

# ТРАНСПОРТ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## УРАЛ

**ДИНАМИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ  
В СИСТЕМЕ «ПРОИЗВОДСТВО — ТРАНСПОРТ — ПОТРЕБЛЕНИЕ»**

**МОДЕЛЬ ОСНОВНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ  
СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ**

**МАКРОАНАЛИЗ РАЗВИТИЯ  
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА  
В СТРАНАХ ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ И ВОСТОЧНОЙ АЗИИ**

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
СТОИМОСТИ МЕСТА НА ПЛАТНОЙ ПАРКОВКЕ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ  
КОМПЕНСАЦИИ НАТЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКЕ**



# 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. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
5. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
10. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
11. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
12. Туранов Хабибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
13. Умняшкин Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Ижевск
14. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
15. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

### INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

### EDITORIAL BOARD

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



**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА**

П. А. Козлов, Н. А. Тушин, Е. В. Копылова. Динамическое согласование в системе «производство — транспорт — потребление» .....	3
А. Э. Александров, А. Г. Галкин, В. Ю. Пермикин, Е. Н. Тимухина. Модель основной технологической линии сортировочной станции .....	7
А. В. Мартыненко, М. Б. Петров. Макроанализ развития высокоскоростного транспорта в странах Западной Европы и Восточной Азии .....	13
А. А. Абызов, И. Я. Березин. Моделирование процесса изменения скорости быстроходной гусеничной машины в условиях движения по труднопроходимой местности .....	19

**АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ**

А. М. Костроминов, Е. А. Стрекаловский, О. Н. Тюляндин. Анализ и повышение точности RFID-навигации в условиях метрополитена .....	23
Б. В. Рожкин, А. В. Паранин. Анализ условий работы рельсовой линии на основе моделирования растекания обратного тягового тока .....	28

**ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

В. Е. Кошкарров, В. М. Самуйлов, Е. В. Кошкарров. Новая технология проектирования и строительства высокоскоростных железнодорожных магистралей .....	35
--	----

**ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ**

А. О. Шмидт. Автоматизация гибкого регулирования составности поездов на основе прогнозирования пригородных пассажиропотоков .....	41
---	----

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА**

В. А. Войтенко. Исследование динамических характеристик дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой .....	48
К. И. Доманов, Ю. А. Хлобыстов. Оценка результатов подконтрольной эксплуатации по определению тяговых и сцепных свойств грузового электровоза двойного питания на участках Южно-Уральской железной дороги .....	53

**ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО**

Н. Ф. Сирина, Г. А. Камаретдинова. Классификация рисков при техническом обслуживании вагонов на межгосударственных стыковых пунктах .....	58
Д. Я. Носырев, И. В. Чепурченко, С. В. Коркина. Определение инерционных динамических нагрузжений, действующих на кузов полувагона при выгрузке на роторном вагоноопрокидывателе .....	63

**АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ**

А. Ф. Дубровский, С. А. Дубровский, С. В. Алюков, К. В. Прокопьев, О. Р. Якупов, А. С. Алюков. Об эффективности использования адаптивных амортизаторов в подвесках транспортных средств .....	68
О. Ф. Данилов, А. Н. Паршуков. Методика определения стоимости места на платной парковке .....	74

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА**

А. П. Буйносов, Д. В. Волков, Е. В. Федоров. Автоматический контроль целостности и плотности тормозной сети поезда .....	77
С. Г. Истомин, А. А. Штраухман. Анализ применения регрессионных моделей для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования пригородных электропоездов постоянного тока ЭД4М .....	81

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ**

А. А. Ковалев, Н. В. Крапивин. Исследование работы устройств компенсации натяжения в контактной подвеске .....	86
А. В. Окунев. Комплексный подход к диагностике опор контактной сети .....	91

**GENERAL TRANSPORT PROBLEMS**

P. A. Kozlov, N. A. Tushin, E. V. Kopylova. Dynamic coordination in «production — transport — consumption» system .....	3
A. E. Alexandrov, A. G. Galkin, V. Yu. Permikin, E. N. Timukhina. Model of marshalling station main processing line .....	7
A. V. Martynenko, M. B. Petrov. Macroanalysis of high-speed transport development in Western Europe and Eastern Asia .....	13
A. A. Abyzov, I. Ya. Berezin. Modeling of the process of changing the speed of a fast-way tracked vehicle under the conditions of movement on the difficult situation .....	19

**AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION**

A. M. Kostrominov, E. A. Strekalovskiy, O. N. Tyulyandin. Analysis and increase of RFID-navigation accuracy in metro conditions .....	23
B. V. Rozhkin, A. V. Pararin. Analysis of rail track operation conditions on the basis of modeling return traction current spreading .....	28

**RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK**

V. E. Koshkarov, V. M. Samuylov, E. V. Koshkarov. New technology of designing and building high-speed railway mainlines .....	35
---	----

**CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION**

A. O. Shmidt. Automation of flexible regulation of train formation based on suburban passenger traffic forecasting .....	41
--	----

**ROLLING STOCK AND TRACTION**

V. A. Voytenko. A study of dynamic characteristics of plate brake with floating brake shoe .....	48
K. I. Domanov, Yu. A. Khlobystov. Evaluation of the results of controlled operation to determine the tractor and coupler properties of the load electric power of double power on the sites South Ural Railway .....	53

**RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT**

N. F. Sirina, G. A. Kamaretdinova. Classification of risks in maintenance of cars at interstate division points .....	58
D. Ya. Nosyrev, I. V. Chepurchenko, S. V. Korkina. Determination of inertial dynamic loads acting on open box car body during unloading in a rotary car dumper .....	63

**MOTOR TRANSPORT**

A. F. Dubrovskiy, S. A. Dubrovskiy, S. V. Alyukov, K. V. Prokopyev, O. R. Yakupov, A. S. Alyukov. On the efficiency of the use of adaptive shock absorbers in suspensions of vehicles .....	68
O. F. Danilov, A. N. Parshukov. Method of determining the cost of a parking space for paid parking .....	74

**ELECTRIC TRACTION**

A. P. Buynosov, D. V. Volkov, E. V. Fedorov. Automatic control of train braking system integrity and density .....	77
S. G. Istomin, A. A. Shtraukhman. Analysis of the application of regression models for the estimation of the energy efficiency of the auxiliary equipment of the suburban electric trips of the direct current of the ED4M .....	81

**ELECTRIC SUPPLY**

A. A. Kovalev, N. V. Krapivin. A study of contact wire tensioning devices operation .....	86
A. V. Okunev. Complex approach to diagnostics of catenary poles .....	91

УДК 656.078

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

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

**Екатерина Витальевна Копылова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия**

## ДИНАМИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ В СИСТЕМЕ «ПРОИЗВОДСТВО — ТРАНСПОРТ — ПОТРЕБЛЕНИЕ»

**Petr Alexeyevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, President of Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia,**

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

**Ekaterina Vitalyevna Kopylova, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Business Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia**

### Dynamic coordination in «production — transport — consumption» system

#### Аннотация

В научных публикациях, исследующих проблему производственно-транспортного взаимодействия, до сих пор рекомендуется использовать лишь статическую транспортную задачу, в которой транспорт содержательно отображается весьма бедно — только как прикрепление поставщиков к потребителям. Вместе с тем в 80-е гг. прошлого столетия была предложена *динамическая транспортная задача с задержками*, существенно расширяющая возможности расчета оптимального взаимодействия в системе «производство — транспорт — потребление».

В настоящей статье описываются возможности транспортной задачи линейного программирования в динамической постановке при оптимизации взаимодействия поставщиков, транспорта и потребителей. Показаны механизмы пассивного и активного согласования параметров и ритмов работы всех трех участников для снижения потерь взаимодействия. В качестве метода решения динамической задачи используется сведение ее к статической разномножением во времени.

**Ключевые слова:** транспортная задача, динамика, согласование, взаимодействие, производство, потребление.

#### Summary

In scientific publications of transport scientists dealing with the problem of production and transport interaction it is still recommended to use only a static transportation problem. Within the static transportation problem transport is displayed very poorly — only as the attachment of suppliers to consumers. In the 1980s a dynamic transportation problem with delays was published. This problem dramatically expands the possibilities of calculating the optimal interaction in the «production — transport — consumption» system.

The paper describes the capabilities of the linear programming transportation problem in a dynamic setting for the optimization of suppliers, transport and consumers interaction. Mechanisms of passive and active coordination of parameters and rhythms of all participants operation for the decrease of interaction losses are shown. The method of solving the dynamic transportation problem is to reduce it to a static by reproduction in time.

**Keywords:** transportation problem, dynamics, coordination, interaction, production, consumption.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-3-6

#### 1. ПРОБЛЕМА

Когда говорят об оптимизации взаимодействия поставщиков и потребителей через транспорт, то обычно обращаются к транспортной задаче линейного программирования (*планирования* — при правильном переводе с английского). Задача была сформулирована еще в середине прошлого столетия Л. В. Канторовичем [1]. Конечно, в то время это был научный прорыв, однако возможности согласования в упомянутой системе были весьма скромными. Транспорт был представлен весьма бедно — только как прикрепление поставщиков к потребителям.

