность эксплуатации оборудования ЛЭП.

Литература

1. Галкин А. Г., Несенюк Т. А., Шерстюченко О. А. Бесконтактный RFID-контроль изоляторов // Транспорт Урала. 2014. № 1 (40). С. 65–71. ISSN 1815-9400.
2. Несенюк Т. А. Совершенствование эксплуатационной диагностики изоляторов и защитных устройств // Электроснабжение железных дорог : межвуз. темат. сб. науч. тр. / ОмГУПС. Омск, 2016. С. 32–36.
3. Арбузов Р. С., Овсянников А. Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Новосибирск : Наука, 2009. 136 с.
4. Несенюк Т. А., Сергеев Б. С., Сухогозов А. П. Методика определения состояния изоляторов ВЛ 6–10 кВ // Известия Транссиба. 2014. № 4 (20). С. 97–104. ISSN 2220-4245.
5. Несенюк Т. А. Бесконтактный эксплуатационный контроль изоляторов // Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта : матер. II междунар. науч.-практ. конф. Донецк, 2016. С. 130–135.
6. Ефимов А. В., Галкин А. Г. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог : учеб. для вузов ж.-д. трансп. М. : УМК МПС России, 2000. 512 с.
7. Беспилотники Supercam [Электронный ресурс]. URL: <http://bespilotnik.org/catalog/bpla/planers/> (дата обращения: 01.10.2016).
8. Технологические карты на работы по техническому обслуживанию устройств электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей. М. : Трансиздат, 2010. 104 с.
9. Мониторинг состояния воздушных линий электропередачи с использованием беспилотного летательного аппарата / В. П. Дикой, А. А. Левандовский, Р. С. Арбузов и др. // Энергия единой сети. 2014. № 2 (13). С. 17–25. ISSN 2306-8345.
10. Группа компаний «Геоскан» [Сайт]. URL: <https://www.geoscan.aero> (дата обращения: 01.10.2016).

References

1. Galkin A. G., Nesenyuk T. A., Sherstyuchenko O. A. Beskontaktnyy RFID-kontrol izolyatorov [Non-contact RFID-monitoring of insulators] // Transport Urala. 2014. № 1 (40). S. 65–71. ISSN 1815-9400.
2. Nesenyuk T. A. Sovershenstvovanie ekspluatatsionnoy diagnostiki izolyatorov i zashchitnykh ustroystv [Improvement of operational diagnostics of insulators and protective devices] // Elektrosnabzhenie zheleznnykh dorog : mezhvuz. temat. sb. nauch. tr. / OmGUPS. Omsk, 2016. S. 32–36.
3. Arbuzov R. S., Ovsyannikov A. G. Sovremennyye metody diagnostiki vozduzhnykh liniy elektropredachi [Modern methods of diagnosing overhead transmission lines]. Novosibirsk : Nauka, 2009. 136 s.
4. Nesenyuk T. A., Sergeev B. S., Sukhoguzov A. P. Metodika opredeleniya sostoyaniya izolyatorov VL 6–10 kV [Determination procedure of the condition of the insulators used in an overhead power transmission line of 6–10 kV] // Izvestiya Transsiba. 2014. № 4 (20). S. 97–104. ISSN 2220-4245.
5. Nesenyuk T. A. Beskontaktnyy ekspluatatsionnyy kontrol izolyatorov [Non-contact operational monitoring of insulators] // Nauchno-tehnicheskie aspekty kompleksnogo razvitiya zheleznodorozhnogo transporta : mater. II mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Donetsk, 2016. S. 130–135.
6. Efimov A. V., Galkin A. G. Nadezhnost i diagnostika sistem elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog : ucheb. dlya vuzov zh.-d. transp. [Reliability and diagnostics of power supply systems of railways : textbook]. M. : UMC MPS Rossii, 2000. 512 s.
7. Bespilotniki Supercam [Supercam UAVs]. [Electronic resource]. URL: <http://bespilotnik.org/catalog/bpla/planers/> (access date: 01.10.2016).
8. Tekhnologicheskie karty na raboty po tekhnicheskemu obsluzhivaniyu ustroystv elektrosnabzheniya netyagovykh zheleznodorozhnykh potrebiteley [Technological maps for the maintenance of power supply devices for non-tractional railway consumers]. M. : Transizdat, 2010. 104 s.
9. Monitoring sostoyaniya vozduzhnykh liniy elektropredachi s ispolzovaniem bespilotnogo letatel'nogo apparata [Monitoring the condition of overhead power lines using an unmanned aerial vehicle] / V. P. Dikoy, A. A. Levandovskiy, R. S. Arbuzov i dr. // Energiya edinoi seti. 2014. № 2 (13). S. 17–25. ISSN 2306-8345.
10. Gruppa kompaniy «Geoskan» [Group of companies «Geoskan»]. [Site]. URL: <https://www.geoscan.aero> (access date: 01.10.2016).

УДК 621.331:621.311

Артем Владимирович Горькин, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Василий Титович Черемисин, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте (НИИЭ), заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ТЕОРИЯ РАБОТЫ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЕ-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ШУНТОВ

Artyom Vladimirovich Gorkin, postgraduate student, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Vasily Titovich Cheremisin, DSc in Engineering, Professor, Director of the Research Institute for Energy Saving in Railway Transport, Head of the Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Theory of work and temporary characteristics of relay differential shunts

Аннотация

В статье рассматривается ранее не учитываемое свойство реле-дифференциального шунта, применяемого в составе выключателей типа ВАБ-28, ВАБ-49 и аналогичных, при полном снятии пакета стали на ветви меньшего сечения — появление временной задержки срабатывания. Для этого методом математического описания построены и проанализированы временные характеристики реле-дифференциального шунта с пакетом стали и при полном снятии последнего.

На основании анализа сделаны выводы о возможном снижении количества ложных и неселективных отключений быстродействующих выключателей, а следовательно, о сокращении эксплуатационных затрат.

Кроме того, введено новое понятие «задержка времени срабатывания реле-дифференциального шунта», что позволит дополнить существующую теорию его работы, в которой данное свойство не упоминается.

Ключевые слова: быстродействующий выключатель, реле-дифференциальный шунт, пакет стали, задержка времени, максимальная импульсная защита, временные характеристики.

Summary

In article temporary characteristics of the relay differential shunt are considered at full removal of a package of steel on a branch of smaller section. Comparison with temporary characteristics of the relay differential shunt with a full package of steel is carried out. Conclusions are drawn on opportunities of use of the relay differential shunt without steel package at pass by the electrorolling stock of the isolating interfaces to the purpose of decrease in number of shutdowns of high-speed switches.

Keywords: high-speed switch, relay differential shunt, steel package, endurance of time, maximum pulse protection, temporary characteristics.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-73-76

Реле-дифференциальный шунт (РДШ) применяется в качестве максимально импульсного реле тока на быстродействующих выключателях (БВ) типа ВАБ-28, ВАБ-49 и других аналогичных. Временные характеристики РДШ служат важнейшим параметром, определяющим величину степени ограничения БВ тока короткого замыкания и время гашения дуги.

Теория работы и характеристики реле-дифференциальных шунтов рассмотрены в [1, 2]. Однако в них применение РДШ при полном снятии пакета стали на ветви меньшего сечения исследуется лишь с точки зрения изменения коэффициента динамичности — отношения динамической уставки выключателя к статической. Между тем полное снятие пакета стали приводит, как показано в [3], к появлению временной задержки срабатывания РДШ.

Это свойство может быть использовано для решения проблемы ложной работы выключателей с РДШ при бросках тока нагрузки, например при проходе электроподвижным составом изолирующих сопряжений [4, 5]. В подобной ситуации такое положительное качество РДШ, как повышенная чувствительность к броскам тока, приводит к ложным отключениям БВ. Эту излишнюю чувствительность РДШ можно ограничить без значительных капиталовложений и снижения надежности тягового электроснабжения — за счет изменения его характеристик и использования цифровых терминалов (ЦТ) защит фидеров контактной сети типа ЦЗАФ-3,3/ИнТер-3,3.

Конструкция РДШ, которая описана во многих работах, в том числе в [1, 2], схематически показана на рис. 1.

Внутри магнитопровода 4 с якорем 5, жестко связанным с подвижной частью контакта 6, проходят шины 1 и 2 неравнового сечения. Пакеты листов электротехнической стали 3 размещены на шине 1 меньшего сечения. Якорь реле 5 в нормальном положении удерживается пружиной 7, за счет чего контакт 6, через который замыкается цепь тока держащей катушки (ДК) выключателя, остается замкнутым.

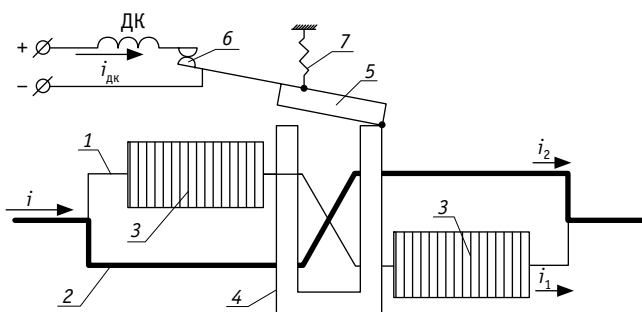


Рис. 1. Принципиальная схема РДШ:

1 — шина меньшего сечения; 2 — шина большего сечения;
3 — пакеты листов электротехнической стали; 4 — магнитопровод;
5 — якорь; 6 — пара контактов; 7 — пружина

Срабатывание РДШ происходит, когда уставка реле становится равной разности токов шин 1 и 2, т. е. $(i_2 - i_1)$. В случае медленного нарастания тока постоянная времени цепи $\tau \geq \tau_{кр}$ и РДШ срабатывает при значении тока срабатывания $I_{ср} = i_1 + i_2$. Здесь за $\tau_{кр}$ принимается величина, при которой РДШ перестает реагировать на броски тока и его динамическая уставка становится равной статической [1]. А когда ток в цепи нарастает с постоянной времени $\tau < \tau_{кр}$, то срабатывание реле происходит при меньшем значении $I_{ср}$. Это достигается за счет вытеснения тока из шины 1 в шину 2 из-за большого различия их индуктивного сопротивления.

Уравнения, описывающие работу РДШ с полным пакетом стали, известны и приведены в [1, 2]. Численные значения параметров РДШ, определенные расчетным путем в работе [5], также известны.

В соответствии с [1, 2] разность токов шин 1 и 2 будет равна

$$i_2 - i_1 = \frac{2I_0}{B} + \frac{2\Delta I}{B} \cdot \left(1 - e^{-\frac{Bt}{AT_{ш}}}\right) + \frac{2\Delta I(T_{ш} - T_1)}{BT_1 - AT_{ш}} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{Bt}{AT_{ш}}}\right) - I_0 - \Delta I \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right), \quad (1)$$

где i_1, i_2 — токи шин 1 и 2, А;

I_0 — установившееся значение тока, А;

ΔI — приращение тока, А;

T_1 — постоянная времени сети, с;

$$B = (\beta + 1),$$

где $\beta = r_2/r_1$;

r_1, r_2 — активные сопротивления шин 1 и 2, Ом;

$$A = (\alpha + 1),$$

где $\alpha = (L_{ш2} + L_{мп} - M)/(L_{ш1} + L_{пж} + L_{мп} - M)$;

$L_{ш1}, L_{ш2}$ — индуктивность шин 1 и 2 соответственно, Гн;

$L_{пж}$ — индуктивность пакета стали, Гн;

$L_{мп}$ — индуктивность реле (магнитопровода 4 с якорем 5) с учетом величины зазора между ними (см. рис. 1);

M — взаимоиндуктивность шин 1 и 2, Гн;

$T_{ш}$ — постоянная времени ветви 1 шунта, с,

$$T_{ш} = (L_{ш1} + L_{пж} + L_{мп} - M) / r_1.$$

Продифференцировав уравнение (1) и приравняв производную нулю, найдем время достижения функцией своего максимума:

$$t_{\max} = \frac{T_{ш} T_1 A \cdot \ln \left(\frac{2T_1 A - 2BT_1}{A \cdot (2T_1 - 2T_{ш} - BT_1 + AT_{ш})} \right)}{BT_1 - AT_{ш}}. \quad (2)$$

Используя уравнение (1), построим зависимости изменения разности токов шин 1 и 2 от времени при различных значениях T_1 для РДШ-I (рис. 2). А по уравнению (2) построим зависимости времени достижения функцией $(i_2 - i_1)$ своего максимума от T_1 для РДШ-I и РДШ-II (рис. 3).

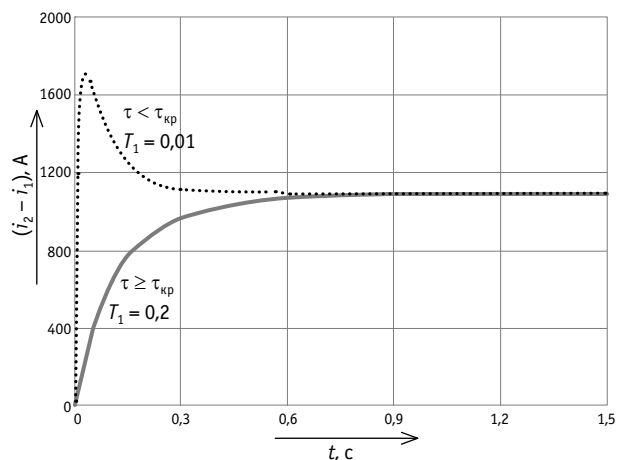


Рис. 2. Зависимости изменения разности токов шин 1 и 2 от времени для РДШ-I

При построении зависимостей изменения разности токов шин 1 и 2 от времени учтем, что установившееся значение тока I_0 в цепи и приращение тока ΔI не оказывают влияния на время достижения функцией $(i_2 - i_1)$ своего максимума. Как видно из рис. 2 и 3, оно определяется постоянной времени цепи: чем меньше T_1 , тем быстрее РДШ сработает.

Чтобы построить подобные характеристики для случая снятия пакета стали, параметр $L_{пж}$ приравняем нулю.

Тогда обозначения уравнений (1) и (2), введенные ранее, примут вид:

$$\alpha = (L_{ш2} + L_{мп} - M) / (L_{ш1} + L_{мп} - M);$$

$$T_{ш} = \frac{(L_{ш1} + L_{мп} - M)}{r_1}.$$

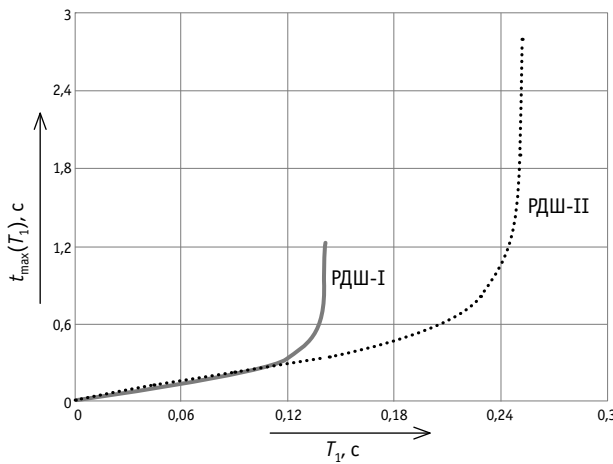


Рис. 3. Зависимости времени достижения функцией $(i_2 - i_1)$ своего максимума от постоянной времени сети для РДШ-I и РДШ-II

По уравнению (1) построим зависимости изменения $(i_2 - i_1)$ от времени при полном снятии пакета стали (рис. 4).

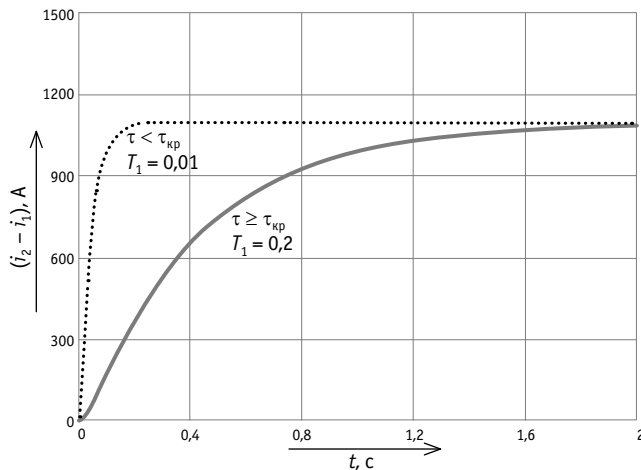


Рис. 4. Зависимости изменения разности токов шин 1 и 2 от времени при полном снятии пакета стали для РДШ-I

Уравнением (2) для нахождения времени достижения функцией $(i_2 - i_1)$ своего максимума воспользоваться не получится, так как функция $t_{\max}(T_1)$ при $L_{\text{пж}} = 0$ получается неявной. Поэтому для построения графика достижения функцией своего максимума численно решим уравнение (1), задавшись при этом допустимой погрешностью вычислений.

Максимальное значение функции при заданных I_0 и ΔI найдем, преобразуя уравнение (1):

$$I_{\max} = \frac{2I_0}{B} + \frac{2\Delta I}{B} - I_0 - \Delta I. \quad (3)$$

Тогда с учетом допустимой погрешности Δ , которую примем равной 10^{-3} , получим уравнение

$$I_{\max} - \Delta = \frac{2I_0}{B} + \frac{2\Delta I}{B} \cdot \left(1 - e^{-\frac{Bt}{AT_{\text{ш}}}}\right) + \frac{2\Delta I(T_{\text{ш}} - T_1)}{BT_1 - AT_{\text{ш}}} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{Bt}{AT_{\text{ш}}}}\right) - I_0 - \Delta I \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right). \quad (4)$$

Зададим значения постоянной времени цепи T_1 от 0,005 до 0,22 и решим численно уравнение (4). Построим график для РДШ-I и РДШ-II (рис. 5) и для наглядности совместим его с графиком, приведенным на рис. 3.

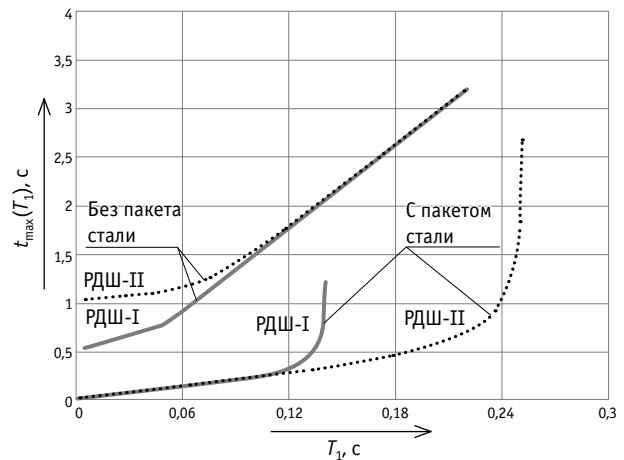


Рис. 5. Зависимости времени достижения функциями изменения разности токов шин 1 и 2 своего максимума от постоянной времени сети с пакетом стали и без него

Из рис. 5 видно, что время достижения максимума функцией $(i_2 - i_1)$ без пакета стали значительно больше, чем в противоположном случае. Причем необходимо учитывать, что время достижения функцией уставки максимально импульсной защиты (МИЗ) РДШ будет меньше, чем значения достижения функции ее максимума.

Полученные зависимости абсолютно согласуются с практическими выводами [3]: применение РДШ при полном снятии пакета стали поможет значительно уменьшить количество отключений БВ при проходе электроподвижным составом изолирующих сопряжений без снижения надежности защиты фидеров контактной сети.

Для этого, если рассматривать защиту МИЗ в качестве дополнительной, а в роли основной и резервной — дистанционную защиту и ЗСНТ (защиту по скорости нарастания тока), которые выполнены на базе ЦТ, и ориентироваться на время возможного пережога контактного провода 0,062–0,074 с [6], необходимо выбирать такую уставку РДШ, чтобы время срабатывания БВ не превышало 50 мс при максимальном установившемся токе короткого замыкания возле тяговой подстанции. При этом должно учитываться собственное время отключения выключателя.

Таким образом, по результатам проведенного анализа временных характеристик РДШ с полным пакетом стали и при его снятии можно сделать следующие выводы.

1. За счет применения РДШ с задержкой времени его срабатывания возможно снижение числа отключений БВ при проходе ЭПС изолирующих сопряжений без снижения надежности защиты ФКС.

2. Уменьшение количества неселективных отключений БВ позволяет сократить эксплуатационные затраты на их обслуживание и капитальный ремонт.

3. Подтверждено [3] и математически проанализировано свойство РДШ — появление временной задержки его срабатывания при полном снятии пакета стали на ветви меньшего сечения. Это дает возможность дополнить существующую теорию работы [1] РДШ выключателей типа ВАБ-28 и ВАБ-49.

4. Выявленное свойство РДШ позволяет ввести новое для [1] понятие «задержка времени срабатывания реле-дифференциального шунта».

Литература

1. Пупынин В. Н. Полная теория работы и характеристика параллельных индуктивных шунтов быстродействующих выключателей типов ВАБ-2, АБ-2/3, АБ-2/4 и реле-дифференциальных шунтов выключателей ВАБ-28 // Труды МИИТ. 1965. Вып. 213 : Вопросы энергоснабжения электрических железных дорог. С. 61–86.
2. Такарлыкова А. С. Изолирующий промежуток тяговой сети постоянного тока для условий скоростного и тяжеловесного движения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009.
3. Горькин А. В. Устранение неселективных отключений быстродействующих выключателей фидеров контактной сети // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем : матер. второй междунар. науч.-практ. конф. / ОмГУПС. Омск, 2016. С. 46–51.
4. Горькин А. В. Анализ работы коммутационных аппаратов тяговой подстанции постоянного тока в условиях прохождения электроподвижным составом изолирующих сопряжений под током // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : матер. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / ОмГУПС. Омск, 2013. С. 251–256.
5. Горькин А. В. Анализ процессов изменения токов смежных фидеров при прохождении электроподвижным составом изолирующих сопряжений под током // Метрологическое и нормативное обеспечение качества и безопасности продукции : матер. Всерос. науч.-техн. конф. / ОмГУПС. Омск, 2014. С. 290–296.
6. Фигурнов Е. П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог. М. : Транспорт, 1981. 215 с.