В 80-е гг. прошлого столетия была предложена *динамическая транспортная задача с задержками (ДТЗЗ)* [2–4], резко расширяющая возможности расчета оптимального взаимодействия в системе «производство — транспорт — потребление». Но даже в научных публикациях ученых, занимающихся проблемой производственно-транспортного взаимодействия, до сих пор рекомендуется применять лишь статическую транспортную задачу.

В настоящей статье более подробно рассматриваются возможности динамической транспортной задачи, чтобы облегчить использование этого аппарата в решении практических задач взаимодействия — согласованного подвода грузов к портам, обеспечения пунктов погрузки порожняком, согласования ритмов работы производителей и потребителей руды, угля и других массовых грузов через транспорт и т.п.

#### 2. ОТОБРАЖЕНИЕ ПАССИВНОГО СОГЛАСОВАНИЯ

Напомним, что статическая транспортная задача формулируется следующим образом: найти минимум затрат на перевозки от поставщиков к получателям при полном обеспечении производства и потребления, т.е.

$$\sum_i \sum_j c_{ij} u_{ij} \rightarrow \min, \sum_j u_{ij} = a_i, \sum_i u_{ij} = b_j, \quad (1)$$

где  $c_{ij}$  — стоимость доставки;  
 $u_{ij}$  — транспортный поток;  
 $a_i$  — объем производства;  
 $b_j$  — объем потребления.

В динамической постановке все эти параметры могут изменяться во времени. Но так как задаются ритмы производства и потребления, появляются новые переменные — запасы у отправителя и получателя (рис. 1).

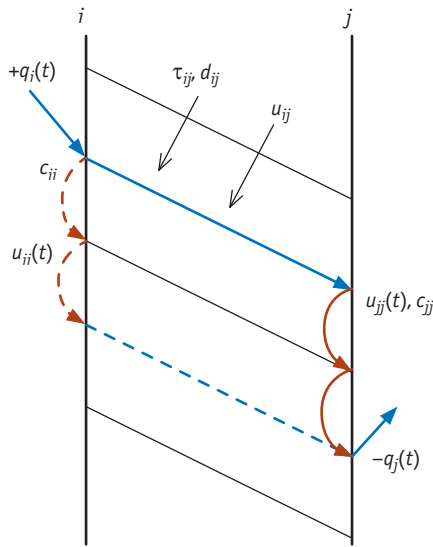


Рис. 1. Связь в динамике отправителя и получателя через транспорт

Здесь производство  $+q_i(t)$  и потребление  $-q_j(t)$  заданы во времени. И поток, и запасы имеют, естественно, ограничения сверху:  $u_{ij}(t) \leq d_{ij}$ ,  $u_{ii}(t) \leq d_{ii}$ ,  $u_{jj}(t) \leq d_{jj}$ . Задаются также время хода  $\tau_{ij}$ , стоимость доставки  $c_{ij}$  и стоимость хранения запасов  $c_{ii}$  и  $c_{jj}$ .

Запасы  $u_{ii}(t)$  и  $u_{jj}(t)$  являются, по сути, переменными, которые согласуют ритмы отправителя и получателя. То есть цепочка согласования выглядит так:

$$+q_i(t) \Rightarrow u_{ii}(t) \Rightarrow u_{ij}(t) \Rightarrow -q_j(t). \quad (2)$$

Это согласование *пассивное*, потому что активной роли транспорт здесь не играет.

Равенство объемов производства и потребления теперь будет выглядеть иначе:

$$\sum_{t(ij)} \sum_i q_i(t) = \sum_{t(ij)} \sum_j q_j(t + \tau_{ij}). \quad (3)$$

Критерий оптимизации задается следующим образом:

$$R = \sum_t \sum_i \sum_j c_{ij} u_{ij} + \sum_t \sum_i c_{ii} u_{ii}(t) + \sum_t \sum_j c_{jj} u_{jj}(t) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Динамика запасов у отправителя имеет вид

$$u_{ii}(t+1) = u_{ii}(t) + q_i(t) - \sum_j u_{ij}(t), \quad (5)$$

у получателя

$$u_{jj}(t+1) = u_{jj}(t) + q_j(t) + \sum_i u_{ij}(t - \tau_{ij}). \quad (6)$$

Но поставка может и опоздать, тогда применяется модельное согласование (рис. 2).

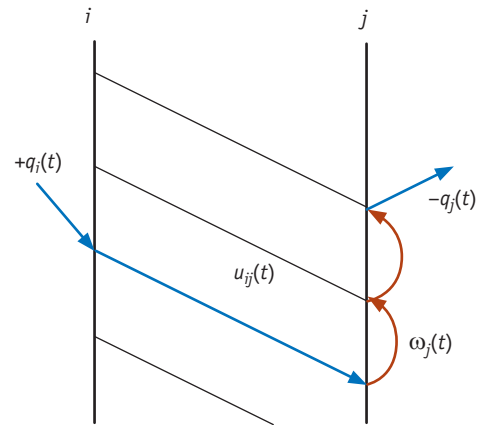


Рис. 2. Модельное согласование при опоздании поставки

Переменная  $\omega_j(t)$  обозначает объем задержанного потребления и является согласующей. Цепочка согласования теперь имеет вид

$$+q(t)_i \Rightarrow \omega_j(t) \Rightarrow q_j(t + \tau_{ij} - \Delta t), \quad (7)$$

где  $\Delta t$  — рассогласование во времени прибытия и потребления.

Оптимизация выглядит в этом случае так:

$$R + \sum_t \sum_j c_j \omega_j(t) \rightarrow \min. \quad (8)$$

А динамика запасов у потребителя будет иметь вид

$$u_{jj}(t+1) = u_{jj}(t) + \sum_i u_{ij}(t - \tau_{ij}) + q_j(t) + \omega_j(t+1) - \omega_j(t). \quad (9)$$

### 3. ОПТИМИЗАЦИЯ АКТИВНОГО СОГЛАСОВАНИЯ

Активное согласование — это когда идет адаптивное подстраивание собственной работы для создания удобства партнерам.

#### 3.1. Активный транспорт

Транспорт может играть самую активную роль в организации эффективного взаимодействия в системе «производство — транспорт — потребление» [5, 6]. Но выбор оптимальных режимов можно рассчитать только с помощью транспортной задачи в динамической постановке.

Основные возможности ДТЗЗ:

1. *Оптимальное динамическое прикрепление поставщиков к потребителям* [переменная  $u_{ij}(t)$ ]. Использование этого механизма позволит существенно снизить неравномерность прибытия и соответственно сократить простои составов с рудой и углем на металлургических заводах. Вот, например, как выглядело бы прибытие составов с углем на один из заводов, если бы все производители отправляли груз равномерно (рис. 3).

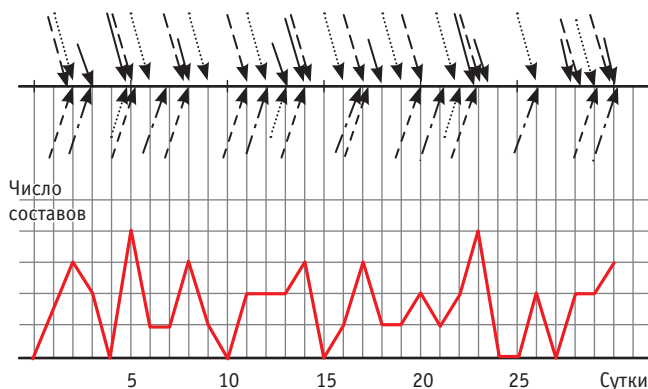


Рис. 3. Интенсивность прибытия маршрутов с углем при равномерном отправлении

2. *Управление временем доставки* (рис. 4). Режим и соответственно время доставки могут меняться. Например, груз может идти в технических или в более быстрых отправительских маршрутах [переменная  $u_{ij}^f(t)$ ].

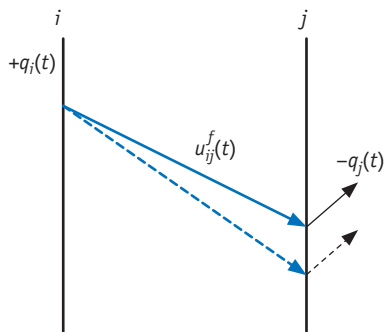


Рис. 4. Отображение нормальной и ускоренной доставки груза

3. *Возможности отображения других влияющих факторов*. Модель может отображать изменение пропускной способности линий во времени (например, во времени «окна») — переменная  $d_{ij}(t)$ , соответственно и времени доставки — переменная  $\tau_{ij}(t)$ , а также изменение стоимости доставки в течение периода расчета — переменные  $c_{ij}(t)$  и  $c_{ij}^f(t)$ .

### 3.2. Активное производство

Производство подстраивается к потреблению (рис. 5).

В этом случае вводится согласующая переменная  $\omega_i(t)$ , которая подстраивает ритм производства под ритм потребления. Цепочка согласования имеет вид

$$+q_i(t) \Rightarrow \omega_i(t) \Rightarrow -q_j(t). \quad (10)$$

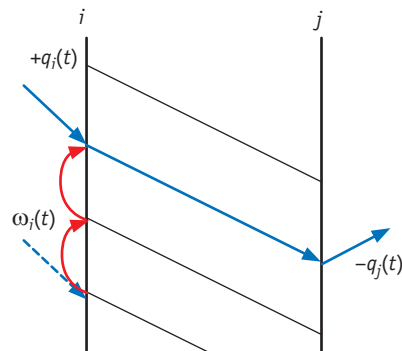


Рис. 5. Активное подстраивание производства к потреблению

Оптимизацию задает функционал

$$R + \sum_t \sum_i c_i \omega_i(t) \rightarrow \min, \quad (11)$$

где  $c_i$  — стоимость смещения момента отправления единицы потока на единицу времени назад, а динамика запасов у отправителя имеет вид

$$u_{ii}(t+1) = u_{ii}(t) + q_j(t) - \sum_j u_{ij}(t) + \omega_i(t+1) - \omega_i(t). \quad (12)$$

### 3.3. Активное потребление

Потребление подстраивается к производству (рис. 6).

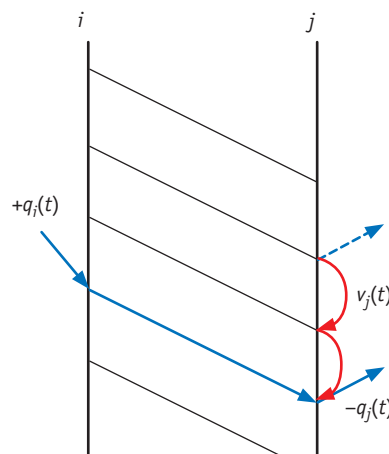


Рис. 6. Адаптивное изменение ритма потребления

Вводится согласующая переменная  $v_j(t)$ , которая подстраивает ритмы потребления под ритмы производства. Функционал имеет вид

$$R + \sum_t \sum_j c_j^* v_j(t) \rightarrow \min, \quad (13)$$

где  $c_j^*$  — стоимость смещения момента потребления единицы потока на единицу времени вперед,  
а динамика запасов у потребителя будет такой:

$$u_{ij}(t+1) = u_{ij}(t) + \sum_i u_{ij}(t - \tau_{ij}) - q_j(t) + v_j(t-1) - v_j(t). \quad (14)$$

В общей постановке динамической транспортной задачи учитываются все описанные механизмы.

Таким образом, динамическая постановка транспортной задачи имеет значительно большую возможность отображения различных сторон взаимодействия производства и транспорта и существенно расширяет средства оптимизации. Динамическая задача сводится для решения к статической методом размножения во времени [2, 3].

Адаптивное взаимодействие активизирует так называемые динамические резервы (резервы управления), которые по функции замещают резервы фактические [7, 8]. И динамическая транспортная задача представляет собой эффективный аппарат для увеличения первых и снижения вторых.

## Литература

1. Канторович Л. В. Математические методы организации и планирования производства. Л. : ЛГУ, 1939. 67 с.
2. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. № 3. С. 521–531. ISSN 0424–7388.
3. Козлов П. А., Миловидов С. П. Динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1982. № 1. С. 211–212. ISSN 0002–3388.
4. Блюмин С. Л., Козлов П. А., Миловидов С. П. Динамическая транспортная задача с задержками // Автоматика и телемеханика. 1984. № 25. С. 158–161. ISSN 0005–2310.
5. Козлов П. А., Миловидов С. П., Попов А. Т. Оптимизация промышленного транспорта в промышленных системах // Экономика и математические методы. 1986. Т. XXII. № 4. С. 697–703. ISSN 0424–7388.
6. Козлов П. А., Мишарин А. С. Двухуровневая модель управления грузопотоками на железнодорожном транспорте // Известия РАН. Теория и системы управления. 2002. № 5. С. 136–145. ISSN 0002–3388.
7. Владимирская И. П. Транспортные системы с адаптивной структурной технологией // Транспорт Урала. 2010. № 1 (24). С. 17–18. ISSN 1815–9400.
8. Козлов П. А., Колокольников В. С. Теоретические основы гибкого взаимодействия станций в узле // Транспорт Урала. 2013. № 2 (37). С. 28–31. ISSN 1815–9400.

## References

1. Kantorovich L. V. Mathematical methods of organizing and planning production [Matematicheskie metody organizatsii i planirovaniya proizvodstva]. L. : Leningrad State University, 1939. 67 p.
2. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Optimization of transport flows structure in flow dynamics at the priority of consumers [Optimizatsiya struktury transportnykh potokov v dinamike pri prioritete potrebitel'ey] // Economics and Mathematical Methods. 1982. Vol. XVIII. No. 3. Pp. 521–531. ISSN 0424–7388.
3. Kozlov P. A., Milovidov S. P. The dynamic transportation problem with delays in the network statement [Dinamicheskaya transportnaya zadacha s zaderzhkami v setevoy postanovke] // Soviet Journal of Computer and Systems Sciences. 1982. No. 1. Pp. 211–212. ISSN 0002–3388.
4. Blyumin S. L., Kozlov P. A., Milovidov S. P. A dynamic transportation problem with delays [Dinamicheskaya transportnaya zadacha s zaderzhkami] // Automation and Remote Control. 1984. No. 25. Pp. 158–161. ISSN 0005–2310.
5. Kozlov P. A., Milovidov S. P., Popov A. T. Optimization of industrial transport in industrial systems [Optimizatsiya promyshlennogo transporta v promyshlennykh sistemakh] // Economics and Mathematical Methods. 1986. Vol. XXII. No. 4. Pp. 697–703. ISSN 0424–7388.
6. Kozlov P. A., Misharin A. S. A two-level model for the management of railroad goods transportation [Dvukhurovnevaya model' upravleniya gruzopotokami na zheleznodorozhnom transporte] // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2002. No. 5. Pp. 136–145. ISSN 0002–3388.
7. Vladimirskaia I. P. Transport systems with adaptive structural technology [Transportnye sistemy s adaptivnoy strukturnoy tekhnologiyey] // Transport of the Urals. 2010. No. 1 (24). Pp. 17–18. ISSN 1815–9400.
8. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S. Theoretical basis of flexible interaction of stations within a transport hub [Teoreticheskie osnovy gibkogo vzaimodeystviya stantsiy v uzle] // Transport of the Urals. 2013. No. 2 (37). Pp. 28–31. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,4 авторских листа



УДК 656.212.5

**Александр Эрнстович Александров**, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» 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,

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

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

## МОДЕЛЬ ОСНОВНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ

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

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

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

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

### Model of marshalling station main processing line

#### Аннотация

Эффективность использования локомотивного и вагонного парков на сети железных дорог во многом определяется качеством планирования составообразования на сортировочных станциях. Автоматизация планирования предполагает использование математических моделей. В статье дано описание оптимизационной потоковой модели основной технологической линии сортировочной станции. Важная особенность этой модели — то, что в ней удалось правильно отобразить режим перемещения потоков на каждой стадии переработки: при подготовке составов к расформированию, при их расформировании, при накоплении вагонов в сортировочном парке, при окончании формирования составов и перестановке их в парк отправления, при подготовке составов к отправлению и при отправлении их со станции. Предполагается, что модель будет использоваться в автоматизированной системе управления и позволит улучшить натуральные и экономические показатели работы сложной транспортной системы.

**Ключевые слова:** сортировочная станция, технологическая линия, ритм накопления составов, управление составообразованием, автоматизация оперативного планирования, математическая модель, линейное программирование, оптимальное решение.

#### Summary

The efficiency of locomotive and car fleets use in the railway system is largely determined by the quality of train sets making up planning at marshalling stations. Automation of planning involves the use of mathematical models. The paper describes the optimization threading model of the marshalling station main processing line. An important feature of this model is that it is able to correctly represent the mode of threads movement at each stage of processing: preparation of train sets for breaking up, breaking up of train sets, accumulation of cars in the sorting yard, making up of train sets and their movement to the departure yard, preparation of train sets for departure and their departure from the station. The model is expected to be used in an automated control system and to improve the natural and economic indices of the complex transportation system.

**Keywords:** marshalling station, processing line, train sets accumulation rhythm, train sets making up control, operational planning automation, mathematical model, linear programming, optimal solution.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-7-12

**П**роблема эффективного использования локомотивного и вагонного парков на сети железных дорог не потеряла свою актуальность и в настоящее время. Вместе с тем в работе сортировочных станций значительные потери возникают при решении вопроса по обеспечению сформированных составов локомотивами и локомотивными бригадами. Причина заключается в неопределенности моментов времени накопления составов и, как следствие, в фактической несогласованности этих моментов с наличием локомотивов и бригад. Возникают длительные интервалы ожидания локомотивами и бригадами составов и наоборот. Поэтому моменты готовности в рейс должны быть увязаны с моментами окончания накопления составов на соответствующие назначения и их готовностью к отправлению.