References

1. Pupynin V. N. Polnaya teoriya raboty i kharakteristika parallelnykh induktivnykh shuntov bystrodeystvuyushchikh vyklyuchateley tipov VAB-2, AB-2/3, AB-2/4 i rele-differentsialnykh shuntov vyklyuchateley VAB-28 [A complete theory of work and the characteristic of parallel inductive shunts of high-speed switches of the VAB-2, AB-2/3, AB-2/4 types and the relay differential shunts of VAB-28 switches] // Trudy MIIT. 1965. Vyp. 213 : Voprosy energosnabzheniya elektricheskikh zheleznykh dorog. S. 61–86.
2. Takarlykova A. S. Izoliruyushchiy promezhutok tyagovoy seti postoyannogo toka dlya usloviy skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [The isolating interval of traction network of a direct current for conditions of high-speed and heavy movement : PhD in Engineering Synopsis]. M., 2009.
3. Gorkin A. V. Ustraneniye neselektivnykh otklyucheniy bystrodeystvuyushchikh vyklyuchateley fiderov kontaktnoy seti [Elimination of not selective shutdowns of high-speed switches of feeders of contact network] // Povysheniye energeticheskoy effektivnosti nazemnykh transportnykh sistem : mater. vtoroy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / OmGUPS. Omsk, 2016. S. 46–51.
4. Gorkin A. V. Analiz raboty kommutatsionnykh apparatov tyagovoy podstantsii postoyannogo toka v usloviyakh prokhozheniya elektropodvizhnym sostavom izoliruyushchikh sopryazheniy pod tokom [Job analysis of switching offices of traction substation of a direct current in the conditions of passing by electrailway vehicles of the isolating interfaces alive] // Pribory i metody izmereniy, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte : mater. Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem / OmGUPS. Omsk, 2013. S. 251–256.
5. Gorkin A. V. Analiz protsessov izmeneniya tokov smezhnykh fiderov pri prokhozhenii elektropodvizhnym sostavom izoliruyushchikh sopryazheniy pod tokom [Organizational and technological parameters of operation of the liner-tamping-straightening machines cyclic action] // Metrologicheskoe i normativnoye obespecheniye kachestva i bezopasnosti produktsii : mater. Vseros. nauch.-tekhn. konf. / OmGUPS. Omsk, 2014. S. 290–296.
6. Figurnov E. P. Reley'naya zashchita ustroystv elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Relay protection of devices of power supply of the railways]. M. : Transport, 1981. 215 s.

УДК 502.131.1:504.5:626.33(450+470)

Елена Роменовна Магарил, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Экономика природопользования» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,

Ромен Зеликович Магарил, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия,

Лариса Леонидовна Абржина, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика природопользования» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия,

Дэбора Панепинто, Dr. in Engineering, Assistant Professor, Политехнический университет Турина, Турин, Италия,

Франческа Виджиано, Dr. in Engineering, Researcher, Европейская организация по ядерным исследованиям (ЦЕРН), Женева, Швейцария

ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА В РОССИИ И ИТАЛИИ И МЕХАНИЗМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Elena Romenovna Magaril, DSc in Engineering, Professor, Head of Environmental Economics Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrfU), Ekaterinburg, Russia,

Romen Zelikovich Magaril, DSc in Engineering, Professor, Chief Researcher, Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russia,

Larisa Leonidovna Abrzhina, PhD in Economics, Associate Professor, Environmental Economics Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrfU), Ekaterinburg, Russia,

Debora Panepinto, Dr. in Engineering, Assistant Professor, Polytechnic University of Turin, Turin, Italy,

Franceska Vidzhiano, Dr. in Engineering, Researcher, European Organization for Nuclear Research (CERN), Geneva, Switzerland

Impact of vehicles on air quality in Russia and Italy and mechanisms for sustainable development of road transport

Аннотация

Качество воздуха в мегаполисах России и Италии, несмотря на различную специфику, вызывает аналогичную озабоченность соответствующих государственных органов относительно выбросов транспортных средств, а также концентрирования токсичных загрязнителей в городских районах. Статья посвящена анализу влияния транспортных средств на качество воздуха в России и Италии и обсуждению возможных подходов к снижению негативных последствий эксплуатации автотранспорта.

Обсуждается применение различных методов (совершенствование двигателей, улучшение качества топлив, развитие дорожной инфраструктуры, совершенствование организации дорожного движения) для обеих стран, а также для других регионов с акцентом на аспектах применимости, соотношения затрат и полученных результатов.

Рассматриваются экстерналии, вызываемые транспортными загрязнениями, с оценкой возможностей ограничения воздействия и предотвращения экологического ущерба, а также с учетом финансовых и инфраструктурных затрат.

Ключевые слова: выбросы автотранспорта, улучшение качества воздуха, механизмы воздействия, экологический ущерб.

Summary

Air quality in the megacities of Russia and Italy, despite their different specificity, causes similar concerns of the relevant state authorities with respect to vehicle emissions, as well as the concentration of toxic pollutants in urban areas. The article is devoted to the analysis of the influence of vehicles on air quality in Russia and Italy and discussion of possible approaches to reducing the negative consequences of the operation of motor vehicles.

The application of various methods (engine improvement, improvement of fuel quality, development of road infrastructure, improvement of traffic organization) is discussed for both countries, as well as for other regions, with emphasis on the applicability aspects, cost-effectiveness ratio.

Externalities caused by transport pollution are considered with an assessment of the possibilities of limiting the impact and preventing environmental damage, as well as taking into account financial and infrastructural costs.

Keywords: vehicle emissions, air quality improvement, impact mechanisms, environmental damage.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-77-84

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильный транспорт оказывает значительное негативное воздействие на качество воздуха многих урбанизированных территорий Европы. Как отмечается в докладах ЕЕА [1, 2]:

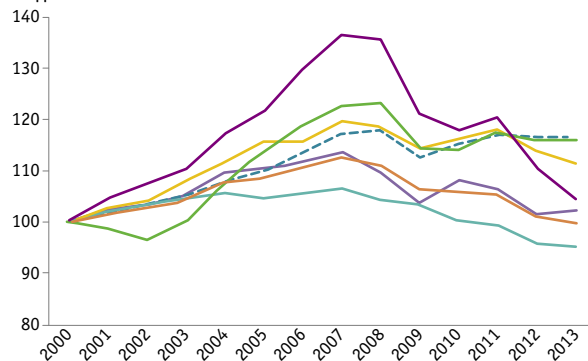
- влияние транспортного сектора на окружающую среду многоаспектно;
- транспортный сектор — единственный из основных европейских экономических секторов, для которого выбросы парниковых газов с 1990 г. продолжают увеличиваться;
- выбросы транспортом загрязняющих веществ в период с 2000 по 2014 г. в целом снизились, прежде всего это касается летучих органических соединений (–84 %), кроме метана, и оксида углерода (–83 %), а также оксидов азота (–39 %), оксидов серы (–42 %) и твердых частиц (–31–37 %). Важными инструментами, обеспечившими снижение загрязнения, стали ужесточение норм на выбросы, постепенное обновление транспортного парка и повышение требований к качеству топлива.

Рис. 1 демонстрирует сравнение выбросов парниковых газов в Европе в 2013 г. относительно 2000 г. и вклад различных видов транспорта в суммарные выбросы транспортным сектором, а на рис. 2 показана динамика выбросов различных загрязняющих веществ. Как видно из рис. 2, для ряда загрязнителей (SO_x , летучие органические соединения, кроме метана) наблюдается тенденция к существенному сокращению, в то время как в отношении других компонентов (NO_x , твердые частицы), несмотря на некоторый прогресс, положительные результаты пока не достигнуты.

В России рост антропогенных эмиссий парниковых газов (исключая землепользование, изменений в землепользовании и лесное хозяйство) постепенно замедлился в 2010–2012 гг. и несколько снизился в 2013 и 2014 гг., что соответствует сокращению потребления энергии из-за некоторого спада объемов промышленного производства (рис. 3). Приведенная на рис. 3 группировка выбросов по секторам соответствует методологии Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), согласно которой выбросы от сжигания всех видов ископаемого топлива, так же как технологические выбросы и поступление паров топлив в атмосферу, относятся к энергетическому сектору независимо от отрасли экономики [3, 4].

На рис. 4 представлен вклад различных секторов в выбросы парниковых газов для Италии, России и всего мира (группировка выбросов по секторам соответствует вышеупомянутой методологии МГЭИК). В связи с тем что на большей части территории России в течение года преобладают низкотемпературные условия и соответственно требуются серьезные затраты тепловой энергии на обогрев промышленных и жилых зданий, то основная доля выбросов парниковых газов приходится на энергетический сектор. В Италии, стране со средиземноморским климатом и, как следствие, с существенно меньшими затратами энергетического сектора, доля транспорта в общих выбросах парниковых газов намного выше, как и в других европейских странах с мягкими климатическими условиями.

а Индекс относительно 2000 г.



б



Рис. 1. Выбросы парниковых газов в Европе:

а — динамика выбросов для транспорта в период 2000–2013 гг. по сравнению с ВВП; б — вклад различных видов транспорта в выбросы парниковых газов в 2013 г. (на основе данных [1]);

- тяжелый грузовой автотранспорт; — ВВП;
- пассажирский автотранспорт; — легкий грузовой автотранспорт;
- международная авиация;
- международное судоходство;
- весь транспорт (включая международные перевозки)

Индекс относительно 2000 г.

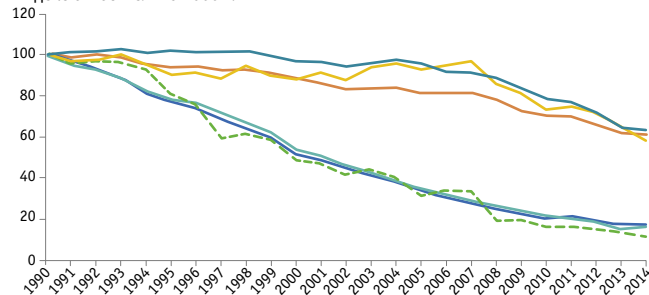
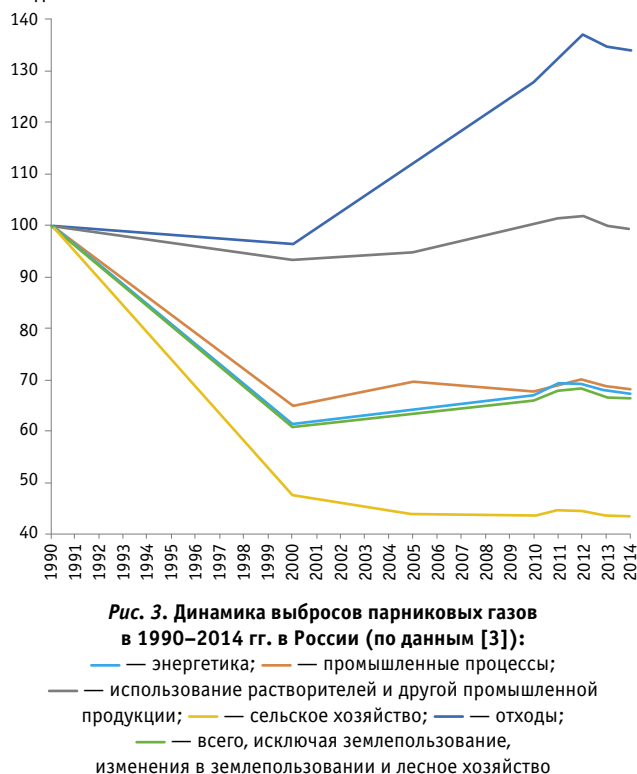


Рис. 2. Выбросы загрязняющих воздух веществ транспортным сектором в Европе (на основе данных [2]):

- $TCH_{2.5}$; — SO_x ; — NO_x ;
- SO_x , кроме международных перевозок; — ЛОС; — CO

Индекс относительно 1990 г.



На рис. 5 приведена динамика изменения общего количества токсичных выбросов и количества выбросов наиболее распространенных загрязняющих веществ относительно 2000 г., а также удельные выбросы на единицу ВВП, на душу населения и на единицу энергии для России. В связи с ростом объемов промышленного производства и соответственно энергопотребления, а также существенным ростом автопарка страны после 2000 г. [6], несмотря на некоторое снижение общего объема загрязнения, по большому числу компонентов наблюдалось увеличение. При этом вклад передвижных источников вырос

с 40,9 % в 2010 г. до 44,1 % в 2014 г. В то же время удельные выбросы (см. рис. 5б) сократились, что в целом говорит об эффективности мероприятий, соответствующих государственной природоохранной политике, в том числе об улучшении качества применяемых моторных топлив. Кроме того, в 2013–2014 гг. незначительная доля в снижении удельных выбросов связана с кризисными явлениями в экономике, а следовательно, с сокращением энергопотребления.

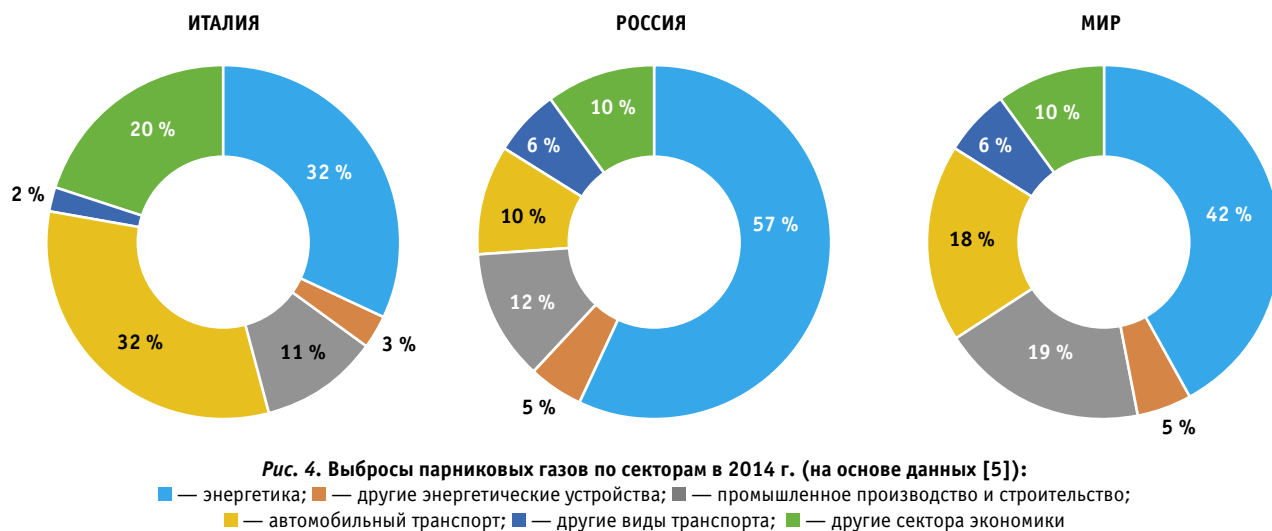
1. ОГРАНИЧЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

1.1. Глобальные и местные аспекты негативного воздействия транспортных загрязнений

Последствия выбросов токсичных веществ и парниковых газов можно рассматривать с разных точек зрения и предлагать различные альтернативы для решения этой проблемы.

Выбросы транспортных средств являются важнейшей частью производства энергии и вносят серьезный вклад в проблему изменения климата. Ограничение выбросов парниковых газов следует рассматривать прежде всего с точки зрения их глобального негативного воздействия, но также необходимо принимать во внимание национальные приоритеты и стратегии сокращения выбросов. В том числе нужно учитывать местные условия, уровни фактических концентраций загрязняющих веществ и их пороговых значений. Очень важными факторами являются географическое положение и местный потенциал рассеивания и разбавления выбросов до неопасных концентраций. Например, весьма острая ситуация сложилась в Северной Италии, в частности в долине реки По, где длительно накапливающиеся и нерассеивающиеся загрязнения обусловлены высоким вкладом транспортных средств [7].

Из рис. 6, на котором представлены концентрации твердых частиц (хорошо коррелирующие с плотностью транспортных потоков) в различных регионах Италии [8], очевидна напряженная ситуация на севере страны, требующая индивидуального подхода к решению этой проблемы.



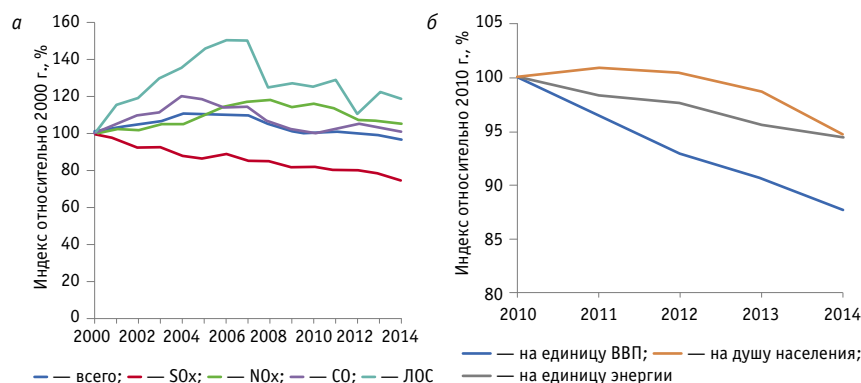


Рис. 5. Динамика относительного количества выбросов загрязняющих веществ в России (расчеты на основе данных [6]):
 а — индекс объемов выбросов наиболее распространенных загрязняющих веществ (оксиды серы, азот, углерод, летучие органические соединения — ЛОС) в сравнении с 2000 г.; б — индекс удельных выбросов загрязняющих веществ на единицу ВВП, на душу населения и на единицу энергии в сравнении с 2010 г.



Рис. 6. Концентрация твердых частиц с размером 10 мк и меньше (PM₁₀) в различных районах Италии [8]:
 ● — в пределах нормативов; ● — превышает среднесуточную предельную норму (50 мг/м³; макс. 35 дней в году); ● — превышает годовую предельную норму (40 мг/м³)

В крупнейших городах ряда регионов России, таких как Москва, Воронеж, Ростов-на-Дону, Краснодар, Оренбург, Екатеринбург, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Саратов, Тюмень, Самара, Казань, Пермь, Волгоград и Новосибирск, вклад автотранспорта в суммарные выбросы составляет 50–95 % [9]. Например, в Екатеринбурге автомобильный и железнодорожный транспорт относятся к числу основных источников загрязнения атмосферы, наряду с предприятиями машиностроения и металлообработки, черной и цветной металлургии, строительной и химической промышленности, ТЭЦ, при этом суммарные выбросы автотранспорта составляют 85 % антропогенных выбросов. Екатеринбург включен в приоритетный список городов с наибольшим уровнем загрязнения, особенно значимы здесь повышенные концентрации формальдегида, диоксида азота, бенз(а)пирена и этилбензола, к тому же в 2009–2014 гг. отмечался рост загрязнения воздуха диоксидом азота и взвешенными веществами [9]. Высокий уровень загрязнения перечисленными веществами не может не сказываться на здоровье населения, причем особенно опасны значительно превышающие ПДК концентрации бенз(а)пирена — сильнейшего канцерогена. Таким образом, в России климатические и экономические особенности вызывают необходимость индивидуализированного подхода к решению экологических проблем, связанных с выбросами токсичных веществ транспортом, а экологическая обстановка в больших городах требует принятия неотложных и высокоэффективных природоохранных мер.

1.2. Инструменты снижения загрязнений

Для снижения воздействия загрязнений на окружающую среду в различных схемах и с разной эффективностью применяются следующие инструменты:

- ограничение использования транспортных средств, вызывающих наибольшее поступление загрязняющих веществ в окружающую среду;

- использование экологически более приемлемых видов топлива;
- технологическое совершенствование конструкции двигателей;
- рациональное планирование дорожного движения.

Эффективным, но труднореализуемым решением является выбор в пользу общественного транспорта, особенно тех его видов, которые безопасны для окружающей среды. При этом необходимо учитывать стоимость инфраструктурных изменений и общественное мнение. Успешность данного подхода была вполне удовлетворительно продемонстрирована в некоторых районах Северной Европы.

Весьма перспективны с точки зрения повышения экологической безопасности автотранспорта налоговые инструменты. Например, средства от сбора транспортных налогов могут направляться на развитие дорожной инфраструктуры в регионах [10]. Следует отметить, что действующие в разных странах системы налогового регулирования по-разному подходят к решению вопроса улучшения качества производимых топлив, однако не дифференцируют налоговые ставки в зависимости от выбросов углекислого газа при сгорании топлива, которые в пределах определенного экологического класса топлива могут значительно отличаться.

Удельные выбросы углекислого газа, как было показано в [11], напрямую зависят от плотности применяемых моторных топлив и в целом коррелируют с выбросами токсичных веществ при данных определенных условиях. Это приводит к необходимости снижать содержание плотности бензинов и дизельных топлив до нижнего предела внутри конкретной категории качества, в частности, за счет изменения температурного диапазона выкипания бензиновой и дизельной фракций. Такое технологическое решение не требует дополнительных капитальных затрат, однако, чтобы мотивировать производителей моторных топлив на производство топлив с минимальной допустимой плотностью, необходимо использовать методы

экономического стимулирования. В данном случае весьма целесообразным было бы введение экологического налога, учитывающего не только экологический класс применяемого топлива, но и его плотность [12–14]:

$$T_{el_i} = R_i \cdot G_i = (R_m + R_{ad}) \cdot G_i, \quad (1)$$

где T_{el_i} — сумма экологического налога на бензин/дизельное топливо i -го экологического класса, денежные единицы;

R_i — ставка экологического налога на моторное топливо, ден. ед./т;

G_i — вес проданного топлива i -го экологического класса, т;

R_m — основная ставка экологического налога на топливо i -го экологического класса, ден. ед./т, зависящая от экологического класса топлива;

R_{ad} — дополнительная ставка экологического налога на i -й тип топлива, ден. ед./т, определяемая в зависимости от плотности топлива.

Введение подобного механизма налогового стимулирования, повышающего мотивацию нефтезаводов к улучшению экологических характеристик производимых моторных топлив, возможно в рамках одного государства либо на межгосударственном уровне.

Использование топлив с улучшенными качествами (биотоплива, реформулированный бензин) может привести к важным позитивным эффектам — снижению выбросов парниковых газов и токсичных веществ. Причем чтобы выявить реальные преимущества и ограничения в применении этих топлив, следует оценивать весь их жизненный цикл — от производства до потребления. Кроме того, необходим тщательный учет эксплуатационных расходов, социальных и этических аспектов.

Подходы к решению проблемы загрязнения атмосферного воздуха во многих крупных городах РФ отличаются от подходов, пригодных для стран с теплым климатом. Например, низкотемпературные климатические условия России ограничивают возможности применения биотоплив и бензино-спиртовых смесей. С другой стороны, кардинальное улучшение качества традиционных бензинов и дизельных топлив ограничено возможностями нефтеперерабатывающей промышленности и необходимостью привлечения крупных инвестиций [15, 16]. В связи с этим важное значение имеет применение быстрореализуемых методов, которые не требуют больших затрат, но в то же время дают весьма существенный эффект, позволяющий улучшить качество топлив и снизить отрицательные экологические последствия эксплуатации автомобилей. Для принятия объективных решений в данном направлении требуется использовать методики оценки эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий. Они позволяют обосновывать выбор лучшего из альтернативных вариантов при их сравнении по максимальной величине интегрального эколого-экономического эффекта; реализовывать природоохранные мероприятия на основе их эффективности с учетом экономической и экологической составляющих; повышать экономическую заинтересованность в принятии природоохранных решений [17].

Например, уникальным по простоте методом является применение к топливам многофункциональной присадки, дающей

комплексный положительный эффект как для бензинов, так и для дизельных топлив [18, 19] (табл. 1). Он позволяет существенно снизить экологическую нагрузку от автотранспорта в больших городах, потребление моторных топлив и потребность в высокооктановых бензинах.

Таблица 1

Улучшение эксплуатационных и экологических характеристик автомобилей применением ультрамалых добавок многофункциональной присадки к топливам (9,25 ppm в бензине и 27,75 ppm в дизельном топливе)

Характеристика	Бензиновый двигатель	Дизельный двигатель
Расход топлива, %	–5–12	–4–7
Выбросы, %:		
CO	–15–30	–15–17
NO _x	–20–26	–20–22
CH	–8–35	–35–37
бенз(а)пирен и его гомологи	–95–96	—
твердые частицы (сажа)	—	–40–50
Требования к октановому числу, пункты	–6–10	—
Цетановое число, пункты	—	+3–4
Потери от испарения бензина, %	–15–20	—

К числу методов, способствующих сокращению выбросов, относится технологическое совершенствование конструкции двигателей, которое поощряется государственными органами и производителями автомобилей. Встречными аспектами, требующими учета, являются длительный жизненный цикл существующего автопарка, разница между результатами лабораторных испытаний и дорожными выбросами, наличие дополнительных негативных эффектов помимо выбросов отработавших газов.

Некоторые междисциплинарные инновационные решения, направленные на улучшение состояния автомобильных двигателей, могут существенно повышать их топливную экономичность и экологические характеристики. Одно из таких решений — технология устранения нагарообразования в двигателе за счет нанесения на рабочие поверхности защитно-катализического нанослоя металла, катализирующего реакцию газификации [20, 21]. Устранение нагара улучшает теплоотвод в двигателе, в результате чего снижается образование оксидов углерода и азота, а следовательно, и их выбросов. Сокращаются также удельный расход топлив в двигателе, выбросы полициклических ароматических углеводородов, снижаются требования к октановому числу бензина. Следует отметить, что эта технология эффективна как для новых, так и для бывших в эксплуатации двигателей.

Другим полезным инструментом является оценка влияния на качество атмосферного воздуха распределения транспортных потоков на территории. Чтобы регулировать и перераспределять потоки транспорта, необходимо рассматривать модели атмосферного рассеивания транспортных эмиссий. Такие модели позволяют учитывать, как перераспределение транспорта влияет на качество воздуха урбанизированных территорий

и какие преимущества это дает с точки зрения экологической безопасности. Несмотря на то что реальная возможность управлять транспортными потоками, как и прогнозирование влияния различных сценариев оптимизации дорожной сети и организации движения на состояние атмосферного воздуха, являются очень сложными задачами, их, тем не менее, следует решать ввиду важности проблемы [22].

В условиях России значимым фактором повышения топливной экономичности двигателей, кроме перечисленных, является улучшение качества дорожных покрытий, состояние которых в настоящее время в большинстве регионов недостаточно удовлетворительно.

Для принятия окончательных управленческих и политических решений рассмотренные инструменты, направленные на снижение негативных экологических воздействий, необходимо оценивать с учетом их эффективности, практической применимости, требуемых затрат, инфраструктурных инноваций и социально-экономических преобразований.

2. СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ И ЭКСТЕРНАЛИЙ

Решения, способные уменьшить отрицательное влияние автомобильного транспорта, требуют дополнительных затрат, но в то же время приводят к улучшению качества воздуха, а следовательно, к снижению негативных внешних эффектов. Сравнение этих двух аспектов — важный критерий выбора при анализе эффективности предлагаемых мер и их значения в рамках целевых результатов.

Отправной точкой для оценки выгод и затрат является определение объемов выбросов. Далее необходимо проанализировать два сценария: базовый и сценарий ситуации в результате принятия необходимых мер (оба должны рассматриваться в их динамическом развитии). Использование приемлемых коэффициентов выбросов для оценки технологических аспектов или прогнозов с целью принятия решений является обязательным условием индивидуализации будущих количественных сценариев. Этот аспект требует тщательного изучения каждой предлагаемой технологии, а также реалистичной оценки возможностей при изменении планирования транспортных потоков.

В качестве примера на рис. 7 показана оценка сокращения выбросов ЛОС (по сравнению с базовой ситуацией) в США после принятия процедур, установленных Законом о чистом воздухе (CAAA), за 2000–2020 гг. на основе данных [23]. Расходы на осуществление предлагаемых мер складываются из затрат на производство, научные исследования и разработки, капитальных вложений, увеличения производительности, занятости, стоимости потребления ресурсов, изменений дорожной инфраструктуры. Суммарные затраты можно оценить на основе данных об удельных затратах, полученных путем сбора соответствующей информации у лиц, ответственных за конкретные меры и осуществляющих контроль их выполнения.

Важно отметить, что оценить стоимость технологических мер воздействия достаточно просто, тогда как инвестиции, необходимые для совершенствования дорожной сети и системы организации движения, изменения структуры и среднего возраста автопарка, зависят от множества социальных и экономических аспектов, которые необходимо учитывать при расчете.

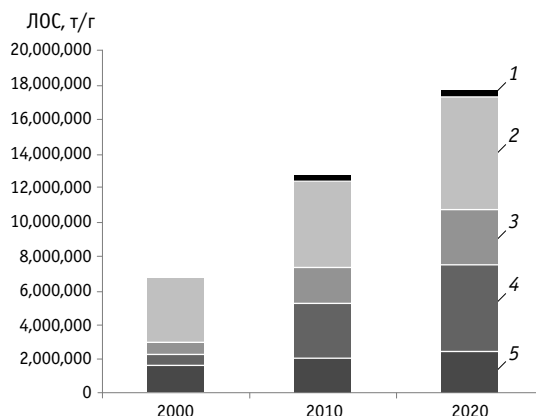


Рис. 7. Сокращение выбросов ЛОС при реализации мер Закона о чистом воздухе по категориям источников загрязнения:
1 — неидентифицируемые источники; 2 — земельные площади;
3 — внедорожные мобильные источники; 4 — дорожный транспорт;
5 — промышленные точечные источники

Для предотвращения или снижения негативных последствий эксплуатации транспорта необходима их адекватная экономическая оценка. Как правило, учитываются последствия, наносимые выбросами токсичных веществ, при этом игнорируются отрицательные экологические последствия выбросов углекислого газа и потребления кислорода в процессах сгорания топлива. Между тем на современном этапе происходит глобальное сокращение запасов энергоресурсов и увеличение объемов поступления в атмосферу антропогенных выбросов парниковых газов. С другой стороны, объемы потребления атмосферного кислорода на техногенные цели значительно превышают объемы потребления на дыхание живых обитателей планеты, а в крупных регионах превышают объемы воспроизводства кислорода. Эти негативные последствия носят глобальный характер и должны учитываться в составе общих экстерналий, возникающих при эксплуатации транспорта [24].

Отсюда следует, что при экономической оценке экологического ущерба, наносимого атмосферному воздуху эксплуатацией автомобильного транспорта, целесообразно рассматривать три составляющих: негативные воздействия выбросов загрязняющих токсичных веществ D_{ts}^{el} , углекислого газа $D_{CO_2}^{el}$, потребления автотранспортом атмосферного кислорода $D_{O_2}^{el}$. Суммарный экологический ущерб D^{el} , таким образом, можно оценить по формуле

$$D^{el} = D_{ts}^{el} + D_{CO_2}^{el} + D_{O_2}^{el}. \quad (2)$$

В качестве удельного ущерба от выбросов углекислого газа может быть принята экономическая оценка стоимости снижения 1 т выбросов парниковых газов. Она может определяться как индивидуально на уровне государств, так и на межгосударственном уровне аналогично опыту Киотского протокола [25].

Экологический ущерб от потребления кислорода на сжигание топлива может быть рассчитан исходя из восстановительной стоимости 1 т свободного кислорода, определяемой как сумма затрат на проведение всего комплекса лесохозяй-

ственных мероприятий, отнесенная на продуцируемый лесом свободный кислород, и фактической массы потребленного кислорода за отчетный период.

Более полный учет отрицательных экстерналий повысит объективность принятия решения по реализации природоохранных мероприятий и требования к компенсации отрицательных экологических последствий производителями этих экстерналий. Сравнение понесенных затрат и полученных выгод с точки зрения уменьшения экстерналий является заключительным этапом процедуры оценки, устанавливающим важный критерий принятия решений для государственной власти.

Главным следствием улучшения качества воздуха является улучшение состояния здоровья населения, которое оценивается на основе эпидемиологических исследований как снижение риска. Параллельно необходимо учитывать экологические преимущества и улучшение качества жизни.

Кроме того, следует принимать во внимание и некоторые дополнительные аспекты, в частности, такие:

поскольку понесенные затраты, требующие компенсации, и снижение негативного воздействия загрязнений нелинейны во времени, для того чтобы принимать решения по планированию природоохранных мер с учетом фактора времени необходимо сравнивать кратко-, средне- и долгосрочную перспективу;

интенсивность воздействия на объемы выбросов в атмосферу обычно оказывает нелинейное влияние на выгоды и затраты;

надежность сравнения связана, с одной стороны, с определением реалистичных затрат, а с другой — со способностью прогнозировать влияние снижения загрязнения на состояние здоровья и на соответствующие расходы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка эмиссионных потоков от автотранспорта связана с удельными выбросами, на которые влияют, с одной стороны, конструкция двигателей и автомобилей и качество применяемого топлива, а с другой — организация дорожного движения и состояние автопарка, зависящие от политических решений и социально-экономических аспектов.

Воздействие загрязнений на здоровье в целом трудно оценить из-за сложности учета всех влияющих факторов. Это осложняется также и необходимостью дифференцирования ответственности субъектов загрязнения. При оценке затрат на снижение негативного воздействия автотранспорта должны учитываться не только технологические аспекты, но и изменение образа жизни, организации транспортных процессов, дорожной инфраструктуры мегаполисов. Все это создает проблемы при поиске и выборе оптимальных вариантов, позволяющих, с одной стороны, удовлетворять потребности современного общества в развитии транспортной инфраструктуры, а с другой — гарантировать устойчивое развитие транспорта.

На государственном уровне природоохранные решения, направленные на снижение негативных последствий эксплуатации автотранспортных средств, необходимо стимулировать с учетом реальных возможностей экономики, климатических особенностей и экологической ситуации. Требуются также и межправительственные решения для обеспечения стабильного развития транспорта в долгосрочной перспективе.

Исследование поддержано программой 211 Правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006.

Литература

1. Evaluating 15 years of transport and environmental policy integration TERM 2015, EEA Report No. 7/2015. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
2. Transitions towards a more sustainable mobility system TERM 2016: Transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe, EEA Report No. 34/2016. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change [Electronic resource]. URL: <http://www.ipcc.ch> (access date: 29.01.2017).
4. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2014 год / Росгидромет. М., 2015. 199 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.meteorf.ru/upload/iblock/4c0/Obzor_2014.pdf (дата обращения: 29.01.2017).
5. IEA CO₂ Emissions from Fuel Combustion, OECD/IEA. Paris, 2016. [Electronic resource]. URL: http://wds.iea.org/wds/pdf/Worldco2_Documentation.pdf (access date: 29.01.2017).
6. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения: 29.01.2017).
7. Panepinto D., Brizio E., Genon G. Atmospheric pollutants and air quality effects: Limitation costs and environmental advantages (a cost-benefit approach) // Clean Technologies and Environmental Policy. 2014. 16 (8). P. 1805–1813. ISSN 1618-954X.
8. IX Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano. Emissioni e qualità dell'aria / ISPRA. 2011.

References

1. Evaluating 15 years of transport and environmental policy integration TERM 2015, EEA Report No. 7/2015. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
2. Transitions towards a more sustainable mobility system TERM 2016: Transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe, EEA Report No. 34/2016. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change [Electronic resource]. URL: <http://www.ipcc.ch> (access date: 29.01.2017).
4. Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2014 god [Survey of the environment condition and pollution in Russian Federation for 2014] / Rosgidromet. M., 2015. 199 s. [Electronic resource]. URL: http://www.meteorf.ru/upload/iblock/4c0/Obzor_2014.pdf (access date: 29.01.2017).
5. IEA CO₂ Emissions from Fuel Combustion, OECD/IEA. Paris, 2016. [Electronic resource]. URL: http://wds.iea.org/wds/pdf/Worldco2_Documentation.pdf (access date: 29.01.2017).
6. Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Federal State Statistics Service]. [Electronic resource]. URL: <http://www.gks.ru> (access date: 29.01.2017).
7. Panepinto D., Brizio E., Genon G. Atmospheric pollutants and air quality effects: Limitation costs and environmental advantages (a cost-benefit approach) // Clean Technologies and Environmental Policy. 2014. 16 (8). P. 1805–1813. ISSN 1618-954X.
8. IX Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano. Emissioni e qualità dell'aria / ISPRA. 2011.

9. Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов РФ за 2014 год [Электронный ресурс]. URL: <http://www.meteorf.ru/product/infomaterials/ezhegodniki> (дата обращения: 29.01.2017).
10. Mayburov I., Leontyeva Y. Reducing the negative impact of motor transport on the environment: Prospects for the use of fiscal instruments in Russia // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 186. P. 863–874.
11. Магарил Е. Р., Магарил Р. З. Влияние плотности топлив на эксплуатационные и экологические характеристики автомобилей // Известия вузов. Нефть и газ. 2016. № 6. С. 108–116. ISSN 0445-0108.
12. Голубева А. С., Магарил Е. Р. Экономическое стимулирование сокращения эмиссии CO₂ автотранспортом // Вестник УрФУ. Сер. Экономика и управление. 2016. Т. 15. № 3. С. 359–381. ISSN 2412-5725.
13. Голубева А. С., Магарил Е. Р. Совершенствование механизма экономического стимулирования сокращения выбросов CO₂ автомобилями // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 39–45. ISSN 1815-9400.
14. Golubeva A., Magaril E. Improved economic stimulation mechanism to reduce vehicle CO₂ emissions // WIT Transactions on the Built Environment. 2013. Vol. 130. P. 437–445.
15. Магарил Е. Р. Модернизация нефтепереработки как фактор устойчивого развития автотранспорта // Вестник УрФУ. Сер. Экономика и управление. 2011. № 4. С. 32–37. ISSN 2412-5725.
16. Magaril E. The solution to strategic problems in the oil refining industry as a factor for the sustainable development of automobile transport // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 190 (2). P. 821–832.
17. Абржина Л. Л., Магарил Е. Р. Оценка эколого-экономической эффективности применения multifunctional additives к моторным топливам / УГТУ-УПИ. Екатеринбург, 2010. 150 с.
18. Магарил Е. Р., Магарил Р. З. Повышение экологической безопасности и эффективности эксплуатации автотранспорта применением присадки к топливам // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 84–89. ISSN 1815-9400.
19. Magaril E. Improving the efficiency and environmental safety of gasoline engine operation // WIT Transactions on the Built Environment. 2013. Vol. 130. P. 437–445.
20. Защитно-каталитический нанослой для бензиновых двигателей внутреннего сгорания / Е. Р. Магарил, Р. З. Магарил, В. Г. Бамбуров и др. // Химическая технология. 2011. Т. 12. № 8. С. 485–490. ISSN 1684-5811.
21. Magaril E. Carbon-free gasoline engine operation // International Journal of Sustainable Development and Planning. 2015. Vol. 10 (1). P. 100–108.
22. Piano urbano della mobilità del Comune di Reggio Emilia. Simulazione modellistica dell'inquinamento atmosferico da traffico veicolare in provinciale di Reggio Emilia. Allegato al documento finale / Università di Venezia. Giugno 2007.
23. The Benefits and Costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020. Final Report — REV A / U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation. April 2011.
24. Magaril E., Abrzhina L., Belyaeva M. Environmental damage from the combustion of fuels: Challenges and methods of economic assessment // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 190 (2). P. 1105–1115.
25. Framework Convention on Climate Change [Electronic resource]. URL: <http://www.newsroom.unfccc.int/> (access date: 29.01.2017).
9. Ezhegodnik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferynyy vozdukh gorodov i regionov RF za 2014 god [Yearbook of emissions of pollutants into the air of cities and regions of the Russian Federation for 2014]. [Electronic resource]. URL: <http://www.meteorf.ru/product/infomaterials/ezhegodniki> (access date: 29.01.2017).
10. Mayburov I., Leontyeva Y. Reducing the negative impact of motor transport on the environment: Prospects for the use of fiscal instruments in Russia // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 186. P. 863–874.
11. Magaril E. R., Magaril R. Z. Vliyaniye plotnosti topliv na ekspluatatsionnye i ekologicheskie kharakteristiki avtomobiley [Effect of density of fuels on the operational and ecological characteristics of motor vehicles] // Izvestiya vuzov. Neft i gaz. 2016. № 6. S. 108–116. ISSN 0445-0108.
12. Golubeva A. S., Magaril E. R. Ekonomicheskoye stimulirovaniye sokrashcheniya emissii CO₂ avtotransportom [Economic stimulation to reduce vehicle CO₂ emissions] // Vestnik UrFU. Ser. Ekonomika i upravleniye. 2016. T. 15. № 3. S. 359–381. ISSN 2412-5725.
13. Golubeva A. S., Magaril E. R. Sovershenstvovaniye mekhanizma ekonomicheskoy stimulirovaniya sokrashcheniya vybrosov CO₂ avtomobilyami [Improvement of economic incentives for reduction of motor transport CO₂ emissions] // Transport Urala. 2013. № 3 (38). S. 39–45. ISSN 1815-9400.
14. Golubeva A., Magaril E. Improved economic stimulation mechanism to reduce vehicle CO₂ emissions // WIT Transactions on the Built Environment. 2013. Vol. 130. P. 437–445.
15. Magaril E. R. Modernizatsiya neftepererabotki kak faktor ustoychivogo razvitiya avtotransporta [Oil refining modernization as the factor of motor transport sustainable development] // Vestnik UrFU. Ser. Ekonomika i upravleniye. 2011. № 4. S. 32–37. ISSN 2412-5725.
16. Magaril E. The solution to strategic problems in the oil refining industry as a factor for the sustainable development of automobile transport // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 190 (2). P. 821–832.
17. Abrzhina L. L., Magaril E. R. Otsenka ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya mnogofunktsionalnykh prisadok k motornym toplivam [Assessment of the environmental and economic efficiency of the use of multifunctional additives to motor fuels] / UGTU-UPI. Ekaterinburg, 2010. 150 s.
18. Magaril E. R., Magaril R. Z. Povysheniye ekologicheskoy bezopasnosti i effektivnosti ekspluatatsii avtotransporta primeneniye prisadki k toplivam [Improving environmental safety and efficient operation of motor vehicles by using fuel additive] // Transport Urala. 2014. № 2 (41). S. 84–89. ISSN 1815-9400.
19. Magaril E. Improving the efficiency and environmental safety of gasoline engine operation // WIT Transactions on the Built Environment. 2013. Vol. 130. P. 437–445.
20. Zashchitno-kataliticheskiy nanosloy dlya benzinovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya [Protective-catalytic nanolayer for gasoline internal combustion engines] / E. R. Magaril, R. Z. Magaril, V. G. Bamburov i dr. // Khimicheskaya tekhnologiya. 2011. T. 12. № 8. S. 485–490. ISSN 1684-5811.
21. Magaril E. Carbon-free gasoline engine operation // International Journal of Sustainable Development and Planning. 2015. Vol. 10 (1). P. 100–108.
22. Piano urbano della mobilità del Comune di Reggio Emilia. Simulazione modellistica dell'inquinamento atmosferico da traffico veicolare in provinciale di Reggio Emilia. Allegato al documento finale / Università di Venezia. Giugno 2007.
23. The Benefit and Costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020. Final Report — REV A / U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation. April 2011.
24. Magaril E., Abrzhina L., Belyaeva M. Environmental damage from the combustion of fuels: Challenges and methods of economic assessment // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 190 (2). P. 1105–1115.
25. Framework Convention on Climate Change [Electronic resource]. URL: <http://www.newsroom.unfccc.int/> (access date: 29.01.2017).

УДК 656.085

Станислав Сергеевич Евтюков, кандидат технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия,

Егор Викторович Голов, магистрант Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия

АУДИТ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ РЕГИОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Stanislav Sergeyevich Evtyukov, PhD in Engineering, Associate Professor, Over-Ground Transport Technological Machines Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE), St. Petersburg, Russia,

Egor Viktorovich Golov, graduate student, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE), St. Petersburg, Russia

Road traffic safety audit on roads of regional importance in Leningrad region

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме — безопасности дорожного движения. Приведена статистика аварийности на автомобильных дорогах Российской Федерации. Рассмотрены различные методы определения участков концентрации дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Особое внимание уделено региональным дорогам Ленинградской области и проведению аудита безопасности дорожного движения: в соответствии с ОДМ 218.6.015–2015 выявлены участки концентрации ДТП, проанализирована статистика дорожно-транспортных происшествий на них в 2015 и 2016 гг.

Ключевые слова: дорожно-транспортное происшествие, автомобильные дороги, безопасность дорожного движения, аварийность, участок концентрации дорожно-транспортных происшествий.

Summary

The article is devoted to the urgent problem — road safety. Accident statistics on the roads of the Russian Federation are given. Various methods for determining areas of concentration of road accidents (RA) are considered. Particular attention is paid to the regional roads of the Leningrad region and the road safety audit: in accordance with the ITMD (Industrial Traffic Methodical Document) 218.6.015–2015 identified areas of traffic accidents, analyzed the statistics of traffic accidents on them in 2015 and 2016.