Ритм накопления составов — основная часть исходных данных для планирования работы локомотивов и локомотивных бригад, и он должен способствовать минимизации простаивающих вагонов в процессе накопления. Важно определить рациональную очередность подготовки составов поездов к расформиро-



ванию и расформирования. В нормальных условиях по технологической линии в первую очередь продвигаются составы поездов, в которых содержится наибольшее количество замыкающих групп вагонов. Такой порядок обеспечивает минимальные простои вагонов в процессе накопления. Замыкающая группа вагонов — это отцеп, который завершает накопление состава определенного назначения в сортировочном парке.

Управление составообразованием на сортировочной станции представляет собой сложную многовариантную задачу. Найти оптимальное решение на основе логических рассуждений и вычислений в ручном режиме невозможно. Автоматизация оперативного планирования предполагает использование математических моделей. В статье дано описание оптимизационной потоковой модели основной технологической линии сортировочной станции. Используется аппарат линейного программирования, а также опыт решения задач, описанных в [1–18].

### ПОДСИСТЕМА «ПАРК ПРИБЫТИЯ — РАСФОРМИРОВАНИЕ»

Пусть в подсистеме имеется  $M$  путей парка прибытия,  $i = 1 \dots M$ , и  $N$  назначений плана формирования,  $j = 1 \dots N$ . Каждое назначение плана формирования может накапливаться как на одном, так и на нескольких путях сортировочного парка. Задачу будем рассматривать на интервале времени  $[0, T]$  с величиной такта, равного горочному технологическому интервалу. Обозначим через  $Q_i(t)$  величину прибывшего на  $i$ -й путь поезда в момент времени  $t$ :

$$Q_i(t) = \begin{cases} \sum_j q_{ij}(t), & \text{если поезд прибыл в момент } t \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases},$$

где  $q_{ij}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения на  $i$ -м пути.

Для описания продвижения потока введем в задачу следующие переменные, отображающие основные этапы технологии обработки вагонопотока в подсистеме:

$x_{ij}^{\text{ото}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, ожидающих осмотра по прибытии на  $i$ -м пути;

$x_{ij}^{\text{то}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, с которыми выполняется осмотр по прибытии на  $i$ -м пути;

$x_{ij}^{\text{оп}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, ожидающих отпуска на  $i$ -м пути;

$x_{ij}^{\text{п}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, с которыми производится отпуск с  $i$ -го пути.

Поскольку каждый этап технологии (кроме простоя под накоплением) состав должен пройти целиком, введем в задачу булевы переменные:

$b_i^{\text{ото}}(t)$  — состав ожидает осмотра по прибытии на  $i$ -м пути,

$$b_i^{\text{ото}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает осмотра;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_i^{\text{то}}(t)$  — состав проходит осмотр по прибытии на  $i$ -м пути,

$$b_i^{\text{то}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав проходит осмотр;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_i^{\text{оп}}(t)$  — состав ожидает расформирования на  $i$ -м пути,

$$b_i^{\text{оп}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает расформирования;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_i^{\text{п}}(t)$  — состав расформируется с  $i$ -го пути;

$$b_i^{\text{п}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав расформируется;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

Для отображения накопления и формирования составов в сортировочном парке для каждого  $j$ -го назначения введем переменные:

$x_j^{\text{н}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения на пути сортировочного парка под накоплением;

$x_j^{\text{ф}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, с которыми производится формирование после завершения накопления;

$b_j^{\text{ф}}(t)$  — состав  $j$ -го назначения формируется,

$$b_j^{\text{ф}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав формируется;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

Схема сети задачи укрупненно представлена на рис. 1.

Обозначим  $c_i(t)$  расходы (затраты) на простой вагонов в парке прибытия, а  $c_j(t)$  — расходы (затраты) на простой вагонов  $j$ -го назначения в сортировочном парке. В общем случае эти расходы могут быть одинаковы, ими может быть, например, приведенная к такту задачи стоимость вагоно-часа простоя на станции.

С другой стороны, изменяя затраты  $c_j(t)$  для разных назначений, мы можем имитировать управляющие решения по ускорению или замедлению продвижения вагонов определенного назначения на станции.

Цель задачи — разработка оптимального режима работы подсистемы «парк прибытия — расформирование», при котором затраты на простои вагонов в парках прибытия и сортировочном будут минимальны. Исходя из этого целевая функция примет вид

$$\begin{aligned} F_1 = & \sum_i \sum_j \sum_t c_i(t) x_{ij}^{\text{ото}}(t) + \sum_i \sum_j \sum_t c_i(t) x_{ij}^{\text{то}}(t) + \\ & + \sum_i \sum_j \sum_t c_i(t) x_{ij}^{\text{оп}}(t) + \sum_i \sum_j \sum_t c_i(t) x_{ij}^{\text{п}}(t) + \\ & + \sum_j \sum_t c_j(t) x_j^{\text{н}}(t) + \sum_j \sum_t c_j(t) x_j^{\text{ф}}(t) \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (1)$$

Задача решается при ограничениях, приведенных ниже.

Основные ограничения строятся на балансовых уравнениях узлов развернутой во времени сети. Важно учесть следующие условия:

состав должен проходить все этапы обработки последовательно;

на каждом этапе состав должен обрабатываться целиком; количество ресурсов технического обслуживания (например, бригад осмотра) может быть ограниченным;

одновременно может выполняться только одно расформирование.

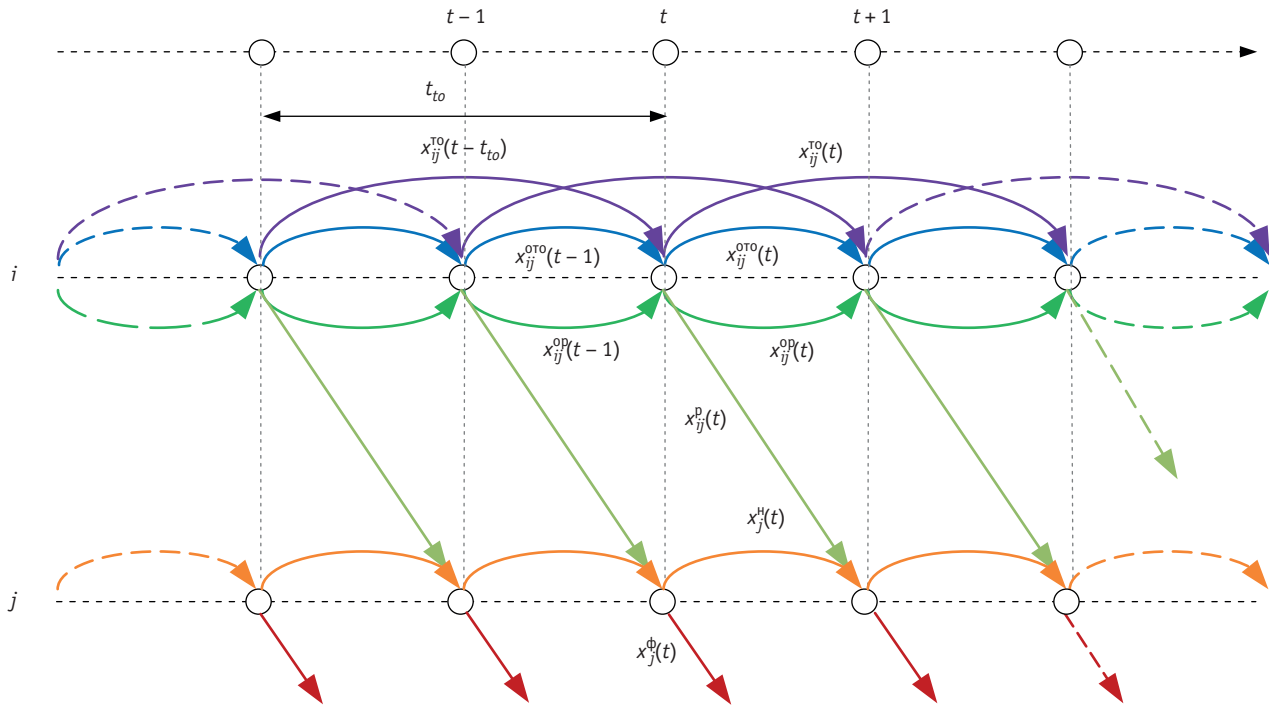


Рис. 1. Схема сети подсистемы «парк прибытия — расформирование»

Ограничения для каждого  $i$ -го пути парка прибытия примут вид:

$$\sum_j x_{ij}^{OTO}(t) + \sum_j x_{ij}^{TO}(t) - \sum_j x_{ij}^{OTO}(t-1) = Q_i(t); \quad (2)$$

$$\sum_j x_{ij}^{OP}(t) + \sum_j x_{ij}^P(t) - \sum_j x_{ij}^{OP}(t-1) - \sum_j x_{ij}^{TO}(t-t_{to}) = 0. \quad (3)$$

Ограничения, необходимые для отображения в задаче обработки состава на каждом этапе целиком:

$$\sum_j x_{ij}^{OTO}(t) - N_i b_i^{OTO}(t) = 0, \quad (4)$$

где  $N_i$  — величина состава на  $i$ -м пути;

$$\sum_j x_{ij}^{TO}(t) - N_i b_i^{TO}(t) = 0; \quad (5)$$

$$\sum_j x_{ij}^{OP}(t) - N_i b_i^{OP}(t) = 0; \quad (6)$$

$$\sum_j x_{ij}^P(t) - N_i b_i^P(t) = 0; \quad (7)$$

$$b_i^{OTO}(t) + b_i^{TO}(t) + b_i^{OP}(t) + b_i^P(t) \leq 1. \quad (8)$$

Ограничения, необходимые для расформирования только одного состава в каждый момент  $t$ :

$$\sum_i b_i^P(t) \leq 1; \quad (9)$$

для выполнения технического обслуживания имеющимся количеством ресурсов (например, бригад осмотра) в каждый момент  $t$  на всех путях парка прибытия:

$$\sum_i b_i^{TO}(t) \leq K^{TO}, \quad (10)$$

где  $K^{TO}$  — количество ресурсов для выполнения технического обслуживания в парке прибытия.

Ограничения на накопление и формирование составов для каждого  $j$ -го назначения:

$$\sum_i x_{ij}^P(t) + x_j^H(t-1) - x_j^H(t) - x_j^\Phi(t) = 0; \quad (11)$$

$$x_j^\Phi(t) - N_j b_j^\Phi(t) = 0; \quad (12)$$

$$x_j^H(t) \leq V_j, \quad (13)$$

где  $N_j$  — величина формируемого состава  $j$ -го назначения;  
 $V_j$  — емкость (вместимость) путей накопления  $j$ -го назначения в сортировочном парке.

Кроме ограничений (2)–(13), на каждую переменную задачи накладывается условие неотрицательности принимаемого значения.

#### ПОДСИСТЕМА «ФОРМИРОВАНИЕ — ОТПРАВЛЕНИЕ»

Пусть в подсистеме имеется  $N$  назначений плана формирования,  $j = 1 \dots N$ , и  $P$  путей парка отправления,  $k = 1 \dots P$ , специализированных для выставки сформированных составов  $j$ -го назначения.

Для отображения основных этапов технологии обработки состава в подсистеме введем в задачу следующие переменные:

$x_j^H(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения на пути сортировочного парка под накоплением;

$x_{jk}^\Phi(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, с которыми выполняются формирование и последующая перестановка на  $k$ -й путь отправления;

$x_{jk}^{\text{ото}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения в ожидании осмотра по отправлению состава на  $k$ -м пути;

$x_{jk}^{\text{то}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, с которыми производится осмотр по отправлению на  $k$ -м пути;

$x_{jk}^{\text{ог}}(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения в ожидании отправления (нитки графика) на  $k$ -м пути.

Поскольку каждый этап обработки (кроме простоя под накоплением) состав должен пройти целиком, введем в задачу булевы переменные:

$b_k^{\text{ото}}(t)$  — состав ожидает осмотра по отправлению на  $k$ -м пути,

$$b_k^{\text{ото}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает осмотра;} \\ 0 & \text{— в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_k^{\text{то}}(t)$  — состав проходит осмотр по отправлению на  $k$ -м пути,

$$b_k^{\text{то}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав проходит осмотр;} \\ 0 & \text{— в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_k^{\text{ог}}(t)$  — состав ожидает отправления (нитки графика) на  $k$ -м пути,

$$b_k^{\text{ог}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает отправления;} \\ 0 & \text{— в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_{jk}^\Phi(t)$  — состав  $j$ -го назначения формируется с последующей перестановкой на  $k$ -й путь отправления,

$$b_{jk}^\Phi(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав формируется;} \\ 0 & \text{— в остальных случаях} \end{cases}.$$

Для отображения отправления поездов по ниткам графика для каждого  $k$ -го пути, на который возможна перестановка составов  $j$ -го назначения, введем переменные:

$x_{jk}^r(t)$  — количество вагонов  $j$ -го назначения, отправляемых по нитке графика с  $k$ -го пути парка отправления в момент времени  $t$ ;

$b_{jk}^r(t)$  — поезд  $j$ -го назначения отправлен с  $k$ -го пути,

$$b_{jk}^r(t) = \begin{cases} 1, & \text{если поезд отправлен;} \\ 0 & \text{— в остальных случаях} \end{cases}.$$

Схема сети задачи укрупненно представлена на рис. 2.

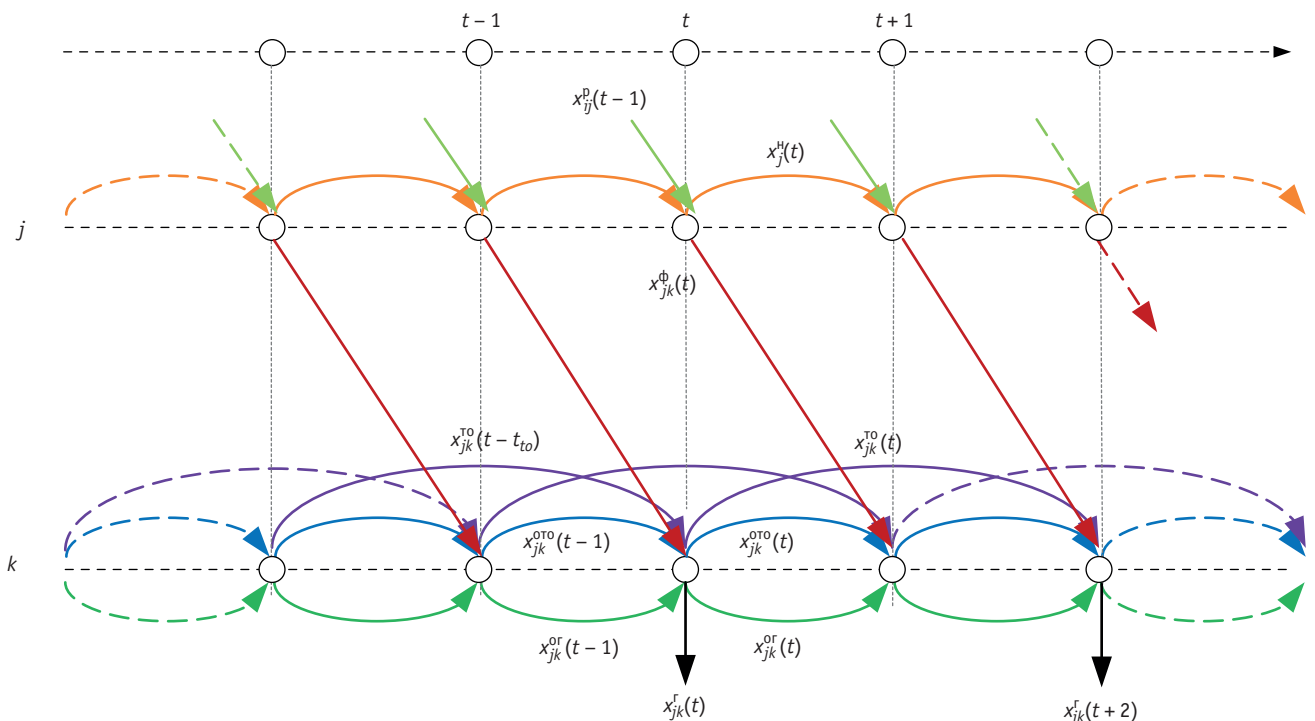


Рис. 2. Схема сети подсистемы «формирование — отправление»

Обозначим  $c_k(t)$  расходы (затраты) на простой вагонов в парке отправления, а  $c_j(t)$  — расходы (затраты) на простой вагонов  $j$ -го назначения в сортировочном парке. В общем случае эти расходы могут быть одинаковы, ими может быть, например, приведенная к такту задачи стоимость вагоно-часа простоя на станции.

Целью задачи будет разработка оптимального режима работы подсистемы «формирование — отправление», при котором затраты на простои вагонов в сортировочном парке и парке отправления минимальны:

$$F_2 = \sum_j \sum_k \sum_t c_k(t) x_{jk}^{\text{ото}}(t) + \sum_j \sum_k \sum_t c_k(t) x_{jk}^{\text{то}}(t) + \sum_j \sum_k \sum_t c_k(t) x_{jk}^{\text{ог}}(t) + \sum_j \sum_t c_j(t) x_j^{\text{н}}(t) + \sum_j \sum_k \sum_t c_j(t) x_{jk}^{\Phi}(t) \rightarrow \min. \quad (14)$$

Основные ограничения строятся на балансовых уравнениях узлов развернутой во времени сети. Важно учесть следующие условия:

состав должен проходить все этапы обработки последовательно;

на каждом этапе состав должен обрабатываться целиком; количество ресурсов технического обслуживания (например, бригад осмотра) может быть ограниченным;

перестановка всего состава должна быть возможна только на один путь парка отправления;

количество путей парка отправления, специализированных для отправления поездов конкретного назначения, может быть ограничено (например, по вместимости пути, возможности отправить поезд конкретного назначения с данного пути и т.п.).