Keywords: road and transport incident, highways, road safety, accidents, concentration areas of road accidents.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-85-89

Санкт-Петербург — крупный экономический центр Российской Федерации с высоким уровнем развития промышленности, строительства, торговли, туризма, что, в свою очередь, является стимулом для повышенной урбанизации. Этот процесс сопровождается увеличением востребованности в перевозках населения и различных грузов не только в пределах самого города, но и на прилегающих территориях, в частности в Ленинградской области. Для сравнения: в 2016 г. в Российской Федерации было зафиксировано порядка 56 000 000 транспортных средств, а в Санкт-Петербурге и Ленинградской области — 3 810 256, что при населении 1 465 447 10 и 7 071 928 чел. создает уровень автомобилизации 382 и 539 автомобилей на 1 000 чел. соответственно. Приведенные статистические данные показывают, что уровень автомобилизации в Санкт-Петербурге и области значительно выше среднего значения по России.

Для обеспечения должного уровня транспортной мобильности необходима хорошо развитая современная сеть автомобильных дорог — от ее состояния напрямую зависит функционирование и безопасность передвижения на личном, пассажирском и грузовом транспорте. Одним из показателей, характеризующих уровень обеспеченности территории автомобильными дорогами, является их плотность (табл. 1).

Из приведенных в табл. 1 данных видно, что в Санкт-Петербурге и Ленинградской области плотность автомобильных дорог выше общероссийского значения. Это говорит о высоком уровне развития дорожной инфраструктуры, что, в свою очередь, сказывается и на безопасности дорожного движения (БДД).

В то же время пока нельзя сказать, что на автомобильных дорогах страны низкая аварийность: статистические данные о дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) в Российской Федерации за период с 2005 по 2016 г. [1, 2], представлен-

ные в табл. 2, свидетельствуют о высоком уровне травматизма и гибели. Тяжесть последствий от ДТП в среднем составляет 10, т. е. примерно каждая десятая травма, полученная в ДТП на дорогах России, несовместима с жизнью.

Из анализа приведенной статистики можно сделать вывод, что с момента начала действия федеральной целевой программы «Повышение безопасности дорожного движения в 2013–2020 годах» [3] общее количество ДТП пошло на спад и к 2016 г. снизилось на 23 % относительно показателей 2013 г., тем не менее смертность и, следовательно, тяжесть последствий от ДТП остается по-прежнему высокой.

Таблица 1

Плотность автомобильных дорог

Показатель	Российская Федерация	Санкт-Петербург	Ленинградская область	Санкт-Петербург и Ленинградская область
Протяженность автомобильных дорог, км	1 396 000	3337,5	18736,7	22074,2
Площадь, км ²	17 125 191	1439	83908	85347
Плотность, км/км ²	0,082	2,32	0,22	0,26

Таблица 2

Количество ДТП в Российской Федерации и тяжесть последствий

Год	Общее количество ДТП	Число погибших, чел.	Число раненых, чел.	Тяжесть последствий
2005	223 342	33957	274 864	11,0
2006	229 140	32724	285 362	10,3
2007	233 809	33308	292 206	10,2
2008	218 322	29936	270 883	10,0
2009	203 618	27659	255 484	9,8
2010	199 431	26567	250 635	9,6
2011	199 868	27953	251 848	10,0
2012	203 597	27991	258 618	9,8
2013	204 068	27025	258 437	9,5
2014	199 720	26963	251 785	9,3
2015	184 000	23114	231 197	10,0
2016	173 694	20308	221 140	10,9

В 2016 г. в Ленинградской области произошло 2966 ДТП, в которых погибло и ранено соответственно 493 и 3800 чел. [1]. Детальный анализ показателей аварийности в регионе за 2014–2016 гг. представлен на рис. 1.

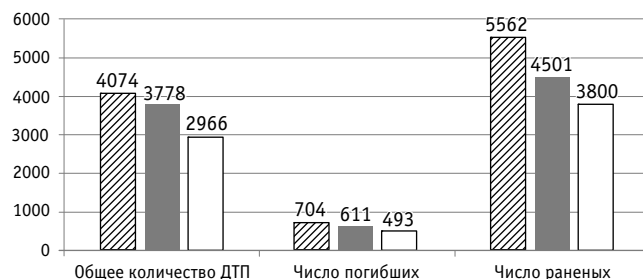


Рис. 1. Статистика ДТП с погибшими и ранеными в Ленинградской области:

▨ — 2014 г.; ■ — 2015 г.; □ — 2016 г.

Огромное значение в обеспечении безопасности дорожного движения имеют четкое определение масштабов и характера дорожно-транспортного травматизма, разработка стратегии и мероприятий для решения проблемы БДД, выявление факторов, способствующих высокому уровню аварийности. На автомобильных дорогах Ленинградской области такими факторами являются:

быстрый рост численности автотранспортного комплекса в последние годы и массовое появление новых водителей и перевозчиков. Это обусловлено активным экономическим и градостроительным развитием Ленинградской области, которое сопровождается миграционным приростом и ростом автомобилизации населения, увеличением объемов внутриобластных и транзитных автомобильных перевозок на территории региона;

нарушение правил дорожного движения водителями (превышение скорости, несоответствие скорости конкретным условиям, выезд на полосу встречного движения, несоблюдение очередности проезда перекрестков и др.) — более 90 % ДТП; нарушение правил дорожного движения пешеходами (переход проезжей части в неустановленном месте вне пешеходного перехода, неожиданный выход на проезжую часть из-за транспортного средства, дерева и др.) — 10 % ДТП;

неудовлетворительное состояние дорог и улиц (низкие сцепные качества дорожного покрытия, отсутствие или слабая видимость дорожной разметки, дорожных знаков, отсутствие освещения, тротуаров и пешеходных дорожек, пешеходных и барьерных ограждений, отсутствие или неисправность светофоров и др.) — более 25 % ДТП;

несоответствие категорий автомобильных дорог интенсивности движения автотранспорта, их неудовлетворительное состояние, зачастую провоцирующее нарушение правил дорожного движения водителями и пешеходами (например, выезд на полосу встречного движения для объезда ямы на пути движения или переход проезжей части вне зоны пешеходного перехода ввиду недостаточного количества пешеходных переходов и т. д.);

техническая неисправность транспортных средств (неисправность тормозной системы, износ протектора, неисправность внешних световых приборов и др.) — менее 1 % ДТП (доля влияния данного фактора на количество ДТП постепенно снижается в связи с ростом числа современных качественных автомобилей, сокращением среднего возраста автомобилей);

недостаточная эффективность системы государственного управления в области обеспечения безопасности дорожного движения и несоординированность деятельности уполномоченных органов исполнительной власти федерального, регионального и местного уровней.

На территории Ленинградской области пролегает 18736,7 км автомобильных дорог с твердым покрытием, в том числе федеральных — 1438,73, региональных — 9771,9, муниципальных — 7526,07 км. Как видно из приведенных данных, наибольшую часть занимают региональные дороги. На рис. 2 представлена статистика аварийности с пострадавшими на этих дорогах в 2015–2016 гг.

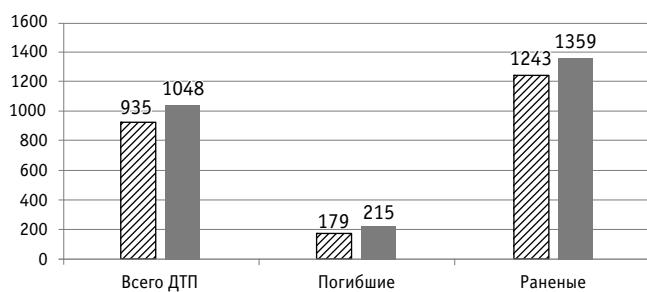


Рис. 2. Статистика ДТП с погибшими и ранеными на региональных автомобильных дорогах Ленинградской области:
▨ — 2015 г.; ■ — 2016 г.

Следует отметить, что показатели уровня безопасности дорожного движения на региональных дорогах Ленинградской области изменились в худшую сторону. Также увеличилось и количество ДТП, в которых были зафиксированы те или иные недостатки транспортно-эксплуатационного состояния дороги: в 2016 г. произошло 592 таких ДТП, в то время как в 2015 г. — 534.

Предотвратить ДТП и, как следствие, снизить аварийность на автомобильных дорогах Ленинградской области позволяет аудит аварийных участков. Данный вид работ предусматривает выявление опасных участков концентрации ДТП на основе изучения статистики, обследования и диагностику этих участков.

До мая 2015 г. при определении участков повышенной концентрации ДТП уполномоченные органы пользовались «Правилами учета и анализа дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах Российской Федерации» [4], введенными в действие 1 августа 1998 г. Согласно этим правилам участок концентрации ДТП устанавливался на основе следующих показателей:

абсолютного количества ДТП, возникших на участке дороги расчетной протяженности;

коэффициента относительной аварийности, определяемого по формуле

$$Z = \frac{a \cdot 10^6}{365 \cdot N \cdot L \cdot n},$$

где a — число всех ДТП на участке дороги за последние три года;

N — среднегодовая суточная интенсивность движения, авт./сут;

L — фактическая длина участка дороги между соседними километровыми знаками, км

n — число лет, за которые суммируются данные по ДТП ($n = 3$).

В соответствии с правилами [4] к участкам концентрации ДТП на дорогах общего пользования были отнесены километровые участки, на которых минимальное количество ДТП за три года в зависимости от интенсивности движения соответствует табличному значению (табл. 3), а значение коэффициента относительной аварийности составляет не менее 0,3 вне населенных пунктов и не менее 0,4 — в пределах населенных пунктов.

Таблица 3

Минимальное количество ДТП
в зависимости от интенсивности движения

Интенсивность движения, авт./сут	Минимальное количество ДТП за три года на участках их концентрации	
	вне населенных пунктов	в пределах населенных пунктов
Менее 3000	3	3
3000–5000	3	4
5000–13000	4	5
13000–17000	5	6
17000–19000	5	7
19000–21000	6	7
Более 21000	7	8

Стоит заметить, что правила [4] редко находили применение, различные уполномоченные дорожные органы часто пользовались иными методами определения участков концентрации ДТП, а иногда участок концентрации ДТП приравнивался к очагу аварийности.

В 2015 г. Федеральное дорожное агентство утвердило «Рекомендации по учету и анализу дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах Российской Федерации» (ОДМ 218.6.015–2015) [5]. В тексте этого документа приводится современное определение участка концентрации ДТП: это «участок автомобильной дороги, не превышающий 1000 м вне населенного пункта, 200 м в населенном пункте, или перекресток дорог, где в течение последних 12 месяцев произошло три и более ДТП одного вида или 5 и более ДТП независимо от их вида, в результате которых погибли или ранены люди» [5].

Стоит отметить, что этот метод определения участков концентрации ДТП можно считать более точным: согласно ОДМ 218.6.015–2015 количество участков концентрации ДТП будет на несколько порядков меньше (в отличие от подхода, регламентированного правилами [4]), что позволит более грамотно планировать работу дорожных служб и с большим социально-экономическим эффектом использовать денежные средства, направляемые на предупреждение аварийности на соответствующих участках и на повышение БДД.

На основе ОДМ 218.6.015–2015 был проведен аудит безопасности дорожного движения на региональных дорогах Ленинградской области. По его результатам выявлены участки

концентрации ДТП в 2015 и 2016 гг. (табл. 4 и 5) [6] и «переходящие» автомобильные дороги с установленными участками концентрации ДТП.

Таблица 4

Участки концентрации ДТП
на региональных дорогах по итогам 2015 г.

№ п/п	Район	Дорога	Участок, км+м
1	Волосовский	Гатчина — Ополье	28+580–29+280
2	Всеволожский	Парголово — Огоньки	23+950–24+950
3	Всеволожский	Парголово — Огоньки	25+170–26+110
4	Всеволожский	Парголово — Огоньки	26+750–27+500
5	Всеволожский	Парголово — Огоньки	28+950–29+790
6	Всеволожский	Парголово — Огоньки	37+917–38+400
7	Всеволожский	Санкт-Петербург — завод им. Свердлова — Всеволожск	26+500–27+120
8	Всеволожский	Санкт-Петербург — завод им. Свердлова — Всеволожск	28+930–29+550
9	Всеволожский	Санкт-Петербург — завод им. Свердлова — Всеволожск	34+300–34+950
10	Всеволожский	Санкт-Петербург — Колтуши	4+450–5+200
11	Всеволожский	Санкт-Петербург — Матокса	11+950–12+950
12	Всеволожский	Санкт-Петербург — Матокса	2+400–3+300
13	Всеволожский	Санкт-Петербург — Морье	9+350–9+680
14	Выборгский	Огоньки — Стрельцово — Толоконниково	21+100–21+930
15	Гатчинский	Гатчина — Ополье	1+450–2+150
16	Гатчинский	Пустошка — Вырица	3+300–3+600
17	Киришский	Зуево — Новая Ладога	28+510–29+500
18	Киришский	Зуево — Новая Ладога	39+305–40+200
19	Кировский	Санкт-Петербург — Кировск	34+800–35+776
20	Кировский	Санкт-Петербург — Кировск	56+700–57+000
21	Ломоносовский	Петродворец — Кейкино	5+800–6+500
22	Ломоносовский	Санкт-Петербург — Ручьи	67+100–67+250
23	Ломоносовский	Стрельна — Кипень — Гатчина	18+180–18+873
24	Ломоносовский	Стрельна — Кипень — Гатчина	19+300–19+850
25	Ломоносовский	Стрельна — Кипень — Гатчина	5+500–6+500

Таблица 5

Участки концентрации ДТП
на региональных дорогах по итогам 2016 г.

№ п/п	Район	Дорога	Участок, км+м
1	Бокситогорский	Дымы — Бор — Колбеки — Бочево	10+000–11+000
2	Всеволожский	Новая Пустошь — Невская Дубровка	4+800–5+570
3	Всеволожский	Парголово — Огоньки	31+350–32+300
4	Всеволожский	Санкт-Петербург — завод им. Свердлова — Всеволожск	29+400–30+350
5	Всеволожский	Санкт-Петербург — завод им. Свердлова — Всеволожск	34+005–34+700
6	Всеволожский	Санкт-Петербург — Колтуши	4+600–5+500
7	Всеволожский	Санкт-Петербург — Колтуши	7+250–7+900
8	Всеволожский	Санкт-Петербург — Матокса	13+020–13+600
9	Выборгский	Подъезд к Выборгу	0+200–0+750
10	Выборгский	Выборг — Светогорск	0+100–1+000
11	Гатчинский	Гатчина — Куровицы	10+500–11+400
12	Гатчинский	Красное Село — Гатчина — Павловск	10+060–10+900
13	Кировский	Санкт-Петербург — Кировск	36+900–37+895
14	Кировский	Санкт-Петербург — Кировск	38+220–38+800
15	Кировский	Ульяновка — Отрадное	17+350–17+920
16	Ломоносовский	Петродворец — Кейкино	6+420–7+350
17	Ломоносовский	Петродворец — Кейкино	22+900–23+600
18	Ломоносовский	Подъезд к Красносельскому району Санкт-Петербурга	1+800–2+450
19	Ломоносовский	Подъезд к Красносельскому району Санкт-Петербурга	2+650–2+970
20	Ломоносовский	Санкт-Петербург — Ручьи	51+970–52+700
21	Сосновый Бор	Санкт-Петербург — Ручьи	94+600–95+580
22	Сосновый Бор	Санкт-Петербург — Ручьи	96+600–97+500
23	Сосновый Бор	Форт Красная Горка — Коваши — Сосновый Бор	14+000–14+500
24	Тосненский	Подъезд к Колпино	3+400–4+030

Таблица 6

Участки концентрации ДТП
на «переходящих» автомобильных дорогах в 2015 и 2016 гг.

Автомобильная дорога	Участки концентрации ДТП, км+м	
	по итогам 2015 г.	по итогам 2016 г.
Парголово — Огоньки	23+950–24+950 25+170–26+110 26+750–27+500 28+950–29+790 37+917–38+400	31+350–32+300
Санкт-Петербург — завод им. Свердлова — Всеволожск	26+500–27+120 28+930–29+550 34+300–34+950	29+400–30+350 34+005–34+700
Санкт-Петербург — Колтуши	4+450–5+200	4+600–5+500 7+250–7+900
Санкт-Петербург — Матокса	11+950–12+950 2+400–3+300	13+020–13+600
Санкт-Петербург — Кировск	34+800–35+776 56+700–57+000	36+900–37+895 38+220–38+800
Петродворец — Кейкино	5+800–6+500	6+420–7+350 22+900–23+600
Санкт-Петербург — Ручьи	67+100–67+250	51+970–52+700 94+600–95+580 96+600–97+500

Литература

1. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения [Сайт Госавтоинспекции]. URL: <http://www.gibdd.ru/stat/> (дата обращения: 11.03.2017).
2. Плотников А. М. Методология обеспечения безопасности движения на регулируемых пересечениях улично-дорожных сетей мегаполисов : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2017. 475 с.
3. Повышение безопасности дорожного движения в 2013–2020 годах : федер. целевая программа / утв. Постановлением Правительства Рос. Федерации от 03.10.2013 г. № 864 [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2013/10/08/bezopas-site-dok.html> (дата обращения: 11.03.2017).
4. Правила учета и анализа дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах Российской Федерации : утв. приказом ФДС РФ от 23.07.1998 г. № 168 [Электронный ресурс]. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data1/7/7012/> (дата обращения: 11.03.2017).
5. ОДМ 218.6.015–2015. Рекомендации по учету и анализу дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200120721> (дата обращения: 11.03.2017).
6. Евтюков С. С., Голов Е. В. Современный метод учета дорожно-транспортных происшествий как способ организации работы дорожных служб для повышения общего уровня безопасности дорожного движения : сб. докл. I Всерос. межвуз. конф. «Магистерские слушания» / СПбГАСУ. СПб., 2016.

References

1. Svedeniya o pokazatelyakh sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Information on indicators of road safety status]. [Site]. URL: <http://www.gibdd.ru/stat/> (access date: 11.03.2017).
2. Plotnikov A. M. Metodologiya obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na reguliruemymkh peresecheniyakh ulichno-dorozhnykh setey megapolisov : dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methodology for ensuring traffic safety at the regulated intersections of metropolitan streets and road networks : DSc in Engineering Thesis]. SPb., 2017. 475 s.
3. Povyshenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v 2013–2020 godakh : feder. tselevaya programma / utv. Postanovleniem Pravitelstva Ros. Federatsii ot 03.10.2013 g. № 864 [Improving road safety in 2013–2020 : federal target program / approved by the Government Decree of Russian Federation of 03.10.2013 № 864]. [Electronic resource]. URL: <https://rg.ru/2013/10/08/bezopas-site-dok.html> (access date: 11.03.2017).
4. Pravila ucheta i analiza dorozhno-transportnykh proissheshtviy na avtomobilnykh dorogakh Rossiyskoy Federatsii : utv. prikazom FDS RF ot 23.07.1998 g. № 168 [Rules of accounting and analysis of road accidents on the roads of the Russian Federation : approved by Order FDS of the Russian Federation of 23.07.1998 № 168]. [Electronic resource]. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data1/7/7012/> (access date: 11.03.2017).
5. ODM 218.6.015–2015. Rekomendatsii po uchetu i analizu dorozhno-transportnykh proissheshtviy na avtomobilnykh dorogakh Rossiyskoy Federatsii [ITMD 218.6.015–2015. Recommendations on accounting and analysis of road accidents on the roads of the Russian Federation]. [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200120721> (access date: 11.03.2017).
6. Evtyukov S. S., Golov E. V. Sovremennyy metod ucheta dorozhno-transportnykh proissheshtviy kak sposob organizatsii raboty dorozhnykh sluzhb dlya povysheniya obshchego urovnya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Modern method of accounting for road accidents as a way of organizing the work of road services to improve the overall level of road safety] : sb. dokl. I Vseros. mezhvuz. konf. «Magisterskie slushaniya» / SPbGASU. SPb., 2016.

УДК 691.168:625.7/8

Владимир Евгеньевич Кошкарлов, кандидат технических наук, руководитель технического отдела ООО «Колтек-Кама», Москва, Россия,

Валерий Михайлович Самуйлов, доктор технических наук, профессор кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Евгений Васильевич Кошкарлов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Александр Владимирович Дудченко, генеральный директор ООО «Колтек-Кама», Москва, Россия

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗИНО-ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Vladimir Evgenyevich Koshkarov, PhD in Engineering, Head of Technical Department, Koltec-Kama LLC, Moscow, Russia,

Valeriy Mikhaylovich Samuylov, DSc in Engineering, Professor, World Economy and Logistics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Evgeniy Vasilyevich Koshkarov, PhD in Engineering, Associate Professor, World Economy and Logistics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexander Vladimirovich Dudchenko, General Director, Koltec-Kama LLC, Moscow, Russia

Efficiency of use of rubber-dispersed-reinforced asphalt concrete for transport construction

Аннотация

Дано технико-экономическое обоснование и предложена модель для расчета показателей эффективности использования модифицированных асфальтобетонных смесей, основанная на продлении межремонтных сроков модифицированных асфальтобетонных дорожных покрытий. Обоснована эффективность применения комплексного модификатора асфальтобетона КМА «КОЛТЕК», получаемого из вулканизированного каучука при переработке изношенных автомобильных шин. Приведены показатели ожидаемой эффективности использования резино-дисперсно-армированного асфальтобетона.

Ключевые слова: дорожное хозяйство, технико-экономическое обоснование, асфальтобетонная смесь, резино-дисперсное армирование, комплексный модификатор асфальтобетона КМА «КОЛТЕК», интегральный коэффициент качества, расчетно-графическая модель, межремонтный период, ожидаемый экономический эффект, срок окупаемости инновационной технологии.

Summary

The results of the feasibility study of the application of asphalt concrete inoculants in road and transport construction are presented. A technical and economic model is proposed for calculating the efficiency indexes for the use of modified asphalt-concrete mixtures based on the extension of the inter-repair times of road surfaces. The efficiency of using the multicomponent inoculant of asphalt concrete «KOLTEK», obtained during the processing of worn automobile tires, is grounded. The indicators of the expected efficiency of rubber-dispersed-reinforced asphalt concrete are given.

Keywords: road economy, feasibility study, asphalt-concrete mixture, rubber-dispersed reinforcement, multicomponent inoculant of asphalt concrete «KOLTEK», integral quality factor, calculation and graphic model, inter-repair period, expected economic effect, payback period of innovative technology.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-90-95

Современные автотранспортные магистрали и автомобильные дороги общего пользования испытывают высокие (сверхнормативные) нагрузки [1, 2]. Стандартные асфальтобетоны, приготовленные на основе местных материалов (щебня, песка, минерального порошка) и органического вяжущего в виде нефтяного битума, получаемого, как правило, методом окисления тяжелых нефтяных остатков, не выдерживают интенсивной эксплуатации. На асфальтобетонных дорожных покрытиях появляется колея по полосам наката, а сами покрытия в результате транспортных и климатических воздействий быстро разрушаются при развитии процессов трещинообразования, старения и адгезионной пассивности вяжущих.

Федеральное дорожное агентство (Росавтодор) поставило задачу разработать и внедрить такие инновационные дорожные материалы, конструкции и составы асфальтобетона, которые в современных условиях эксплуатации обеспечат межремонтный период не менее 12 лет. Решить ее возможно за счет использования полимерных модификаторов, получаемых на основе термоэластомеров (полимеров и синтетического каучука). К настоящему времени разработаны различные виды и составы резино-дисперсно-армированных асфальтобетонов (РДА АБ) с заданными физико-механическими свойствами (непрерывного, прерывистого гранулометрического состава), улучшающими эксплуатационные показатели и качественные характеристики покрытий. РДА АБ, приготовленные из традиционного сырья с использованием новых эффективных модификаторов, применяются для верхних слоев дорожных одежд, непосред-

ственно воспринимающих транспортную нагрузку и вступающих в контакт с колесом автомобиля. В перспективе резино-дисперсно-армированные асфальтобетоны могут использоваться и при строительстве скоростных железных дорог, так как обеспечивают долговременную заданную ровность верхнего строения пути [3]. Например, в настоящее время рассматриваются варианты применения РДА АБ в проекте высокоскоростной магистрали Москва — Пекин.

Одним из эффективных российских модификаторов, как показали исследования и практика дорожного строительства в различных регионах страны [1, 4, 5], является комплексный модификатор асфальтобетона КМА «КОЛТЕК», производимый ООО «Колтек-Кама» на основе частично регенерированного каучука резиновой крошки от переработки автомобильных шин. Применение КМА «КОЛТЕК» в мелкодисперсном и гранулированном виде принципиально не меняет традиционную технологическую схему производства асфальтобетона и технологию укладки, практически исключает появление колеи в покрытии, снижает шум при движении транспорта на 20–30 %, улучшает сцепление, замедляет развитие трещин, позволяет повысить безопасность дорожного движения, а также решить серьезную экологическую проблему утилизации автомобильных шин.

Резино-дисперсно-армированные асфальтобетоны обладают лучшими, чем традиционные материалы, физико-механическими свойствами: сопротивлением сдвиговым и температурным деформациям, релаксацией напряжений, водостойкостью. Эти положительные свойства проявляются в повышенной прочности, трещиностойкости, противодействии колееобразованию, морозостойкости, коррозионной устойчивости и других показателях резино-дисперсно-армированного асфальтобетона, модифицированного КМА.

В статье дано технико-экономическое обоснование эффективности применения резино-дисперсного армирования асфальтобетонного покрытия на примере КМА «КОЛТЕК». При разработке технико-экономического обоснования использованы рекомендации по оценке экономической эффективности инновационных и инвестиционных проектов в рыночных условиях хозяйствования, а также отраслевые нормативные и методические документы [6, 7].

Технико-экономическое обоснование эффективности применения РДА АБ с модификатором КМА «КОЛТЕК» выполнено в виде расчета ожидаемой экономической эффективности, связанной с продлением межремонтного периода службы дорожной одежды, как наиболее достоверного способа количественной оценки и прогнозирования экономической целесообразности применения нового дорожного материала. Использован метод моделирования циклов восстановления покрытия дорожной одежды за расчетный жизненный цикл дороги — 30 лет [5, 7, 8]. Оценка экономической эффективности инновационного мероприятия, планируемого к внедрению при строительстве, реконструкции и ремонте транспортных магистралей, сводится к расчету экономии денежных средств, достигнутой за счет реализации более качественного и долговечного конструктивного решения.

1. АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Физико-механические характеристики предлагаемого к использованию асфальтобетона, модифицированного КМА, приняты по данным исследований ГП «БелДорНИИ», ФГУП «РОСДОРНИИ», представленных в работах [1, 4], и специального подбора состава горячей асфальтобетонной смеси типа А марки I на местных каменных и битумных материалах для региональных дорог Свердловской области, выполненного в лаборатории ГКУ СО «Управление автомобильных дорог» [5].

Как показали исследования, при использовании резино-дисперсно-армированного асфальтобетона качество дорожного покрытия улучшается, что обусловлено расширением интервала пластичности, повышением когезионной прочности и эластичности пленок вяжущего в РДА АБ, которые препятствуют образованию и развитию микротрещин. Кроме того, установлено, что с увеличением содержания модификатора коэффициенты морозостойкости и коррозионной стойкости в асфальтобетоне повышаются (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость показателей морозостойкости
и коррозионной стойкости различных асфальтобетонов
от содержания КМА «КОЛТЕК»

Вид и тип асфальтобетона по ГОСТу	Содержание КМА, %	Коэффициент морозостойкости асфальтобетона	Коэффициент запаса по коррозионной стойкости
ЩМА, ГОСТ-31015	0	0,83	1,01
	0,5	0,84	1,02
	1	0,96	1,17
Тип А, ГОСТ-9128	0	0,82	1,03
	0,5	0,85	1,06
	1	0,92	1,15
Тип Б, ГОСТ-9128	0	0,74	0,93
	0,5	0,87	1,08
	1	0,99	1,24

Увеличение долговечности верхних слоев покрытия из асфальтобетона, модифицированного КМА, связано также с устойчивостью РДА АБ к колееобразованию, о чем свидетельствуют испытания на глубину колеи после 10 000 проходов колеса (рис. 1).

Результаты исследований, выполненных Центром метрологии, испытаний и стандартизации, показали улучшение всех физико-механических характеристик резино-дисперсно-армированного асфальтобетона, модифицированного КМА, по сравнению с базовым вариантом и ГОСТ-9128. Показатели водонасыщения и водостойкости находились на уровне базового состава — в пределах норм. Сводные данные испытаний [9] приведены в табл. 2.

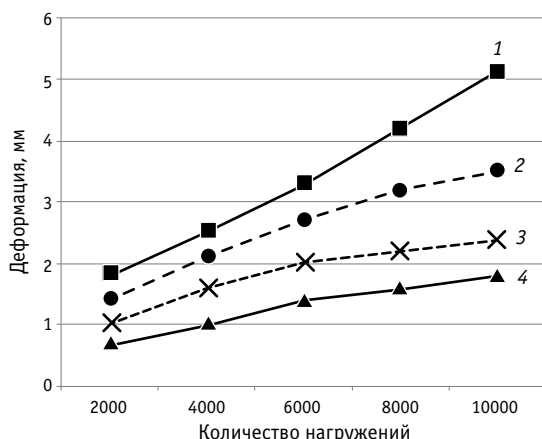


Рис. 1. Устойчивость резино-дисперсно-армированного асфальтобетона с КМА «КОЛТЕК» к колееобразованию:
1 — содержание КМА 0%; 2 — 0,3%; 3 — 0,5%; 4 — 1%

Согласно исследованиям [4, 7], резино-дисперсно-армированный асфальтобетон, модифицированный КМА, в сравнении с обычным (немодифицированным) обладает улучшенными показателями:

- предела прочности при сжатии при 50 °С (в 2 и более раз);
- предела прочности при сжатии при 20 °С (на 15–45 %);
- водонасыщения (на 20–30 %);
- водостойкости при длительном водонасыщении (в 1,2 раза);
- предела прочности при расколе (в 1,2 раза);
- сцепления при сдвиге (на 20–30 %).

2. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ВЕРХНИХ СЛОЕВ ПОКРЫТИЯ ИЗ РЕЗИНО-ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО КМА «КОЛТЕК»

Расчетная модель разработана в соответствии с методическими рекомендациями [1, 7, 8] и типовыми проектными решениями [5].

Общая схема модели основана на продлении межремонтного периода эксплуатации автомобильной дороги при использовании в покрытии резино-дисперсно-армированного асфальтобетона типа А с КМА.

На основании данных, приведенных в разделе 1, и с учетом экспертных оценок для технико-экономического обоснования был принят интегральный коэффициент (ΣK) улучшения качества резино-дисперсно-армированных асфальтобетонных покрытий с КМА, равный 35 %. Соответственно при расчете экономической эффективности использован коэффициент продления межремонтного периода дорожного покрытия (коэффициент долговечности) $KД = 1 + \Sigma K/100 = 1,35$.

Иными словами, при применении асфальтобетона с улучшенными физико-механическими свойствами (РДА АБ), модифицированного КМА в оптимальном соотношении (для типа А оптимальное содержание КМА — 0,5–0,75 % от массы минеральной части асфальтобетона), ожидаемый расчетный межремонтный период увеличивается в 1,35 раза по сравнению с базовым (тип А без КМА) при прочих равных условиях.

Таблица 2

Сопоставительные испытания асфальтобетонов типа А марки I

Показатель	Нормы по ГОСТ-9128	Тип А (без КМА)	РДА АБ (0,5 % КМА)	Изменение показателя, % отн.
Остаточная пористость, %	От 2,5 до 5,0	4,4	3,7	–16
Водонасыщение, % об.	От 2,0 до 5,0	2,1	2,2	+5
Средняя плотность, г/см ²	Не нормируется	2,60	2,60	б/изм.
Предел прочности при сжатии при 50 °С, МПа	Не менее 1,0	1,4	1,8	+29
Предел прочности при сжатии при 20 °С, МПа	Не менее 2,5	4,2	5,4	+28
Предел прочности при сжатии при 0 °С, МПа	Не более 11,0	7,6	9,1	+20
Водостойкость	Не менее 0,9	0,95	0,93	–2
Сдвигоустойчивость по коэффициенту внутреннего трения	Не менее 0,87	0,92	0,93	+1
Сдвигоустойчивость по сцеплению при сдвиге при 50 °С, МПа	Не менее 0,25	0,35	0,44	+25
Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при 0 °С, МПа	Не менее 3,5 Не более 6,0	5,2	4,7	–10
Глубина колеи после 20 000 проходов, мм	Не нормируется	Н/д	2,2	–
Предел прочности на растяжение при изгибе при –18 °С, МПа	Не нормируется	Н/д	7,56	–
Предельная относительная деформация растяжения при –18 °С	Не нормируется	Н/д	0,0059	–

Технико-экономический расчет по настоящей модели заключался в оценке ожидаемой экономической эффективности ($\Theta_{\text{ож}}$) применения РДА АБ, приведенной к 1000 м² покрытия автомобильной дороги. В дальнейшем выполняли перерасчет на 1 линейный км автомобильной дороги с учетом категории и геометрических параметров.

Для оценки $\Theta_{\text{ож}}$ использован технико-экономический расчет, направленный на определение экономического эффекта от сокращения затрат на выполнение работ по устройству верхних слоев покрытия дорожной одежды и последующее обеспечение их эксплуатационного состояния, соответствующего нормативным требованиям. Расчет выполнялся в следующей последовательности.

Рассчитывались удельные затраты на демонтаж 1000 м² существующего верхнего слоя покрытия и его возобновление из немодифицированного асфальтобетона в качестве базового варианта ($З'_B$) и те же затраты при использовании резино-дисперсно-армированного асфальтобетона в качестве альтернативного варианта ($З'_A$).

Согласно сведениям о стоимости и прогнозируемых сроках службы по базовому и альтернативному вариантам была разработана графическая модель, учитывающая прогнозный межремонтный срок нормативно-технической эксплуатации автомобильной дороги на протяжении жизненного цикла в сопоставлении базового (T_B) и альтернативного (T_A) вариантов. На основании разработанной модели принята продолжительность срока сравнения затрат (T).

Рассчитывались удельные затраты на устройство 1000 м² верхних слоев покрытия дорожной одежды и последующее обеспечение их эксплуатационного состояния в расчетный период T по базовому ($З'_B$) и альтернативному ($З'_A$) вариантам. Значения $З'_B$ и $З'_A$ использованы для определения коэффициента ожидаемой экономической эффективности ($K_{\text{ож}}$), ожидаемого экономического эффекта в текущих ценах ($\Theta_{\text{ож}}^{2016}$) и срока окупаемости ($T_{\text{ок}}$) инновационного мероприятия.

По результатам анализа значений $\Theta_{\text{ож}}^{2016}$, $K_{\text{ож}}$ и $T_{\text{ок}}$ сделаны выводы об экономической целесообразности реализации инновационной технологии на объектах дорожного хозяйства.

3. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ РДА АБ С КМА «КОЛТЕК» ДЛЯ УСТРОЙСТВА ВЕРХНИХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Расчет выполнен применительно к дорожно-климатическим условиям Свердловской области.

Стоимостные показатели предлагаемого асфальтобетона рассчитаны на основании разработанных Уральским региональным центром экономики и ценообразования в строительстве (Уралэкономцентр) индивидуальных единичных норм и расценок на приготовление смесей и замену покрытия из асфальтобетона, модифицированного КМА.

Расчеты затрат на устройство дорожных покрытий выполнены в ценах III кв. 2016 г. (коэффициент индексации к сметно-нормативной базе 2001 г. составляет 6,18).

3.1. Расчет удельных затрат на демонтаж и восстановление верхнего слоя асфальтобетонного покрытия по вариантам (с модификатором и без него)

Расчет затрат выполнялся базисно-индексным методом с применением индексов изменения сметной стоимости (по данным Уральского регионального центра экономики и ценообразования в строительстве).

Стоимость удельных затрат на демонтаж 1000 м² существующего верхнего слоя покрытия и его возобновление по базовому варианту ($З'_B$) составила 622647 руб. с учетом ставки НДС.

Стоимость удельных затрат на демонтаж 1000 м² существующего верхнего слоя покрытия и его возобновление по альтернативному варианту ($З'_A$) составила 726366 руб. с учетом ставки НДС.

3.2. Расчетно-графическая модель, учитывающая прогнозный межремонтный срок эксплуатации автодороги, по вариантам расчета

На основании результатов исследований автомобильных дорог Свердловской области и других регионов [1, 7, 8, 10] межремонтный срок по базовому варианту (T_B) был принят равным 7 годам.

Продолжительность межремонтного срока по альтернативному варианту (T_A) определялась как

$$T_A = K_D \cdot T_B. \quad (1)$$

Отсюда

$$T_A = 1,35 \cdot 7 = 9,5 \text{ лет.}$$

С учетом межремонтных сроков была составлена расчетно-графическая модель технической эксплуатации автодороги в сопоставлении по вариантам дорожного покрытия (рис. 2). На рис. 2 использованы следующие обозначения:

$A_0 - A_1, A_1 - A_2, A_2 - A_3 \dots$ — интервалы цикличности ремонтов в базовом периоде;

$B_0 - B_1, B_1 - B_2, B_2 - B_3 \dots$ — интервалы цикличности ремонтов в периоде возобновления дорожного покрытия по новой технологии с применением РДА АБ, модифицированного КМА «КОЛТЕК».

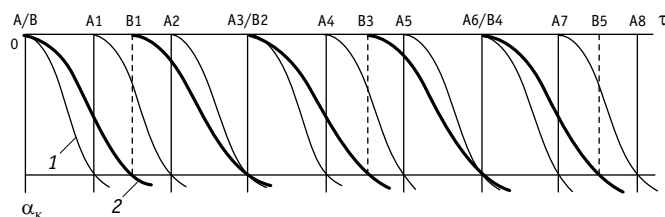


Рис. 2. Расчетно-графическая модель цикличности восстановления асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги за жизненный цикл ее эксплуатации:

1 — циклы ремонта покрытия в базовом варианте;
2 — циклы ремонта по новой технологии (альтернативный вариант с применением РДА АБ); τ — время эксплуатации автодороги за период жизненного цикла; α_k — критический износ (степень разрушения), требующий демонтажа и восстановления покрытия

С помощью разработанной модели можно определить срок службы для сравнения размера затрат на устройство верхних слоев покрытия и последующее обеспечение эксплуатационного состояния по вариантам, т. е. расчетный период T . В качестве приемлемой величины T принимаем горизонт расчета продолжительностью 30 лет (расчетный жизненный цикл автомобильной дороги).

Расчетно-графическая модель позволяет наглядно установить количество плановых ремонтов, необходимых в течение срока эксплуатации, по вариантам (N_B, N_A):

$$N_B = \frac{T}{T_B} = \frac{30}{7} = 4,3; \quad (2)$$

$$N_A = \frac{T}{T_A} = \frac{30}{9,5} = 3,2. \quad (3)$$

3.3. Расчет удельных затрат на устройство верхних слоев покрытия дорожной одежды и последующее обеспечение их эксплуатационного состояния по вариантам

Затраты на весь принятый срок сравнения вариантов рассчитывались по формуле

$$Z' = Z'' \cdot N. \quad (4)$$

Отсюда:

$$Z'_B = 622647 \cdot 4,3 = 2677382 \text{ руб./1000 м}^2;$$

$$Z'_A = 726366 \cdot 3,2 = 2324371 \text{ руб./1000 м}^2.$$

3.4. Расчет коэффициента ожидаемой экономической эффективности и ожидаемого экономического эффекта

Коэффициент ожидаемой экономической эффективности $K_{ож}$ рассчитывался по формуле

$$K_{ож} = \frac{Z'_B - Z'_A}{Z'_B} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Тогда

$$K_{ож} = \frac{2677382 - 2324371}{2677382} \cdot 100\% = 13,2\%.$$

Ожидаемый экономический эффект $\Delta_{ож}$ определялся по формуле

$$\Delta_{ож} = \frac{Z'_B \cdot K_{ож}}{100\%}, \quad (6)$$

где Z'_B — затраты на выполнение работ по устройству верхних слоев покрытия дорожной одежды и последующее обеспечение их эксплуатационного состояния по базовому варианту, руб.,

$$Z'_B = \frac{Z'_B \cdot S}{1000}, \quad (7)$$

где S — площадь верхнего слоя покрытия, м².

Рассчитанные значения $\Delta_{ож}^{2016}$ в зависимости от категории автомобильной дороги приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета ожидаемого экономического эффекта в ценах 2016 г. ($\Delta_{ож}^{2016}$) от применения резино-дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей (РДА АБ), модифицированных КМА, при устройстве верхнего слоя покрытия автомобильных дорог

№	Категория автомобильной дороги	Ширина проезжей части с учетом укрепленной части обочины, м	Площадь проезжей части на участке автомобильной дороги длиной 1 км, м ²	Z'_B , тыс. руб./км	$\Delta_{ож}^{2016}$, тыс. руб./км
1	I	33,0	33 000	88 353,606	11 662,675
2		25,5	25 500	68 273,241	9 012,067
3		18,0	18 000	48 192,876	6 361,459
4	II	9,0	9 000	24 096,438	3 180,729
5	III	8,0	8 000	21 419,056	2 827,315
6	IV	7,0	7 000	18 741,674	2 473,9

3.5. Расчет срока окупаемости инновационного мероприятия

Срок окупаемости $T_{ок}$ единовременного удорожания стоимости приготовления асфальтобетонной смеси с КМА рассчитывали по формуле

$$T_{ок} = \frac{\Delta Z''}{\Delta \Delta_{ож}}, \quad (8)$$

где $\Delta Z'' = Z''_A - Z''_B$ — разница затрат на приготовление асфальтобетонной смеси в новом (с КМА) и базовом (без КМА) периоде;

$\Delta \Delta_{ож}$ — удельный ожидаемый экономический эффект инновационного мероприятия, распределенный по годам расчетного периода.

В результате расчетов срок окупаемости дорожного покрытия магистралей с применением резино-дисперсно-армированного асфальтобетона составил от 4 до 6 лет. Этот показатель вполне приемлем для оценки эффективности бюджетных государственных капитальных вложений в строительство автомобильных дорог. Предлагаемая технология апробирована в дорожном хозяйстве Свердловской области при строительстве и ремонте автодорог с асфальтобетонным и щебеночно-мастичным покрытием.

ВЫВОДЫ

1. Применение резино-дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей, модифицированных КМА «КОЛТЕК», для устройства и последующей эксплуатации верхних слоев покрытия дорожной одежды дает экономический эффект в размере от 2,4 до 11,7 млн руб./км в зависимости от категории и геометрических параметров, а также конструкции дорожной одежды. Экономический эффект обусловлен сокращением приведенных затрат на обустройство и соответствие состояния покры-

тия автомобильной дороги нормативным требованиям за жизненный цикл ее эксплуатации.

2. Резино-дисперсно-армированный асфальтобетон с модификатором КМА «КОЛТЕК» также может использоваться в качестве рабочих слоев верхнего строения пути при строительстве скоростных железных дорог для повышения их ровности и надежности, в частности в проекте высокоскоростной магистрали Москва — Пекин.

Литература

1. Развитие теории и практики инновационной деятельности на транспорте и в дорожном хозяйстве : моногр. / В. М. Самуйлов, Е. В. Кошкар, В. Е. Кошкар, М. А. Левченко. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2017. 205 с.
2. Хученройтер Ю., Вернер Т. Асфальт в дорожном строительстве. М. : ИД «АБВ-пресс», 2013. 450 с.
3. Самуйлов В. М., Неволин Д. Г., Кошкар В. Е. Инновационный метод проектирования и строительства ВСМ с использованием нежестких типов конструкций // Инновационный транспорт. 2016. № 2 (20). С. 31–37. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-31-37. ISSN 2311-164X.
4. Резиновая крошка в деле. Влияние комплексного модификатора «КМА» на физико-механические свойства дорожного битума / Т. С. Худякова, Н. В. Шаповалова, Л. В. Колеров, С. М. Попов // Автомобильные дороги. 2010. № 7. С. 56–61. ISSN 0005-2353.
5. Технично-экономическое обоснование применения асфальтобетонных покрытий, модифицированных комплексным модификатором асфальтобетона «КМА» КОЛТЕК / Уральский фил. ОАО «ГИПРОДОРНИИ», 2011. 24 с.
6. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / Под ред. В. В. Коссова, В. Н. Лившица, А. Г. Шахназарова. М. : Экономика, 2000. 421 с.
7. Научные основы организации инновационной деятельности на транспорте и в дорожном хозяйстве (теория, методология, практика) / А. Г. Галкин, В. М. Самуйлов, В. Е. Кошкар, Е. В. Кошкар. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. 189 с.
8. Дмитриев В. Н., Гриневич Н. А., Кошкар В. Е. Новые дорожные технологии и материалы. Екатеринбург : Изд-во УрГУ, 2008. 144 с.
9. Отчет о результатах испытаний асфальтобетонов, приготовленных на исходном битумном вяжущем и с добавлением «КМА» / А. Н. Симчук и др. М. : ООО «ЦМИИС», 2015. 16 с.
10. Калгин Ю. И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов : моногр. Воронеж : Изд-во ВГАСУ, 2006.