Поскольку в задачу введены пути парка отправления, ограничения (11), (12) на накопление и формирование составов для каждого  $j$ -го назначения примут вид:

$$\sum_i x_{ij}^{\text{п}}(t) + x_j^{\text{н}}(t-1) - x_j^{\text{н}}(t) - \sum_k x_{jk}^{\Phi}(t) = 0; \quad (15)$$

$$x_{jk}^{\Phi}(t) - N_j b_{jk}^{\Phi}(t) = 0, \quad (16)$$

где  $N_j$  — величина сформированного состава  $j$ -го назначения, вагоны.

Остальные ограничения будут такими. Для каждого  $k$ -го пути парка отправления:

$$x_{jk}^{\text{ото}}(t-1) + x_{jk}^{\Phi}(t-1) - x_{jk}^{\text{ото}}(t) = 0; \quad (17)$$

$$x_{jk}^{\text{то}}(t-t_{\text{то}}) + x_{jk}^{\text{ог}}(t-1) - x_{jk}^{\text{ог}}(t) - x_{jk}^{\Gamma}(t) = 0. \quad (18)$$

Следующие ограничения служат для отображения в задаче обработки состава на каждом этапе целиком:

$$x_{jk}^{\text{ото}}(t) - N_j b_k^{\text{ото}}(t) = 0; \quad (19)$$

$$x_{jk}^{\text{то}}(t) - N_j b_k^{\text{то}}(t) = 0; \quad (20)$$

$$x_{jk}^{\text{ог}}(t) - N_j b_k^{\text{ог}}(t) = 0; \quad (21)$$

$$x_{jk}^{\Gamma}(t) - N_j b_{jk}^{\Gamma}(t) = 0; \quad (22)$$

$$b_k^{\text{ото}}(t) + b_k^{\text{то}}(t) + b_k^{\text{ог}}(t) + b_{jk}^{\Gamma}(t) \leq 1. \quad (23)$$

Следующие ограничения необходимы:

для перестановки только одного сформированного состава в каждый момент  $t$  со всех путей накопления на  $k$ -й путь парка отправления

$$\sum_j b_{jk}^{\Phi}(t) \leq 1; \quad (24)$$

выполнения технического обслуживания имеющимся количеством ресурсов (например, бригадами осмотра) в каждый момент  $t$  на всех путях парка отправления

$$\sum_k b_k^{\text{то}}(t) \leq K_0^{\text{то}}, \quad (25)$$

где  $K_0^{\text{то}}$  — количество ресурсов для выполнения технического обслуживания в парке отправления;

соблюдения вместимости пути парка отправления

$$x_{jk}^{\text{ото}}(t) + x_{jk}^{\text{то}}(t) + x_{jk}^{\text{ог}}(t) \leq V_k, \quad (26)$$

где  $V_k$  — емкость (вместимость)  $k$ -го пути парка отправления, вагоны.

Кроме ограничений (15)–(26), на каждую переменную задачи накладывается условие неотрицательности.

Функционал общей модели, описывающий работу основной технологической линии сортировочной станции, будет иметь вид

$$F = F_1 + F_2 \rightarrow \min. \quad (27)$$

В статье дано описание модели основной технологической линии сортировочной станции. Дальнейшая работа предполагает выбор пакета прикладных программ для построения компьютерной расчетной модели достаточно большой размерности, отладку модели по частям в соответствии с описанными моделями подсистем, отладку объединенной модели с использованием исходных данных по реальной станции, верификацию модели, оценку ее практической полезности.



## Литература

1. Форд Л. Р., Фалкерсон Д. Р. Потоки в сетях. М. : Мир, 1966. 276 с.
2. Муртаф Б. Современное линейное программирование. М. : Мир, 1984. 224 с.
3. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. № 3. С. 521–531. ISSN 0424–7388.
4. Козлов П. А., Миловидов С. П. Динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1982. № 1. С. 211–212. ISSN 0002–3388.
5. Блюмин С. Л., Козлов П. А., Миловидов С. П. Динамическая транспортная задача с задержками // Автоматика и телемеханика. 1984. № 25. С. 158–161. ISSN 0005–2310.
6. Александров А. Э., Пермикин В. Ю. Гибкая технология перевозок внутридорожных массовых грузов // Фундаментальные и прикладные исследования — транспорту. Екатеринбург : Изд-во УрГАПС, 1995. Ч. 1. С. 206–207.
7. Александров А. Э., Пермикин В. Ю. Адаптивная технология перевозок внутридорожных массовых грузов на базе метода динамического согласования // Развитие сырьевой базы промышленных предприятий Урала. Магнитогорск : Изд-во МГМА, 1995. С. 225–227.
8. Александров А. Э., Пермикин В. Ю., Фрейберг А. Ю. Расчет параметров блока «сетевой бункер» в системе «МОДУС» // Фундаментальные и прикладные исследования — транспорту — 96. Екатеринбург : Изд-во УрГАПС, 1996. Ч. 1. С. 78–79.
9. Александров А. Э., Шавзис С. С. Модель расчета оптимальной укрупненной структуры узла // Математическое программирование и приложения. 1999. № 8. С. 16–17.
10. Александров А. Э., Якушев Н. В. Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления // Управление большими системами. 2006. № 12–13. С. 5–14. ISSN 1819–2440.
11. Александров А. Э. Математическая модель в автоматизированной системе управления согласованной доставкой грузов // Транспорт: наука, техника, управление. 2006. № 11. С. 37–39. ISSN 0236–1914.
12. Козлов П. А., Владимирская И. П. Построение систем автоматизированного управления потоками вагонов разных собственников // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 6. С. 8–11. ISSN 2223–9731.
13. Козлов П. А., Владимирская И. П., Тушин Н. А. Модель оптимизации управления парками вагонов разных собственников // Вестник РГУПС. 2010. № 3 (39). С. 93–98. ISSN 0201–727X.
14. Козлов П. А., Владимирская И. П. Метод оптимизации структуры транспортной системы // Мир транспорта. 2009. Т. 7. № 2 (26). С. 84–87. ISSN 1992–3252.
15. Козлов П. А., Осокин О. В., Тушин Н. А. Организационные подходы и модели оптимизации // Мир транспорта. 2011. Т. 9. № 5 (38). С. 18–23. ISSN 1992–3252.
16. Колокольников В. С., Пермикин В. Ю. Активизация динамических резервов в транспортном узле за счет гибкого взаимодействия // Инновационный транспорт. 2013. № 2 (8). С. 67–70. ISSN 2311–164X.
17. Тимухина Е. Н., Окулов Н. Е. Оптимальный подвод грузов при наличии случайных факторов : матер. X Междунар. науч.-практ. конф. «Aktualni vymozenosti vedy — 2014». Прага : Education and Science, 2014. Т. 16. Технологии. С. 46–49.
18. Александров А. Э., Тимухина Е. Н., Ковалев И. А. Оптимизационная модель перевозочного процесса с использованием кольцевых маршрутов // Транспорт Урала. 2017. № 4 (55). С. 36–39. DOI: 10.20291/1815–9400–2017–4–36–39. ISSN 1815–9400.