References

1. Razvitie teorii i praktiki innovatsionnoy deyatel'nosti na praktike i v dorozhnom khozyaystve : monogr. [Development of theory and practice of innovation in practice and in road management : monograph] / V. M. Samuylov, E. V. Koshkarov, V. E. Koshkarov, M. A. Levchenko. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2017. 205 s.
2. Khuchenroyter Yu., Verner T. Asfalt v dorozhnom stroitel'stve [Asphalt in road construction]. M. : ID «ABV-press», 2013. 450 s.
3. Samuylov V. M., Nevolin D. G., Koshkarov V. E. Innovatsionnyy metod proektirovaniya i stroitel'stva VSM s ispol'zovaniem nezhestkikh tipov konstruktsey [Innovative method for design and construction of high speed railroads using flexible types of structures] // Innovatsionnyy transport. 2016. № 2 (20). S. 31–37. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-31-37. ISSN 2311-164X.
4. Rezinovaya kroshka v dele. Vliyanie kompleksnogo modifikatora «KMA» na fiziko-mekhanicheskie svoystva dorozhnogo bituma [Rubber crumb in business. Effect of the multicomponent inoculant «MIofAC» on the physical and mechanical properties of road bitumen] / T. S. Khudyakova, N. V. Shapovalova, L. V. Kolerov, S. M. Popov // Avtomobilnye dorogi. 2010. № 7. S. 56–61. ISSN 0005-2353.
5. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya asfaltobetonnykh pokrytiy, modifitsirovannykh kompleksnym modifikatorom asfaltobetona «KMA» KOLTEK [Feasibility study on the use of asphalt-concrete coatings modified with complex modifier of asphalt concrete «MIofAC» KOLTEK] / Uralskiy fil. OAO «GIPRODORNII», 2011. 24 s.
6. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov [Methodological recommendations for evaluating the effectiveness of investment projects] / Pod red. V. V. Kossova, V. N. Livshitsa, A. G. Shakhnazarova. M. : Ekonomika, 2000. 421 s.
7. Nauchnye osnovy organizatsii innovatsionnoy deyatel'nosti na transporte i v dorozhnom khozyaystve (teoriya, metodologiya, praktika) [Scientific foundations of the organization of innovative activities in transport and in the road economy (theory, methodology, practice)] / A. G. Galkin, V. M. Samuylov, V. E. Koshkarov, E. V. Koshkarov. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2012. 189 s.
8. Dmitriev V. N., Grinevich N. A., Koshkarov E. V. Noveye dorozhnye tekhnologii i materialy [New road technologies and materials]. Ekaterinburg : Izd-vo UrGU, 2008. 144 s.
9. Otchet o rezultatakh ispytaniy asfaltobetonov, prigotovlennykh na iskhodnom bitumnom vyazhushchem i s dobavleniem «KMA» [Report on the results of tests of asphalt concretes prepared on the original bituminous binder and with the addition of «MIofAC»] / A. N. Simchuk i dr. M. : ООО «ТМИИС», 2015. 16 s.
10. Kalgin Yu. I. Dorozhnye bitumomineralnye materialy na osnove modifitsirovannykh bitumov : monogr. [Road bitumen mineral materials based on modified bitumen : monograph]. Voronezh : Izd-vo VGASU, 2006.

УДК 656.078

Инна Геннадьевна Слободянюк, аспирант Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Inna Gennagyevna Slobodyanyk, postgraduate student, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Functional approach to modeling transport systems

Аннотация

Железнодорожному транспорту на практике пришлось столкнуться с отсутствием гармонизации ресурсов, инфраструктуры, численности вагонных парков и методов управления движением. Повышение роли экономических критериев требует новых организационных и методических решений. Рост стоимости модернизации инфраструктуры и возможных рисков заставляет уделять больше внимания методике оценки проектов. Существенная цена просчета в результате субъективных решений обуславливает создание имитационных моделей для исследования транспортных систем. Жесткие требования к срокам оценки проектов и выбору этапности модернизации ставят разработчиков перед необходимостью сокращать затраты времени на моделирование. Один из возможных способов выполнения такой задачи — реализация технологии макромоделирования в действующих, отработанных системах моделирования. Применение функционального подхода к отображению структуры и технологии работы парков и горловин позволит создать новый метод макромоделирования транспортных систем.

Ключевые слова: транспортные системы, структура транспортной сети, имитационное моделирование функции железнодорожной станции.

Summary

Railway transport in practice had to face the lack of harmonization of resources, infrastructure, the number of car parks and methods of traffic management. Increasing the role of economic criteria requires new organizational and methodological solutions. The increase in the cost of upgrading the infrastructure and the possible risks makes it more important to pay attention to the methodology for evaluating projects. The essential price of rendering as a result of subjective decisions determines the creation of simulation models for the study of transport systems. Strict requirements for the timing of project evaluation and the choice of the stage of modernization put the developers in front of the need to reduce the time spent on modeling. One of the possible ways to accomplish such a task is to implement the technology of macromodeling in operating, worked over modeling systems. The application of a functional approach to mapping the structure and technology of parks and necks will create a new method for macromodeling transport systems.

Keywords: transport systems, transport network structure, simulation modeling of the function of the railway station.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-96-101

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В разных литературных источниках встречаются такие понятия, как «наука управления», «наука о системах», «системный анализ», «теория принятия решений», «исследование операций». Эти направления научных исследований распространяются на количественные методы. Независимо от предпочитаемой терминологии можно выделить следующие особенности науки управления:

- применение научного метода;
- системный подход;
- использование моделей.

Функциональной процедурой любого научного исследования является научный метод. При использовании этого метода для решения управленческих задач необходимо помнить, что организация представляет собой открытую систему, состоящую из взаимосвязанных подсистем. Поэтому следующая особенность научного подхода к управлению заключается в системной ориентации.

Третья особенность науки управления — применение моделей. Моделирование, как правило, необходимо при решении сложных проблем управления и при невозможности проведения экспериментов на практике. Модели позволяют принимать объективные решения в ситуациях с неявными причинно-следственными связями для оценки вариантов. Многие из таких моделей весьма сложны, и не каждый руководитель в состоянии самостоятельно ими воспользоваться. Однако игнорирование моделирования может привести к методу проб и ошибок, принятию непродуманных решений.

Несмотря на сложность некоторых моделей, концепция моделирования проста. Согласно определению Р. Шеннона [1], «модель — это представление объекта системы или идеи в некоторой форме, отличной от самой целостности». Главной характеристикой модели можно считать упрощение реальной ситуации. Устраняются не относящиеся к делу данные, форма модели становится проще, что повышает способность руководителя к пониманию и разрешению проблем в реальной жизни. Кроме того, модель помогает совместить опыт руководителя с опытом и суждениями экспертов.

Необходимость моделирования вместо попыток прямого взаимодействия с миром вызвана рядом причин: это и естественная сложность многих структур и ситуаций, и невозможность проведения экспериментов на практике, и ориентация на будущее.

Для решения различных задач применяются разные типы моделей. В последнее время широкое распространение получило имитационное моделирование. Главная его идея состоит в использовании некоторого устройства для имитации реальной системы, чтобы исследовать и понять ее свойства, поведение и характеристики [2]. Имитация применяется в ситуациях, которые слишком сложны для математических методов типа линейного программирования. Это связано с чрезмерно большим числом переменных, трудностью математического анализа определенных зависимостей между переменными и высоким уровнем неопределенности. Если невозможно наблюдать систему в реальности отсутствует, то эксперименты на моделях системы позволяют установить реакции на определенные события или изменения. Если результаты экспериментирования с использованием имитационной модели свидетельствуют о том, что изменения ведут к улучшению, можно с большей уверенностью принимать решение в реальной системе.

Как все средства и методы, имитационные модели обладают рядом недостатков. Эффективность моделирования снижается под влиянием ряда потенциальных рисков. Наиболее распространенные проблемы:

- недостовверные исходные данные;
- ограничения в получении необходимой информации;
- страхи пользователя.

Существенным риском использования моделей может оказаться их высокая стоимость, поэтому выгоды от применения модели должны с избытком оправдывать ее стоимость. К тому же разработка имитационной модели системы может потребовать значительных временных и трудовых затрат, при этом нет гарантии, что модель позволит получить ответы на поставленные вопросы.

Существенно упростить весь процесс разработки имитационных моделей позволит совершенствование специализированных программ (например, ИСТРА, MAP/1). Использование для моделирования многолетнего накопленного опыта даст возможность снизить трудовые и временные издержки. А удешевление настройки имитационных моделей для конкретных ситуаций позволит расширить спектр применения.

ВЫБОР ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Работа с программами моделирования требует определенного времени для обучения. Обычно после освоения какой-либо из программ пользователь очень неохотно переходит к работе с другой программой. Поэтому к проблеме первого выбора нужно подходить ответственно. Программа моделирования не должна быть чрезмерно трудоемкой для освоения и должна отвечать следующим требованиям [3]:

предусматривать возможность интерактивной отладки модели, в ходе которой пользователь будет отслеживать потоки в модели и ошибки;

предусматривать возможность использования как в интерактивном режиме, так и в режиме автоматического выполнения, т. е. от начала до конца без вмешательства человека;

обеспечивать возможность создания модулей и последующего их объединения;

включать блоки со встроенными командами (статистический анализ, правила принятия решений);

предусматривать средства описания материальных и информационных потоков, отображать управление;

предусматривать возможность вывода статистики (длительности циклов, коэффициентов использования, времени ожидания);

предусматривать возможность анимации, отображения материальных потоков в графическом виде.

Для целей моделирования железнодорожных станций, транспортных узлов, определения пропускной и перерабатывающей способности наилучшим образом подходит специализированная имитационная система ИСТРА со встроенными процедурами оптимизации. Во-первых, в процессе ее разработки и применения на практике накоплен огромный опыт. Затраты на создание и совершенствование системы можно оценить в 250 тыс. чел.-ч. В текущих ценах только на оплату труда затрачено порядка 100 млн руб. Во-вторых, в системе существенно нивелированы основные недостатки, присущие моделированию (табл. 1).

Таблица 1

Методы преодоления недостатков моделирования в системе ИСТРА

№ п/п	Недостатки	Нивелирующие методы
1	Моделирование сложных систем занимает немало времени и может оказаться дорогостоящей затеей	Метод автоматизированного построения имитационных моделей
2	Прогон сложных моделей требует значительного компьютерного времени	Метод планирования направленных экспериментов — «имитационный спуск». Метод управления процессом по конечным ритмам — И-МДС
3	Нет никакого способа доказать, что модель полностью соответствует работе реальной системы	Методы адаптации технологии к структуре в модели. Успешная практика применения
4	Явно стабильная система при неблагоприятном сочетании событий может «пойти вразнос»	Интерактивное моделирование. Возможность настройки адаптивного управления
5	Моделирование может быть менее точным, чем математический анализ	Применение двухуровневых систем. Возможность работы совместно с математическими моделями строгой оптимизации

Под системой моделирования понимается комплекс алгоритмов, формализованных процедур. Система ИСТРА позволяет формировать модели для решения различных задач. Существует возможность строить как детерминированные модели, так и вероятностные.

Универсальная абстрактная модель в системе ИСТРА представляет собой упорядоченное множество [4]

$$S = (X, P, f),$$

где X — множество элементов;
 P — множество операций;
 f — оператор управления.

Имитационная система имеет не только подсистему собственно имитации, но и подсистемы автоматизации процесса построения модели и анализа полученных результатов (рис. 1).

Подсистема автоматизированного построения модели выполняет основную часть работы, освобождая исследователя.

Подсистема имитации осуществляет собственно моделирование и накапливает результаты. Она формирует динамическую очередь заявок на выполнение операции с учетом времени поступления и приоритетов, имитирует выполнение очередной операции с выбором наилучшего варианта, фиксирует занятость стрелок, путей, локомотивов, бригад, грузовых фронтов. В конце работы подсистема формирует исходный массив результатов для последующей обработки.

Разные задачи требуют анализа различных результатов. Подсистема обработки должна предоставлять такую возможность. Важным аспектом является не только набор результатов, но и удобная форма представления, в том числе для формирования отчетов.

ФУНКЦИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ

Крупные транспортные системы состоят из станций. Станция и станционные парки — это естественные подсистемы, обладающие определенными системными свойствами (рис. 2).

Основная функция, которую выполняет станция, — пропуск и переработка потоков.

К числу основных поддерживаемых параметров потоковых процессов относятся:

работоспособность;

требуемые по величине и структуре характеристики выходного потока;

режимы пропускa отдельных струй;

время и стоимость пропускa потока.

Дезорганизующими воздействиями будут:

случайные колебания входного потока по величине и структуре;

случайные колебания продолжительности операций;

выход из строя устройств.

Механизмами самоподдержания функции системы станция являются:

технологические приемы управления потоками;

техническое содержание и ремонт устройств.

Системные свойства транспортного объекта определяются в основном характером взаимодействия в нем. Это в том числе взаимодействие потока и структуры, элементов структуры между собой, а также взаимодействие отдельных операций в структуре технологического процесса [5].

Основными видами взаимодействия можно считать: структурное, показывающее степень согласованности параметров взаимодействующих элементов структуры; функциональное, отображающее выбор параметров операций в технологических цепочках; структурно-функциональное, когда управляемая технология дает возможность технологическими методами адаптивно изменять параметры структуры.

Структура в потоковой системе рассматривается на уровне взаимодействия элементов друг с другом и с потоком [5]. В качестве элементов используются понятия «канал» и «бункер». Расчетные схемы из каналов и бункеров позволяют выявлять закономерности построения рациональной структуры.

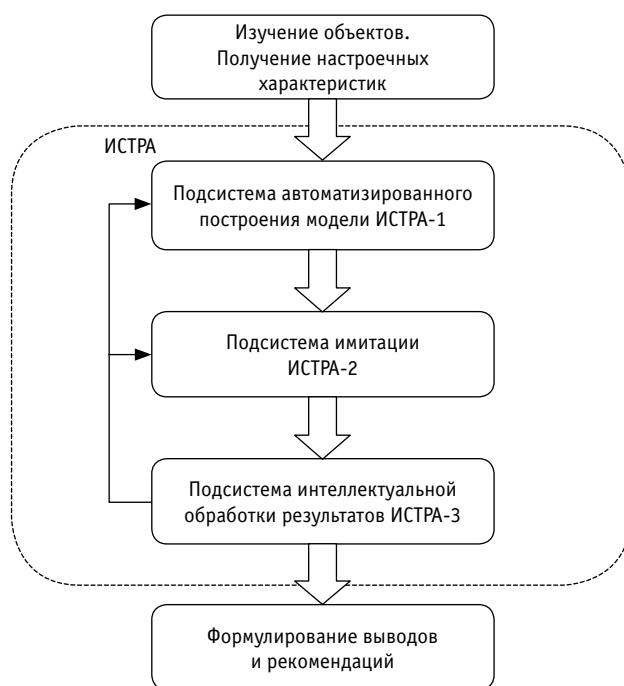


Рис. 1. Структура имитационной системы ИСТРА

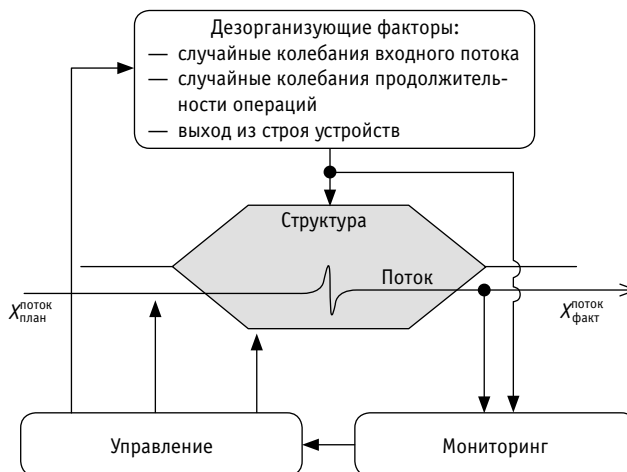


Рис. 2. Станционная система

Потоковую структуру можно определить как граф

$$G = (X, P, U, R),$$

где $X \equiv \{x_{ij}\}$ — множество дуг, т. е. каналов для пропуска потоков;

$P \equiv \{p_i\}$ — множество узлов, чаще всего бункеров для поглощения и порождения всплесков потока;

$U \equiv \{u_{ij}\}$ — множество потоков;

$R \equiv \{p_{ij}^k\}$ — множество свойств потока.

Под свойством здесь понимается некоторая дезорганизация потока, которая затрудняет или делает невозможным дальнейшее его продвижение. Множество включает в себя неупорядоченные струи в потоке по плану формирования, неравномерность, несоответствие величины порции потока номинальному, потери информации, требования к смене локомотивов и бригад.

На станциях, особенно крупных, грузовые пути и сортировочные устройства объединены сложной сетевой структурой в единое целое. Пропускная способность горловин не является зафиксированным параметром. Характер взаимодействия отдельных элементов существенно влияет на задержки, возникающие в структуре. Функционально пропускная способность зависит от ряда факторов: структуры потока, случайных процессов, действующей технологии, диспетчерского управления.

Процессы взаимодействия не поддаются формальному описанию, поэтому единственным адекватным методом расчета станций является моделирование. Так как формально задать функцию пропускной способности невозможно, структура в моделях описывалась максимально подробно. На практике укрупнение элементов в модели не применялось.

Функциональное взаимодействие определяется последовательностью операций в технологическом процессе. Распространенным способом отображения являются графики Ганта. Но технологические цепочки накладываются друг на друга и пересекаются на элементах структуры. При нерациональной состыкованности возникают узкие места технологии. Если управление не развито, то потребуются значительные резервы элементов (пропускные способности).

Управляемое взаимодействие — функциональное и структурно-функциональное — создает новые системные эффекты. Возникают так называемые динамические резервы. Можно выделить два типа взаимодействия транспортных объектов: на уровне элементов в системе и на уровне подсистем в динамике [6]. В первом случае необходимо согласовывать параметры устройств (каналов и бункеров) двух систем. Во втором случае согласуются единые цели и критерии управления.

Первый тип взаимодействия дает увеличение пропускной способности системы в целом и способности сглаживать потоки за счет уменьшения диспропорции в параметрах технических средств. Второй — за счет эффекта управления в условиях неравномерности. Различные струи потока требуют создания собственных резервов. Чем больше струй выделяется в потоке, тем больше совокупные динамические резервы и возможности управления. Чем больше разнообразия в подсистемах,

тем заметнее эффект объединения их в единую систему. При укрупнении элементов и особенно подсистем нельзя потерять эффекты управления, в противном случае результаты окажутся с завышенными резервами.

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРЛОВИН

Методика декомпозиции схемы станции на элементы — это выделение групп стрелок, которые во всех передвижениях используются одновременно — фактически или по враждебности. Важно отметить, что критерием декомпозиции принято минимальное количество элементов в блоке.

Процесс представления схемы станции в виде элементов модели можно описать в терминах теории графов. Вершинами обозначаются все имеющиеся стрелки, перегоны, пути. Под маршрутом на графе понимается последовательность ребер, когда каждые два соседних ребра имеют общую вершину; при этом каждое ребро встречается в маршруте не более одного раза. Маршрут может начинаться и заканчиваться только на вершинах, отображающих пути или перегоны.

Схема путевого развития станции в виде графа представляется таким образом, чтобы число вершин было минимально. При этом необходимо соблюдать следующие ограничения: для любого реального передвижения должен существовать единственный маршрут на графе;

любой маршрут на графе должен единственным образом соответствовать возможному реальному передвижению;

графы маршрутов, описывающие два одновременно возможных передвижения, не должны иметь общих ребер;

графы маршрутов, описывающих два одновременно невозможных передвижения, должны иметь общие ребра.

Процесс декомпозиции представляет собой трансформацию исходного графа (рис. 3) в конечный граф \hat{G} , в котором число вершин минимально и соблюдаются указанные выше ограничения. Трансформация представляет собой итерационный процесс устранения соединяющих две соседние вершины ребер и получения вместо двух вершин одной. Вершины, отображающие пути и перегоны, не удаляются.

Условием устранения ребра графа станционного блока будет отсутствие одновременно проходящих передвижений через обе вершины ребра (см. рис. 3).

Для реализации метода макро моделирования требуется дальнейшее укрупнение элементов структуры. При этом нельзя потерять функционал. Возможность пропуска потока в функциональном смысле определяется величиной загрузки. Возникает вопрос, как считать загрузку горловины, которая состоит из десятков стрелок. Средневзвешенная загрузка стрелок вообще ничего не показывает в функциональном смысле. Такой показатель не будет определять резерв пропускной способности горловины.

Занятость наиболее загруженной стрелки тоже не подходит — 100 %-й загрузки стрелки не бывает. Например, моделирование одной из промышленных станций показало, что при исчерпании ее пропускной способности наибольшая загрузка стрелок не превышала 47 %. К тому же многие расчеты на моделях подтверждают, что далеко не всегда наиболее загруженная стрелка является лимитирующим элементом (рис. 4).