## References

1. Ford L. R., Fulkerson D. R. Flows in networks [Potoki v setyakh]. Moscow : World, 1966. 276 p.
2. Murtagh B. Modern linear programming [Sovremennoe lineynoe programmirovaniye]. Moscow : World, 1984. 224 p.
3. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Optimization of transport flows structure in flow dynamics at the priority of consumers [Optimizatsiya struktury transportnykh potokov v dinamike pri prioritete potrebiteley] // Economics and Mathematical Methods. 1982. Vol. XVIII. No. 3. Pp. 521–531. ISSN 0424–7388.
4. Kozlov P. A., Milovidov S. P. The dynamic transportation problem with delays in the network statement [Dinamicheskaya transportnaya zadacha s zaderzhkami v setevoy postanovke] // Soviet Journal of Computer and Systems Sciences. 1982. No. 1. Pp. 211–212. ISSN 0002–3388.
5. Blyumin S. L., Kozlov P. A., Milovidov S. P. A dynamic transportation problem with delays [Dinamicheskaya transportnaya zadacha s zaderzhkami] // Automation and Remote Control. 1984. No. 25. Pp. 158–161. ISSN 0005–2310.
6. Aleksandrov A. E., Permikin V. Yu. Flexible technology for mass transportation [Gibkaya tekhnologiya perevozok vnutridorozhnykh massovykh gruzov] // Fundamental and applied research for transport. Ekaterinburg : Publishing House of USART, 1995. Part 1. Pp. 206–207.
7. Aleksandrov A. E., Permikin V. Yu. Adaptive technology for mass transportation on basis of dynamic coordination method [Adaptivnaya tekhnologiya perevozok vnutridorozhnykh massovykh gruzov na baze metoda dinamicheskogo soglasovaniya] // Development of raw materials base for industrial enterprises of the Urals. Magnitogorsk : Publishing House of NMSAMM, 1995. Pp. 225–227.
8. Aleksandrov A. E., Permikin V. Yu., Freyberg A. Yu. Calculation of «net bunker» parameters in system «MODUS» [Raschet parametrov bloka «setevoy bunker» v sisteme «MODUS»] // Fundamental and applied research for transport — 96. Ekaterinburg : Publishing House of USART, 1996. Part 1. Pp. 78–79.
9. Aleksandrov A. E., Shavzis S. S. Model for calculating the optimal aggregate structure of the node [Model' rascheta optimal'noy ukрупnennoy struktury uzla] // Mathematical programming and applications. 1999. No. 8. Pp. 16–17.
10. Aleksandrov A. E., Yakushev N. V. Stochastic formulation of the dynamic transportation problem with delays with the random variation in the time of delivery and time consumption [Stokhasticheskaya postanovka dinamicheskoy transportnoy zadachi s zaderzhkami s uchedom sluchaynogo razbrosa vremeni dostavki i vremeni potrebleniya] // Large-Scale Systems Control. 2006. No. 12–13. Pp. 5–14. ISSN 1819–2440.
11. Aleksandrov A. E. The mathematical model in the automated control system of the coordinated delivery of cargoes [Matematicheskaya model' v avtomatizirovannoy sisteme upravleniya soglasovannoy dostavkoy gruzov] // Transport. Science, equipment, management. 2006. No. 11. Pp. 37–39. ISSN 0236–1914.
12. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. Forming-up systems of automated management of different owner's car flows [Postroenie sistem avtomatizirovannogo upravleniya potokami vagonov raznykh sobstvennikov] // Vestnik VNIIZhT. 2009. No. 6. Pp. 8–11. ISSN 2223–9731.
13. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P., Tushin N. A. The model for control optimization of different freight cars owners [Model' optimizatsii upravleniya parkami vagonov raznykh sobstvennikov] // Vestnik RGUPS. 2010. No. 3 (39). Pp. 93–98. ISSN 0201–727X.
14. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. A method of optimization of structure of transport system [Metod optimizatsii struktury transportnoy sistemy] // World of Transport and Transportation. 2009. Vol. 7. No. 2 (26). Pp. 84–87. ISSN 1992–3252.
15. Kozlov P. A., Osokin O. V., Tushin N. A. Organizational approach and optimization models [Organizatsionnye podkhody i modeli optimizatsii] // World of Transport and Transportation. 2011. Vol. 9. No. 5 (38). Pp. 18–23. ISSN 1992–3252.
16. Kolokolnikov V. S., Permikin V. Yu. Activation of dynamic reserves in transport hub through flexible interaction [Aktivizatsiya dinamicheskikh rezervov v transportnom uzle za schet gibkogo vzaimodeystviya] // Inntrans. 2013. No. 2 (8). Pp. 67–70. ISSN 2311–164X.
17. Timukhina E. N., Okulov N. E. Optimal supply of cargo in the presence of random factors [Optimal'nyy podvod gruzov pri nalichii sluchaynykh faktorov] : proceedings of the X International scientific-practical conference «Aktualni vymozenosti vedy — 2014». Prague : Publishing House «Education and Science». 2014. Vol. 16. Technology. P. 46–49.
18. Alexandrov A. E., Kovalev I. A., Timukhina E. N. Optimization model of the transportation process with the use of unit trains [Optimizatsionnaya model' perevoznogo protsessa s ispol'zovaniem kol'tsevykh marshrutov] // Transport of the Urals. 2017. No. 4 (55). Pp. 36–39. DOI: 10.20291/1815–9400–2017–4–36–39. ISSN 1815–9400.

**Александр Валериевич Мартыненко**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), старший научный сотрудник Центра развития и размещения производительных сил Института экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УрО РАН), Екатеринбург, Россия,

**Михаил Борисович Петров**, доктор технических наук, руководитель Центра развития и размещения производительных сил Института экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УрО РАН), профессор кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## МАКРОАНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА В СТРАНАХ ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ И ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

**Alexander Valerievich Martynenko**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Senior Researcher, Productive Forces Development and Placement Centre, Institute of Economics, the Ural branch of Russian Academy of Sciences (IE UB RAS), Ekaterinburg, Russia,

**Mikhail Borisovich Petrov**, DSc in Engineering, Head of Productive Forces Development and Placement Centre, Institute of Economics, the Ural branch of Russian Academy of Sciences (IE UB RAS), Professor, Transport Economics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

## Macroanalysis of high-speed transport development in Western Europe and Eastern Asia

### Аннотация

В течение нескольких последних десятилетий высокоскоростные магистрали активно строятся в ряде стран Западной Европы и Восточной Азии, где пользуются значительным и быстрорастущим спросом и оказывают существенное влияние на экономическую и социальную сферу. Организация высокоскоростного движения способствует росту ВВП через загрузку различных отраслей экономики и создание новых рабочих мест, позволяет успешно решать урбанизационные проблемы и задает дополнительные векторы развития территорий, через которые проходят высокоскоростные линии. Влияние высокоскоростного транспорта на развитие регионов зависит от того, какое место в структуре пассажирских перевозок он занимает и каков характер его взаимодействия с остальными видами транспорта. При этом особенность высокоскоростных магистралей состоит в значительно индуцированном пассажиропопотоке и переключении пассажиров с других видов транспорта.

В связи с активным обсуждением проектов по организации высокоскоростного движения в России весьма актуально всестороннее изучение опыта, накопленного за рубежом. В статье представлен макроуровневый сравнительный анализ высокоскоростного транспорта в странах Западной Европы и Восточной Азии. На основе показателей пассажирооборота и макроэкономических данных установлена относительная эффективность высокоскоростных магистралей и выявлены основные тенденции их развития.

**Ключевые слова:** высокоскоростная магистраль (ВСМ), высокоскоростной транспорт, пассажирооборот ВСМ, ВСМ в Европе, ВСМ в Азии.

### Summary

High-speed transport, which is actively developed in a number of countries in Western Europe and East Asia, enjoys significant and rapidly growing demand and has a significant impact on the economic and social development of these countries. The development of high-speed transport contributes to the growth of GDP through the loading of various sectors of the economy and the creation of new jobs, and also allows to successfully solve various urbanization problems and sets additional vectors for the development of territories through which high-speed lines pass. The impact of high-speed transport on the development of a territory depends on what place it occupies in the structure of passenger transportation and what character its interaction with other types of transport has. At the same time, the feature of high-speed transport is a significant induced passenger traffic and passenger switching from other types of transport.

In connection with the active discussion of the implementation of projects for the creation of high-speed transport in Russia, the issue of a comprehensive analysis of the development of this type of transport in other countries is highly relevant. In this paper, a macro-level comparative analysis of the development of high-speed transport in the countries of Western Europe and Eastern Asia is carried out. Based on the passenger turnover of various types of land transport and the macroeconomic data of these countries, the relative efficiency of high-speed transport has been established and the main trends of its development have been identified.

**Keywords:** high-speed rail, high-speed transport, passenger traffic of high-speed rail, high-speed rail in Europe, high-speed rail in Asia.

## ВВЕДЕНИЕ

Несколько последних десятилетий характеризуются бурным развитием высокоскоростного транспорта. Например, в Европе первые высокоскоростные магистрали (ВСМ) были построены в начале 1980-х гг. во Франции и Италии. Немного позже, в 1988 г., высокоскоростное пассажирское движение появилось в Германии. Наконец, в 1990-е гг. к созданию национальной сети ВСМ приступила Испания. В настоящее время каждая из этих стран располагает хорошо развитыми линиями ВСМ, охватывающими почти все крупные города [1].

В Восточной Азии высокоскоростное движение особенно развито в Японии, Южной Корее и Китае. В частности, первая в мире ВСМ была построена в Японии еще в 1964 г. К моменту появления высокоскоростного транспорта в Европе японские ВСМ имели протяженность почти 2000 км, пользовались очень активным спросом среди населения и позволяли эффективно решать транспортные проблемы, связанные с растущим уровнем урбанизации. Собственно говоря, успешный опыт Японии послужил стимулом и примером для строительства ВСМ в Европе. Развитие ВСМ в Южной Корее и Китае началось гораздо позже — в начале 2000-х гг. Однако Китай очень быстро стал мировым лидером по протяженности ВСМ, и к 2017 г. там было построено ВСМ больше, чем во всех остальных странах, вместе взятых [2].