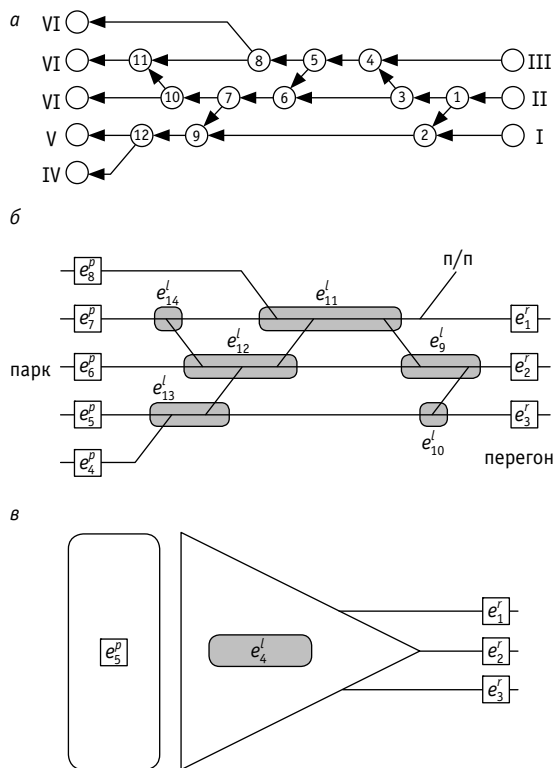


Рис. 3. Станционный блок:

а — граф станционного блока; б — схема станционного блока в элементах модели; в — минимально возможный вариант

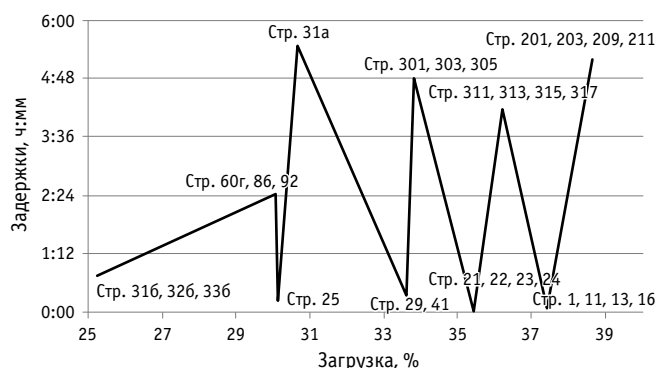


Рис. 4. Зависимость между загрузкой стрелочных групп и задержками на сортировочной станции

Отдельная стрелка не имеет функционального значения — технологическое передвижение обеспечивает группа стрелок, которую можно выделить в своего рода «виртуальный» канал.

Функциональным параметром горловины является число возможных передвижений, т. е. число «виртуальных» каналов. Следовательно, число занятых каналов и будет характеризовать загрузку горловины. Такая постановка вопроса вызывает много сомнений, связанных с практикой организации выполнения технологических операций, с наличием специализированных путей, локомотивов и т. п. Поэтому вывод о функциональной значимости предложенного показателя необходимо проверить экспериментально на моделях.

МАКРОМОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ

Кроме автоматического преобразования структуры в элементы, автоматизированное построение моделей включает в себя отображение технологии с заданием технологических параметров и автоматическое преобразование технологии в операции модели.

В модели технология работы станции отражается набором операций. Под операцией понимается законченная часть техпроцесса транспортного объекта, например подача на грузовой фронт, выгрузка и т. д. В модели операция представляет собой набор записанных в определенной последовательности элементов, участвующих в выполнении части технологического процесса, с указанием параметров их работы. Передвижения и простои в операции представляются при помощи логических элементов. Бункерные элементы используются для отображения емкости. Технологические операции имитируют передвижения по станции, следовательно, и продвижение определенного потока. Примером такой операции может служить перестановка состава из одного парка станции в другой. Другой класс технологических операций не содержит в себе маршрутов, а моделирует перемещение потока только во времени. Примерами таких операций могут служить осмотры состава бригадой ПТО, обработка вагонов на грузовом фронте.

Укрупнение элементов в макромоделе повлечет за собой сокращение набора записей в операциях. Дополнительные возможности упрощения и ускорения создания макромодела дает богатый набор механизмов САПР для построения и корректировки схемы технологического процесса, задания параметров операций. Для проектируемых станций удобно задавать стандартные параметры выполнения операций (среднее время, максимальное и минимальное, параметры закона распределения случайной величины) (рис. 5). Перечень всех возможных типов операций содержится в справочнике (рис. 6).

Такие возможности позволяют сформировать из отдельных операций элементарные подпроцессы. Подпроцесс имеет определенную законченную технологическую сущность (функциональность), например: прием поезда, расформирование, формирование, подача на грузовой пункт. В частности, подпроцесс «расформирование» будет включать в себя такие операции, как осмотр состава, заезд горочного локомотива, роспуск с горки, осаживание, обгон локомотива.

Переход построения модели с уровня операций на уровень процессов позволит снизить трудозатраты исследователя: структура технологии на уровне операции, структура операций, варианты выполнения операций будут автоматически формироваться имитационной системой. Исследователю останется определить последовательность и параметры процессов.

Операция при макромоделировании производит перенос некоторой части потока из одной емкости в другую. Парк можно разделить в общем случае на две части — входную и выходную. Входная — это вагоны до обработки, выходная — после обработки. В выходной части будут находиться вагоны, готовые для отправления или для перехода в другой парк. При этом суммарная емкость обоих секторов не должна превышать предельной функциональной емкости парка.

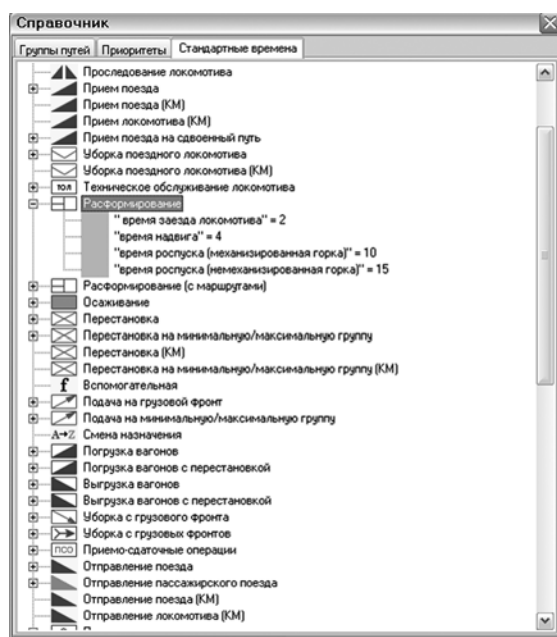


Рис. 5. Блок задания параметров операции



Рис. 6. Справочник технологических операций

Поэтому при функциональном подходе важно задавать не физическую емкость парка, а функциональную величину, при которой не теряется работоспособность станции. Содержательность результатов моделирования необходимо проверить экспериментами на подробных моделях по величине недопустимых задержек.

ВЫВОДЫ

Для макро моделирования предлагается перейти от структурного подхода к функциональному. Функцией горловины является пропуск потока. Пропускная способность зависит от числа возможных параллельных передвижений. Именно этот параметр горловины закладывается в макро модель. Основной характеристикой парка является функциональная емкость, при которой сохраняются его функциональные возможности. Функциональная емкость парка всегда меньше

физической. Коэффициент соотношения зависит от принятой технологии, неоднородности потоков и пропускной способности горловин.

Предложенный функциональный подход позволит существенно сократить трудоемкость создания моделей крупных транспортных узлов и полигонов. Применение макромоделей для оценки этапности реконструкции и развития сократит сроки проведения предпроектных работ, что является весьма актуальной задачей. Однако гипотеза о функциональной значимости параметров «число возможных передвижений» в горловине и «функциональная емкость» парков требует проверки. Достоверность необходимо подтвердить для различных типов станций и парков, для различных уровней загрузки устройств и различного потока. Для сравнения результатов расчетов станций разными методами необходимо корректное планирование экспериментов на следующем этапе исследования.

Литература

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. М.: Мир, 1978. 420 с.
2. Мескон М. Х., Альберт М., Хедоури Ф. Основы менеджмента / Пер. с англ. М.: Дело, 1992. 702 с.
3. Чейз Р. Б., Джейкобз Ф. Р., Аквилано Н. Дж. Производственный и операционный менеджмент / 10-е изд.; пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2008. 1184 с.
4. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О загрузке стрелок и пропускной способности горловин // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7. ISSN 1815-9400.
5. Козлов П. А., Владимирская И. П., Осокин О. В. Закономерности структурного взаимодействия в транспортных системах // Транспорт Урала. 2010. № 3 (26). С. 25–28.
6. Александров А. Э. Расчет и оптимизация транспортных систем с использованием моделей: теоретические основы, методология: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2008. 285 с.

References

1. Shannon R. Imitatsionnoe modelirovanie sistem — iskusstvo i nauka [Simulation of systems — art and science]. M.: Mir, 1978. 420 s.
2. Meskon M. Kh., Albert M., Khedouri F. Osnovy menedzhmenta [Fundamentals of management] / Per. s angl. M.: «Delo», 1992. 702 s.
3. Cheyz R. B., Dzheykobz F. R., Akvilano N. Dzh. Proizvodstvennyy i operatsionnyy menedzhment [Production and operational management] / 10-e izd.; per. s angl. M.: ID «Vilyams», 2008. 1184 s.
4. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. O zagruzke strelok i propusknay sposobnosti gorlovin [On the loading of points and station neck capacity] // Transport Urala. 2016. № 4 (51). S. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7. ISSN 1815-9400.
5. Kozlov P. A., Vladimirskeya I. P., Osokin O. V. Zakonomernosti strukturnogo vzaimodeystviya v transportnykh sistemakh [Principles of structural interaction in transport systems] // Transport Urala. 2010. № 3 (26). S. 25–28. ISSN 1815-9400.
6. Alexandrov A. E. Raschet i optimizatsiya transportnykh sistem s ispolzovaniem modeley: teoreticheskie osnovy, metodologiya: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Calculation and optimization of transport systems using models: theoretical foundations, methodology: DSc in Engineering Thesis]. Ekaterinburg, 2008. 285 s.

УДК 656.2

Александра Дмитриевна Калидова, аспирант кафедры «Железнодорожные станции и узлы»
Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССА ПРОПУСКА ПОЕЗДОПОТОКОВ ЧЕРЕЗ ОДНОПУТНОЕ БАРЬЕРНОЕ МЕСТО ДВУХПУТНОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Alexandra Dmitrievna Kalidova, postgraduate student, Railway Stations and Junctions Department,
Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

Development of method of technological estimation of the process of flow transmission by through a simultaneous barrier location of a two-way line based on imitation modeling

Аннотация

Предложен метод комплексной оценки пропуска поездопотоков через однопутное барьерное место двухпутной линии на основе расчета временных и экономических показателей, связанных с замедлением и задержками пропуска поездов. Разработана имитационная модель, учитывающая как технологию пропуска поездов, так и конструктивные параметры барьерного места.

Модель позволяет получать график движения поездов при пропуске через однопутное барьерное место, определять возможные задержки, а также оценивать эксплуатационные расходы, связанные с увеличением времени хода из-за замедления или задержки поездов у барьерного места. Модель может применяться для оценки наличной пропускной способности однопутных барьерных мест, в том числе при организации скоростного и высокоскоростного движения.

Ключевые слова: скоростное движение, барьерное место, система массового обслуживания, график движения поездов, имитационная модель, задержки поездов.

Summary

A method is proposed for a comprehensive assessment of the process of passing train traffic through a single-track barrier in a double-track line, based on the calculation of time and economic indicators associated with decelerations and delays in the passage of trains. An imitation model was developed, taking into account both the technology of trains passing and the design parameters of the barrier site.

The model makes it possible to obtain a train schedule when passing through a single-track barrier, to determine possible train delays, and to estimate the operating costs associated with the increase in travel time due to slowing or delay at the barrier site. The model can be used to assess the available capacity of single-track barrier sites, including when organizing high-speed traffic.

Keywords: high-speed traffic, barrier place, queuing system, train schedule, simulation model, train delays.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-102-108

При разработке организационно-технических мероприятий, направленных на повышение наличной пропускной способности железнодорожных линий, наибольшие сложности для пропуска поездопотоков создают в том числе однопутные элементы двухпутной линии. Это могут быть искусственные сооружения (однопутные мостовые переходы, тоннели), а также однопутные перегоны или их части [1].

На существующих реконструируемых или вновь проектируемых линиях скоростного и особенно высокоскоростного движения тоже возможно появление подобных однопутных барьерных элементов (или мест — БМ), что обосновано прежде всего весьма существенной экономией капитальных вложений [2]. В данном случае при использовании однопутных БМ, помимо оценки их влияния на пропускную способность, большое значение имеет определение возможных задержек в пропуске встречных поездопотоков. Дело в том, что однопутное БМ даже при достаточной пропускной способности линии может стать причиной снижения маршрутной скорости скоростных поездов и увеличения времени нахождения их в пути [3].

В связи с этим возникает необходимость в создании метода, который позволит оценить задержки поездов, а также затраты времени при пропуске поездов (в том числе скоростных) через однопутное барьерное место с учетом влияния параметров БМ на пропускную способность и возможности организации скоростного движения.

При организации скоростного и высокоскоростного движения по специализированной линии осуществляется пропуск только скоростных или высокоскоростных поездов с использованием параллельного графика движения. При повышении скорости движения по обычной линии необходимо рассматривать смешанное движение, т. е. непараллельный график, либо организовывать движение таким образом, чтобы выделять периоды «сгущения» пропуска скоростных и обычных поездов (использование как параллельного, так и непараллельного графика), в том числе с делением по периодам суток (например, пропуск грузовых поездов в ночное время) [4].

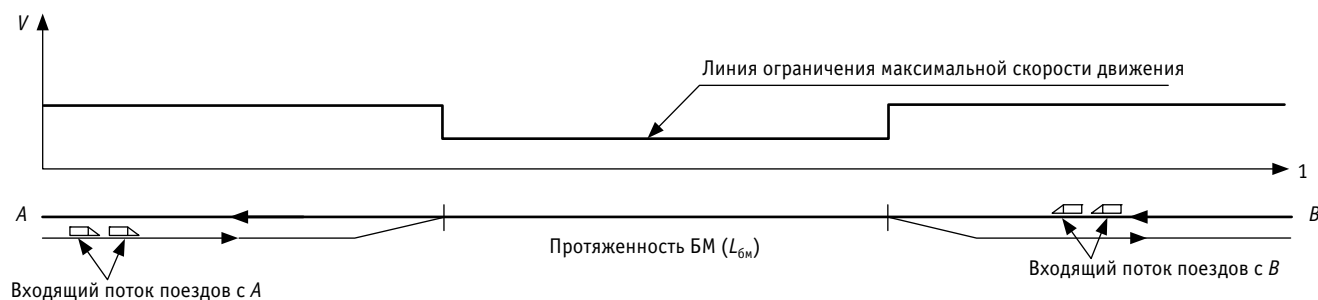


Рис. 1. Пропуск поездов, поступающих с разных направлений, через БМ

В случае высокой интенсивности движения при пропуске поездов возникают задержки на подходах к БМ. Подход поездов к БМ может рассматриваться в виде потока требований, при этом интервалы между поездами и длительность занятия подходов и барьерных мест могут быть различными [5]. В качестве примера на рис. 1 показан пропуск поездов, поступающих с направлений *A* и *B*, через БМ.

Барьерное место может рассматриваться как система массового обслуживания (СМО), которая характеризуется следующими основными параметрами:

- интенсивностью входящего потока требований (в качестве такового в данном случае рассматриваются поезда, поступающие с двухпутного перегона к однопутному БМ);
- интенсивностью выходящего потока требований;
- интенсивностью обслуживания входящих требований (она зависит от протяженности БМ, а также от возможных скоростных ограничений или ограничений, связанных с пропускной способностью);
- длиной очереди поступающих требований в систему, т. е. числом поездов на подходе к БМ;
- средним временем обслуживания одного требования (поезда), временем занятия БМ.

Элементы трассы, предшествующие БМ (подходы к нему с обоих направлений), рассматриваются в роли «накопителей очереди». При этом задержка может быть и не связана с остановкой поезда — в таком случае необходимо обеспечить «затягивание» поезда на подходе к БМ (снижение скорости и соответственно увеличение времени хода) на время, равное рассчитанному времени задержки [6].

Требования, приходящие в систему обслуживания, поступают в случайные, заранее не фиксированные моменты времени. Интервал времени между последовательными требованиями — случайная величина, которая в общем случае может иметь произвольное распределение. Поскольку пассажирские поезда курсируют строго по расписанию, поток требований может быть и неслучайным, в котором интервалы времени между последовательными требованиями будут фиксированными величинами.

Основными конструктивно-техническими характеристиками канала обслуживания являются:

- длина барьерного места $L_{\text{БМ}}$;
- скорость проследования через барьерный элемент трассы $V_{\text{БМ}}$;
- время занятия барьерного места $t_{\text{БМ}}$.

Время занятия БМ — это множество значений $t_{\text{БМ}} \in \{t_{\text{БМ}}^A, t_{\text{БМ}}^B\}$ в зависимости от подхода поездов и скоростных характеристик поезда. Оно определяется величинами $L_{\text{БМ}}$ и $V_{\text{БМ}}$ как и капитальные затраты, связанные с организацией скоростного и высокоскоростного движения на участке, содержащем БМ. Поэтому при организации скоростного и высокоскоростного движения по такому участку необходимо особое внимание уделять зависимости капитальных затрат от длины, скорости и времени проследования поезда [7].

При поступлении поездов с разных направлений объединение потоков будет происходить в местах подхода к БМ, поэтому в данном случае актуальным становится выбор приоритетности направления, зависящий от следующих факторов: последовательности подхода поездов к БМ, определяемой графиком движения поездов (ГДП);

- скорости подхода к БМ;
- протяженности каждого соответствующего сечения с четной и нечетной стороны;
- интенсивности поступления поездов с каждого направления.

Схема БМ в виде СМО представлена на рис. 2.

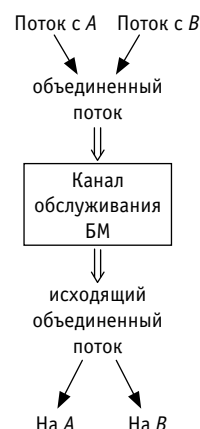


Рис. 2. Схема барьерного места в виде системы массового обслуживания

Входящий поток может задаваться в виде множества признаков поезда $\{P_i\}$ как объекта с набором конкретных свойств, определяющих порядок его пропуска через БМ, в зависимости от подхода. В качестве таких признаков могут выступать, например, момент подхода поездов к БМ, скоростная категория

поезда (пассажирский высокоскоростной, скоростной, обычной скорости, грузовой ускоренный, обычной скорости и т. п.), вес поезда, наличие негабаритности, ограничение по рабочему времени локомотивной бригады и др.

Рассмотрим произвольный поток поездов, поступающих с двух направлений (A и B , см. рис. 1). Пример потока поездов, проходящих через БМ, после объединения в общий поток показан на рис. 3.

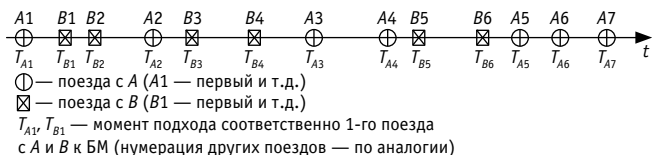


Рис. 3. Фрагмент потока поступающих поездов в СМО

Таким образом, БМ, рассматриваемое в виде СМО, будет иметь дело с произвольным входящим потоком требований, который характеризуется следующими параметрами:

- направлением поступления поездов (A, B);
- моментами поступления поездов в СМО (определяющими интенсивность поступления поездов каждого направления);
- временем обслуживания поезда каждого направления (т. е. длительностью занятия поездам БМ);
- временем ожидания обслуживания, если образуется очередь.

Из приведенных характеристик более подробно следует рассмотреть время обслуживания поступающих поездов, так как от него зависят время ожидания обслуживания (т. е. время задержки приема поезда БМ) и длина возможной очереди (число поездов, которые будут задерживаться при пропуске через БМ).

Каждый поезд, поступающий в СМО, занимает ее на определенный промежуток времени — это время обслуживания одного поезда $T_{обс}$, т. е. время занятия поездам барьерного места. При отсутствии приоритетов (которые могут устанавливаться заданием соответствующего признака Π_i) требования обслуживаются по принципу «первый пришел — первый обслужен». С направления A поезда поступают последователь-

но единым потоком от A_1 до A_7 , с направления B — от B_1 до B_7 соответственно. Момент освобождения БМ зависит от следующих факторов:

- момента подхода поезда каждого направления к барьерному месту T_n ;
- времени занятия БМ i -м поездом с подхода N , т. е. $T_n^{зан}$;
- времени задержки поезда по причине занятия барьерного места встречным поездом T_n^3 ;
- интервала попутного следования поезда соответствующего направления $I_n^{мин}$ (учитывается для обеспечения безопасности движения в том случае, когда подряд поступают два и более поезда с одного направления — A или B).

Последовательность поступления поездов к БМ и время его занятия для объединенного потока (см. рис. 3) представлены на рис. 4.

Схема рис. 4 показывает порядок определения моментов фактического занятия и моментов освобождения БМ каждым поездом. Так, для поезда A_1 время обслуживания $T_{обс}$ складывается из момента подхода к узкому месту T_{A1} и времени занятия узкого места $T_{A1}^{зан}$, т. е. $T_{обс} = T_{A1} + T_{A1}^{зан}$. Для поезда B_1 время обслуживания складывается из времени задержки на подходе к узкому месту T_{B1}^3 и времени занятия узкого места $T_{B1}^{зан}$. Кроме того, также необходимо учитывать интервал попутного следования поездов, потому что за поездом B_1 следует поезд попутного направления, поступающий с направления B , т. е. $T_{обс} = T_{B1}^3 + T_{B1}^{зан} + I_B^{мин}$. Время обслуживания для B_2 : $T_{обс} = T_{B2}^3 + T_{B2}^{зан}$, для A_2 : $T_{обс} = T_{A2}^3 + T_{A2}^{зан}$, для B_3 : $T_{обс} = T_{B3}^3 + T_{B3}^{зан} + I_B^{мин}$, для B_4 : $T_{обс} = T_{B4}^3 + T_{B4}^{зан}$, для A_3 : $T_{обс} = T_{A3}^3 + T_{A3}^{зан} + I_A^{мин}$, для A_4 : $T_{обс} = T_{A4}^3 + T_{A4}^{зан}$.

Время обслуживания требований (т. е. затраты времени каждого поезда, связанные с проходом через БМ) зависит от протяженности БМ, скоростных ограничений проследования барьерного места, а также от времени ожидания обслуживания, которое имеет накопительный характер (при наличии задержек и интенсивном движении длительность задержки каждого следующего поезда увеличивается). Схема образования исходящего объединенного потока поездов после прохода через БМ показана на рис. 5.

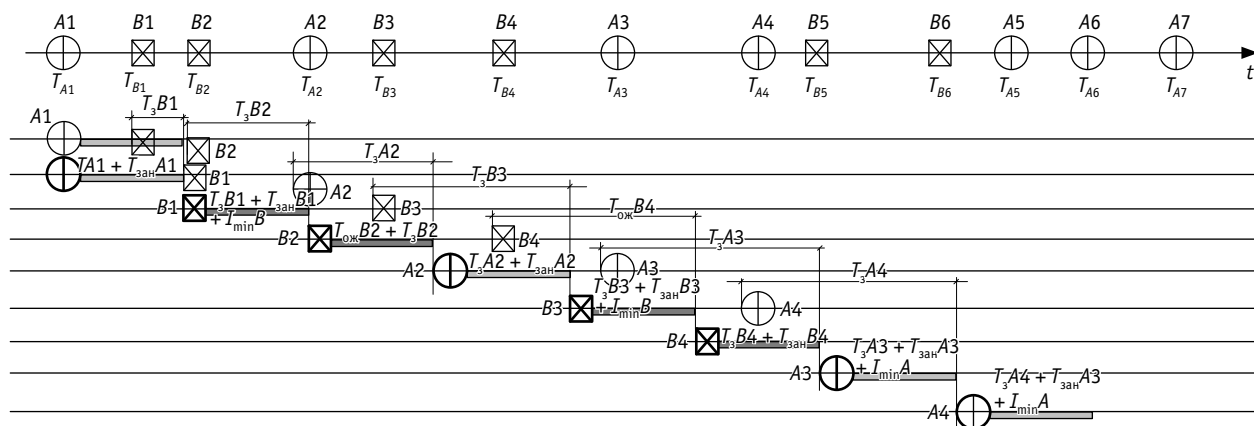


Рис. 4. Последовательность подхода поездов к барьерному месту и время занятия БМ

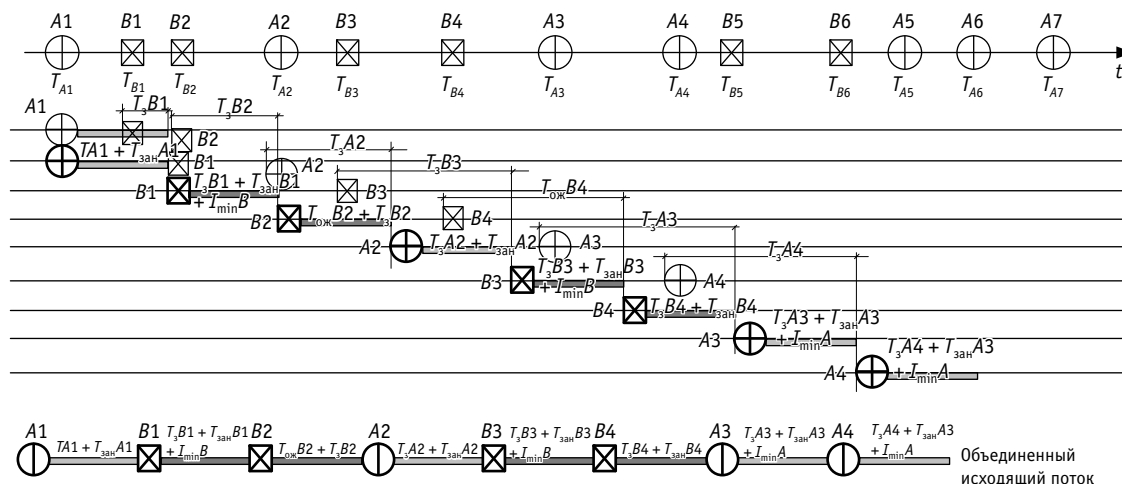


Рис. 5. Формирование исходящего объединенного потока поездов после прохода БМ

Фактическое время обслуживания каждого требования может быть учтено при построении графика движения поездов, пропускаемых по участку, содержащему БМ.

Фрагменты графика пропуска поездов встречного и попутного направления через узкое место трассы и моменты фактического подхода поездов представлены соответственно на рис. 6 и 7.

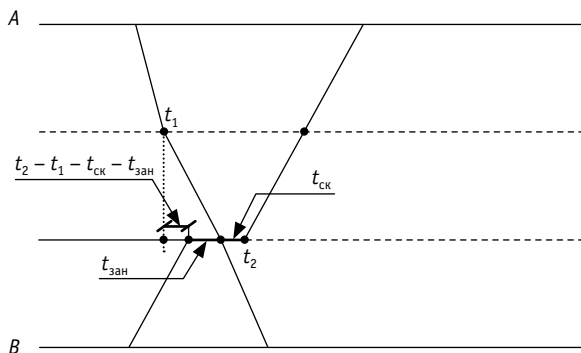


Рис. 6. Фактический момент подхода встречного поезда к БМ:
----- границы узкого места

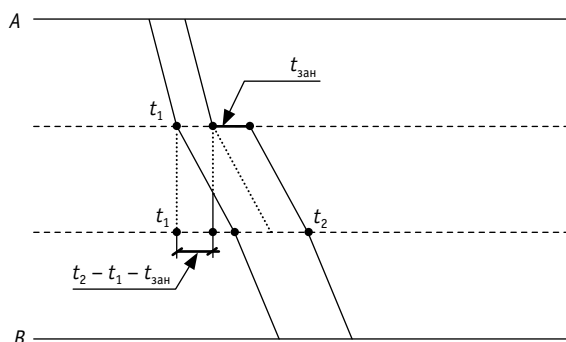


Рис. 7. Фактический момент подхода попутного поезда к БМ:
----- границы узкого места

Как видно из рис. 6 и 7, фактические моменты подхода встречного поезда встречного и попутного направления к БМ в случае задержки по причине занятости барьерного места при условии $t_2 < t_1 + t_{зан1}$ имеют вид соответственно $t'_2 = t_1 + t_{зан1} + t_{ск} + (t_2 - t_1)$ и $t_{зан n+1} = t_2 + t_{зан1} - t_1 + I_{мин}$.

Получаемое время задержки поездов может быть интерпретировано как задержка с остановкой либо как замедление пропуска, связанное с потерей времени из-за прохода через БМ инфраструктуры.

Для исключения задержки поездов необходимо после определения моментов фактического занятия и освобождения БМ каждым поездом сделать корректировку ГДП на участке, чтобы обеспечить смещение моментов подхода поездов к БМ. Скорректированные моменты должны соответствовать фактическим моментам занятия БМ, полученным при расчете, принцип которого описан выше. Важно отметить, что в некоторых случаях, например при высокой интенсивности планируемого подхода поездов к БМ, из-за смещения моментов фактического подхода, соответствующих пропуску поездов без задержек и замедлений, произойдет падение наличной пропускной способности участка за счет потери части ниток [8].

В качестве метода автоматизации расчетов, описанных выше, предлагается использовать имитационное моделирование пропуска поездопотоков через БМ. Этот метод не накладывает ограничений на параметры входящих поездопотоков и дает возможность исследовать процесс пропуска поездов через БМ при их произвольном подходе и других параметрах, а также статистически обрабатывать полученные результаты [9, 10].

Разработанная модель «ИМ Барьер-1» позволяет:
определить приоритет и последовательность пропуска поездов встречных направлений через БМ;

рассчитать количество поездов, пропускаемых через однопутный барьерный элемент, и потерю времени из-за занятости БМ (с задержкой, остановкой или с замедлением пропуска);
построить график пропуска поездов встречных направлений через барьерное место инфраструктуры (однопутный элемент) с учетом приоритета и задержек (потеря времени из-за замедления) на подходах к нему.

Кроме того, для каждого поезда модель определяет моменты фактического занятия и освобождения БМ, задержки или необходимое смещение моментов подхода поездов, а также эксплуатационные расходы, связанные с замедлением пропуска поездопотоков через однопутное БМ.

Программа «ИМ Барьер-1» состоит из двух модулей — основного и модуля ввода-вывода данных.

Первый модуль обеспечивает моделирование процесса пропуска встречных потоков поездов через БМ инфраструктуры за счет использования агентного моделирования, когда каждый поезд обоих потоков может наделяться необходимым количеством свойств $\{P_i\}$, определяющих порядок его пропуска через барьерное место. К таким свойствам, в частности, относятся: момент подхода к БМ, длительность занятия БМ, обусловленная скоростным режимом, стоимость задержки (замедления темпа пропуска) поезда через БМ, признак приоритета поезда.

Все данные могут задаваться индивидуально для каждого поезда. Таким образом, появляется возможность моделировать процесс пропуска поездов через однопутный барьерный элемент не только при известных распределениях интервалов времени между поездами, времени занятия БМ, но и фактически при любом (в том числе неизвестном) виде распределений, а также при использовании фиксированных расписаний с обеспечением уровня детализации модели до одного поезда.

Помимо расчета затрат времени (в том числе задержек), связанных с пропуском встречных поездопотоков через БМ, программа позволяет определять и экономические показатели: стоимость задержки (увеличения времени хода) по каждому пропускаемому поезду, а также суммарные эксплуатационные расходы, обусловленные замедлением пропуска поездопотоков из-за недостатка пропускной способности однопутного барьерного места. Исходные данные и результаты расчета формируются в виде электронных таблиц Excel.

На листе «Результаты моделирования» отображаются:

- моменты фактического занятия БМ;
- моменты фактического освобождения БМ;
- длительность задержки поездов;
- расходная ставка на единицу времени задержки поезда;
- расходы по задержкам поездов.

Результаты моделирования пропуска встречных поездопотоков дублируются в основном окне программы в числовом виде (рис. 8а), а также в виде графика с учетом увеличения времени на подходах к БМ (рис. 8б).

Разработанная модель позволит учитывать особенности пропускаемого поездопотока, а также получить множество вариантов ГДП, сравнить их и выбрать оптимальный исходя из принятых критериев оценки. Оптимальным, в частности, можно считать график движения, при котором задержки на подходе к БМ либо отсутствуют, либо минимальны.

Использование модели основано на итерационном методе [11]. На первом этапе подход поездов к БМ задается из их планируемого количества (для скоростных поездов учитывается также расписание движения) на участке. Вариант графика пропуска через БМ показан на рис. 9.

После получения графика пропуска встречных поездопотоков через однопутное БМ оценивается приемлемость задержек, возникающих на подходе к барьерному месту (количество, длительность задержек), а также технологические возможности изменения моментов подвода поездов к БМ (за счет изменения порядка пропуска по предыдущим перегонам участка, изменения времени хода, изменения моментов отправления или снижения количества поездов). При принятии решений учитываются определяемые программой дополнительные эксплуатационные расходы, связанные с экономическими издержками от замедления пропуска через БМ каждого поезда.

Один из вариантов решения — изменение длительности занятия барьерного места, что может быть обеспечено корректировкой его конструктивных параметров (в частности, за счет изменения протяженности или уровня ограничений скорости).

На втором (и при необходимости последующем) этапе формируется скорректированный вариант подхода поездов к БМ с примыкающих двухпутных подходов, осуществляется моделирование по программе и оцениваются результаты.

При необходимости увеличения размеров движения через однопутный элемент трассы будут возникать задержки поездов или потребность в их «затягивании» перед БМ для обеспечения нужного момента подхода. В этом случае нужно выбирать между двумя решениями: проектировать вместо однопутного элемента двухпутный, что потребует дополнительных капитальных затрат, либо принимать вариант

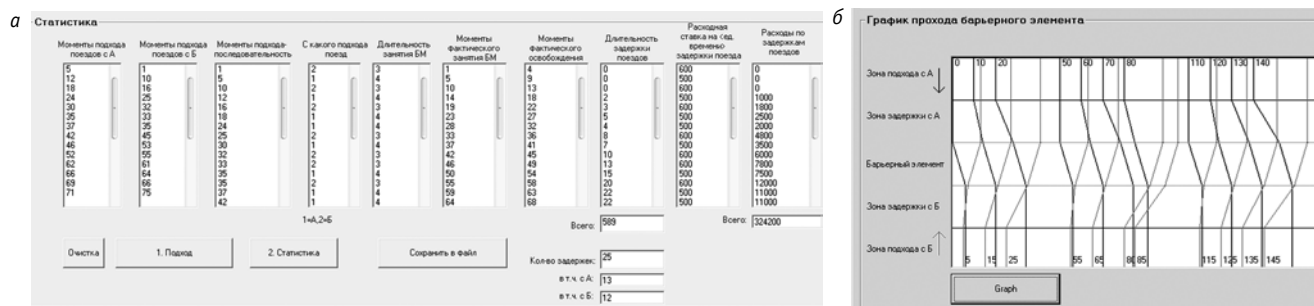


Рис. 8. Результаты работы модели «ИМ Барьер-1»:
а — аналитическая часть; б — графическая часть

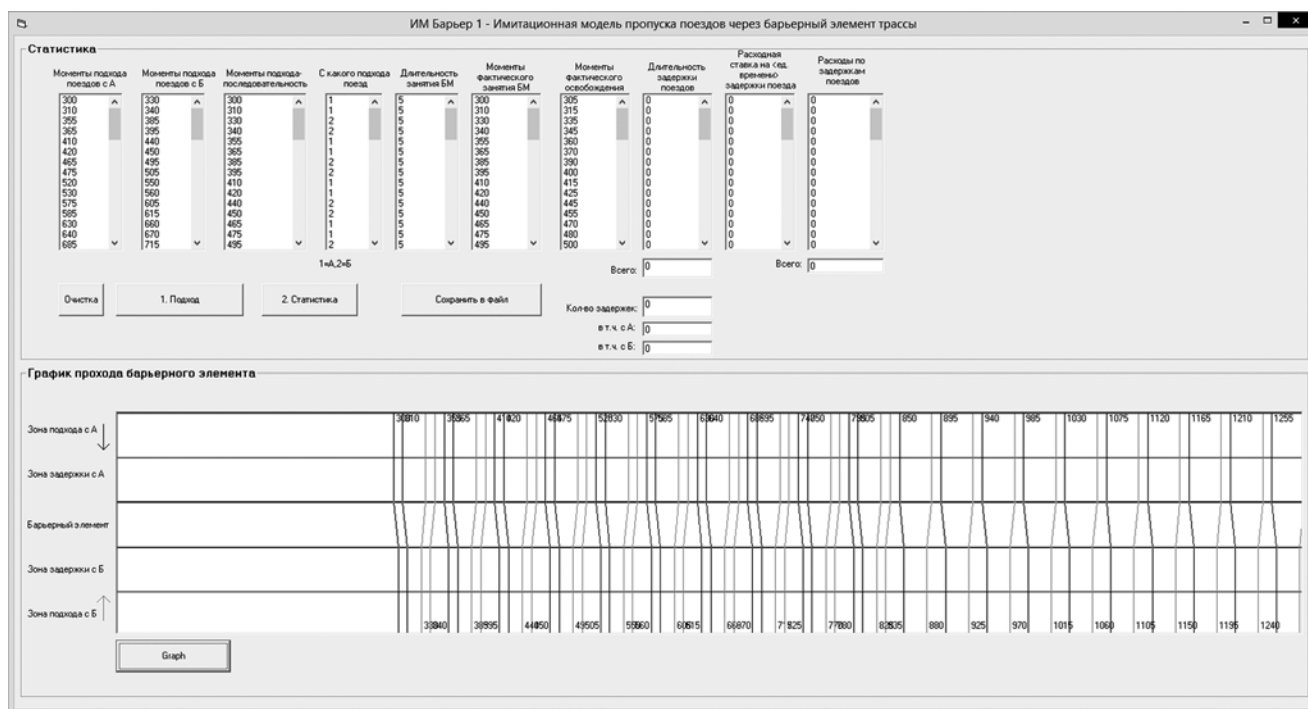


Рис. 9. Пакетный график пропуска поездов без задержек на подходе к БМ

с однопутным элементом, что потребует дополнительных эксплуатационных расходов, связанных с задержками пропуска встречных поездопотоков. Величина этих расходов будет зависеть от количества и длительности задержки на подходах к БМ, а также от стоимости минуты такой задержки с учетом категории поезда.

Таким образом, предлагаемая модель позволяет выполнять комплексную оценку процесса пропуска поездопотоков через однопутное барьерное место двухпутной линии на основе расчета временных и экономических показателей, связанных с замедлением и задержками пропуска поездов. Основные достоинства модели:

возможность задавать входящие потоки с произвольными параметрами (моменты подхода к барьерному месту трассы, длительность занятия БМ, приоритеты пропуска и др.) и, как

следствие, моделировать любой тип ГДП на подходах к барьерному месту с детализацией по каждому поезду;

автоматизация построения графика пропуска поездов через БМ с учетом задержек. График может использоваться для анализа процесса работы барьерного места, принятия организационно-технических решений по изменению конструктивных параметров БМ, планирования пропуска поездов;

возможность расчета эксплуатационных расходов, связанных с пропуском поездопотоков через однопутное барьерное место.

Использование возможностей разработанной модели имеет особое значение для комплексного технико-экономического обоснования параметров однопутных барьерных элементов железнодорожной линии, в том числе предназначенной для высокоскоростного, скоростного, а также смешанного движения [12].

Литература

1. Фролов Ю. С. Тоннели на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Транспорт Российской Федерации. 2010. № 1 (26). С. 28–31. ISSN 1994-831X.
2. An Alternate Double-Single Track Proposal for High-Speed Peripheral Railway Lines / E. Castillo, I. Gallego, S. Sánchez-Cambronero, et al. // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2015. No. 30. P. 181–201.
3. Левин Д. Ю. Очереди на железной дороге // Мир транспорта. 2014. № 2. С. 132–139. ISSN 1992-3252.

References

1. Frolov Yu. S. Tunnels at high-speed railroad mains // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2010. № 1 (26). S. 28–31. ISSN 1994-831X.
2. An Alternate Double-Single Track Proposal for High-Speed Peripheral Railway Lines / E. Castillo, I. Gallego, S. Sánchez-Cambronero, et al. // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2015. No. 30. P. 181–201.
3. Levin D. Yu. Ocheredi na zheleznoy doroge [Train queuing at railways] // Mir transporta. 2014. № 2. S. 132–139. ISSN 1992-3252.

4. Левин Д. Ю., Павлов В. Л. Расчет и использование пропускной способности железных дорог. М. : ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. 364 с.
5. Математические методы в эксплуатации железных дорог : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. М. Акулиничев, В. А. Кудрявцев, А. Н. Корешков и др. М. : Транспорт, 1981. 223 с.
6. Карасев С. В., Зарубина Т. Д. Особенности организации скоростного движения с учетом использования имеющейся железнодорожной инфраструктуры // Политранспортные системы : матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. в рамках Года науки Россия — ЕС. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2015. С. 61–67.
7. Калидова А. Д. Особенности организации скоростного (высокоскоростного) движения с использованием существующей инфраструктуры // Научные исследования: от теории к практике. 2015. № 5 (6). С. 229–231. ISSN 2413-3957.
8. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. М., 2011. 290 с.
9. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. М. : Мир, 1978. 420 с.
10. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS / 3-е изд. СПб. : Питер ; Киев : Изд. группа BHV, 2004. 847 с.
11. Александров А. Э., Сурин А. В., Шипулин А. В. Использование имитационных моделей в оперативном планировании поездной работы // Вестник РГУПС. 2015. № 4. С. 65–71. ISSN 0201-727X.
12. Александров А. Э., Сурин А. В. Методика использования имитационных моделей поездобразования и продвижения поездов в оперативном планировании // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 66–70. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-66-70. ISSN 1815-9400.
4. Levin D. Yu., Pavlov V. L. Raschet i ispolzovanie propusknoy sposobnosti zheleznnykh dorog [Calculation and use of railway capacity]. M. : FGOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2011. 364 s.
5. Matematicheskie metody v ekspluatatsii zheleznnykh dorog : ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transp. [Mathematical methods in the operation of railways : textbook] / V. M. Akulinichev, V. A. Kudryavtsev, A. N. Koreshkov i dr. M. : Transport, 1981. 223 s.
6. Karasev S. V., Zarubina T. D. Osobennosti organizatsii skorostnogo dvizheniya s uchetom ispolzovaniya imeyushchey zheleznodorozhnoy infrastruktury [Features of organization of high-speed traffic taking into account the use of the existing railway infrastructure] // Politransportnye sistemy : mater. VIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. v ramkakh Goda nauki Rossiya — ES. Novosibirsk : Izd-vo SGUPS, 2015. S. 61–67.
7. Kalidova A. D. Osobennosti organizatsii skorostnogo (vysokoskorostnogo) dvizheniya s ispolzovaniem sushchestvuyushchey infrastruktury [Features of the organization of high-speed traffic using the existing infrastructure] // Nauchnye issledovaniya: ot teorii k praktike. 2015. № 5 (6). S. 229–231. ISSN 2413-3957.
8. Instruktziya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznnykh dorog [Instructions for calculating the available traffic capacity of railways]. M., 2011. 290 s.
9. Shennon R. Imitatsionnoe modelirovanie sistem — iskusstvo i nauka [Simulation of systems — art and science]. M. : Mir, 1978. 420 s.
10. Kelton V., Lou A. Imitatsionnoe modelirovanie. Klassika CS [Simulation modeling. Classics CS] / 3-e izd. SPb. : Piter ; Kiev : Izd. gruppа BHV, 2004. 847 s.
11. Aleksandrov A. E., Surin A. V., Shipulin A. V. Ispolzovanie imitatsionnykh modeley v operativnom planirovanii poezdnoy raboty [The use of simulations models in operational planning of train's operation] // Vestnik RGUPS. 2015. № 4. S. 65–71. ISSN 0201-727X.
12. Alexandrov A. E., Surin A. V. Metodika ispolzovaniya imitatsionnykh modeley poezdoobrazovaniya i prodvizheniya poezdov v operativnom planirovanii [Method of using imitation models of train formation and movement in operation planning] // Transport Urala. 2016. № 4 (51). S. 66–70. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-66-70. ISSN 1815-9400.

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-vypusknikov-urgups>

Извещение	<p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2017 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2017 г.</p>

Подписка на 2017 год.

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

✂

АБОНЕМЕНТ

на ~~газету~~
журнал

46463
(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2017 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на ~~газету~~
журнал

46463
(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Стои- мость	подписки	руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	руб. ____ коп.		

на 2017 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 2 (53), 2017 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс: 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство ПИ № 77-18098

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

С 1 января 2007 г. журнал включен ВАКом в перечень периодических, научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Подписано в печать 30.06.2017

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 № 1096

© Уральский государственный университет путей сообщения, 2017