Высокоскоростной транспорт обладает целым рядом неоспоримых преимуществ, в частности, при пассажирских перевозках на расстояния 200–800 км он более быстрый, удобный, безопасный и экологичный по сравнению с автомобильным и авиационным [3, 4]. В то же время следует отметить и его основные недостатки — очень высокую стоимость и длительный период окупаемости, что делает этот вид транспорта малоинтересным для частного капитала. Соответственно во всех перечисленных выше странах источником финансирования и собственником ВСМ является государство [3, 5]. В отличие от частного бизнеса, для государства выгоды от ВСМ не сводятся только к прямым поступлениям от продажи билетов — развитие высокоскоростного транспорта создает значительные косвенные эффекты как для регионов, через которые проходят ВСМ, так и для экономики страны в целом.

Вопросу оценки величины косвенных эффектов от развития ВСМ посвящены многие исследования [например, 6, 7]. В частности, установлено, что строительство ВСМ не только способствует росту ВВП через загрузку ряда отраслей экономики (таких как машиностроение, металлургия, производство строительных материалов и т.д.) и создание новых рабочих мест, но и представляет собой мощный инструмент регионального развития. Как показывают проведенные исследования, города, связанные ВСМ, начинают развиваться опережающими темпами [8]. При этом влияние высокоскоростного транспорта на территории зависит от того, какое место в структуре пассажирских перевозок он занимает. Естественно, территория будет испытывать стимулирующее воздействие ВСМ только в том случае, если высокоскоростные перевозки станут занимать значительную часть рынка пассажирских перевозок и тем самым существенно влиять на транспортные возможности региона.

Высокоскоростной транспорт, взаимодействуя и конкурируя с автомобильным, авиационным и железнодорожным, оказывает воздействие на объемы осуществляемых ими пассажирских перевозок. Причем это влияние не сводится только к перераспределению существующих пассажиропотоков — эксплуатация ВСМ характеризуется значительным индуцированным спросом, а также высоким уровнем взаимосвязи с другими видами транспорта.

Успешная реализация обсуждаемых в настоящее время проектов, связанных с организацией высокоскоростного движения в России [9–11], требует всестороннего анализа опыта, накопленного за рубежом. В частности, весьма актуален вопрос о взаимосвязи между макроэкономическими показателями и развитием ВСМ, а также о влиянии ВСМ на пассажирские перевозки различными видами транспорта. В настоящей работе анализируются макроэкономические показатели и данные по объему и структуре пассажирских перевозок наземным транспортом в странах с развитыми сетями ВСМ и на основе проведенного анализа устанавливаются некоторые качественные зависимости.

## СРАВНЕНИЕ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И УРОВНЯ РАЗВИТИЯ ВСМ

Как уже было отмечено, абсолютным мировым лидером по протяженности ВСМ является Китай. Он же опережает все остальные страны, вместе взятые, и по уровню пассажирооборота (табл. 1).

Таблица 1

Макроэкономические характеристики и показатели ВСМ (2016 г.)

Страна	Население, тыс. чел.	Номинальный ВВП, млрд долл. США	Длина ВСМ, км	Пассажирооборот ВСМ, млрд пкм
Германия	82176	3489	1475	27,2
Франция	64605	2379	2158	49,1
Испания	46446	1240	2938	15,1
Италия	60666	1898	981	12,8
Корея	51246	1424	657	16,3
Япония	126995	4907	3041	98,6
Китай	1344100	10743	23914	464,1

В то же время абсолютные показатели не полностью отражают уровень развития и эффективности ВСМ. Если учитывать численность населения и размеры экономики, то картина станет несколько иной. Обратимся к данным табл. 2, где приведены показатели, характеризующие, с одной стороны, протяженность сети ВСМ относительно населения и номинального ВВП, а с другой — пассажирооборот на душу населения (показатель ВСМ-подвижности населения) и на единицу длины ВСМ (среднее значение напряженности пассажиропотока).

Таблица 2

Сравнение стран  
по относительным характеристикам ВСМ (2016 г.)

Страна	Длина ВСМ		Пассажирооборот	
	на душу населения, км/млн чел.	относительно ВВП, км/млрд долл. США	на душу населения, км	на единицу длины ВСМ, млн пасс.
Германия	17,9	0,42	331	18,4
Франция	33,4	0,91	760	22,8
Испания	63,3	2,37	325	5,1
Италия	16,2	0,52	211	13,0
Корея	12,8	0,46	318	24,8
Япония	23,9	0,62	776	32,4
Китай	17,8	2,23	345	19,4

Итак, как следует из табл. 2, самой развитой сетью ВСМ относительно численности населения обладает Испания, и ее превосходство над остальными странами весьма значительно — она в два раза опережает даже Францию, занимающую второе место. При этом Китай имеет показатель, близкий по величине к показателям Германии и Италии. Что касается протяженности ВСМ относительно ВВП, то здесь резко выделяются Испания и Китай с почти одинаковыми показателями, существенно более высокими, чем в остальных странах.

Относительные характеристики пассажирооборота (см. табл. 2) отражают востребованность и уровень использования сети ВСМ. Так, по пассажирообороту ВСМ на душу населения лидируют Япония и Франция с очень близкими показателями, в то время как все остальные страны имеют более чем в два раза меньшие показатели. По величине пассажирооборота на единицу длины ВСМ очень сильно отличается Испания — ее показатель значительно меньше, чем у других стран, и резко контрастирует с тем, что испанская сеть ВСМ имеет самую большую длину на душу населения.

Поскольку представленные в табл. 2 данные, характеризующие протяженность ВСМ, можно интерпретировать как степень развитости (уровень затрат) ВСМ, а характеризующие пассажирооборот — как уровень востребованности и эффективности, то сравнение позиций, которые занимают страны друг относительно друга по каждому показателю, позволит на качественном уровне оценить эффективность затрат на ВСМ. Для этого разобьем значения каждого показателя на три кластера (табл. 3), которые условно назовем высоким, средним и низким (будем использовать метод к-средних).

Данные табл. 3 не позволяют сделать однозначных выводов об эффективности ВСМ в Германии, Франции, Италии и Китае. Однако для оценки эффективности ВСМ остальных стран выбранный макроуровневый подход является вполне достаточным. В частности, Япония и Корея, несомненно, располагают самыми эффективными ВСМ (при среднем и низком уровне относительных показателей длины ВСМ эти страны имеют высокий и средний уровни относительных показателей пассажирооборота).

Таблица 3

Кластеры показателей

Страна	Длина ВСМ		Пассажирооборот	
	на душу населения, км/млн чел.	относительно ВВП, км/млрд долл. США	на душу населения, км	на единицу длины ВСМ, млн пасс.
Германия	Средний	Низкий	Средний	Средний
Франция	Высокий	Средний	Высокий	Средний
Испания	Высокий	Высокий	Средний	Низкий
Италия	Средний	Средний	Низкий	Низкий
Корея	Низкий	Низкий	Средний	Средний
Япония	Средний	Средний	Высокий	Высокий
Китай	Средний	Высокий	Средний	Средний

А наименее эффективной сетью ВСМ обладает Испания, где высокий уровень развития ВСМ явно дисгармонирует со средними и низкими относительными показателями пассажирооборота.

#### СРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ ПАССАЖИРООБОРОТА ВСМ

Наряду с анализом макроэкономических аспектов рассмотрим динамику пассажирооборота ВСМ. Как видно из рис. 1, где представлены графики изменения объема пассажирооборота с 2010 по 2016 г., за этот период весьма существенно (почти в 10 раз) вырос пассажирооборот ВСМ в Китае, достигнув в 2016 г. величины 464,1 млрд пкм. Для сравнения: у следующей за Китаем по этому показателю Японии пассажирооборот в 2016 г. составил 98,6 млрд пкм.

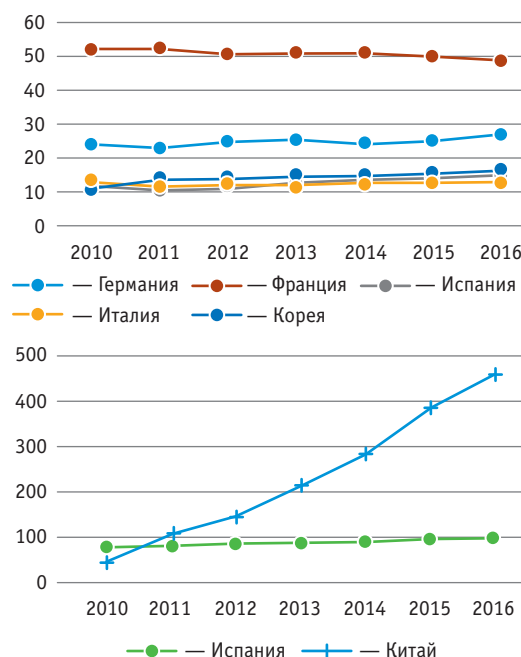


Рис. 1. Пассажирыоборот ВСМ, млрд пкм



В целом из графиков, представленных на рис. 1, видно, что наряду с резким ростом в Китае пассажирооборот ВСМ в других странах увеличивался небольшими темпами, а во Франции даже наблюдалось его снижение. Аналогичная картина характерна и для структурных показателей пассажирооборота (рис. 2 и 3).

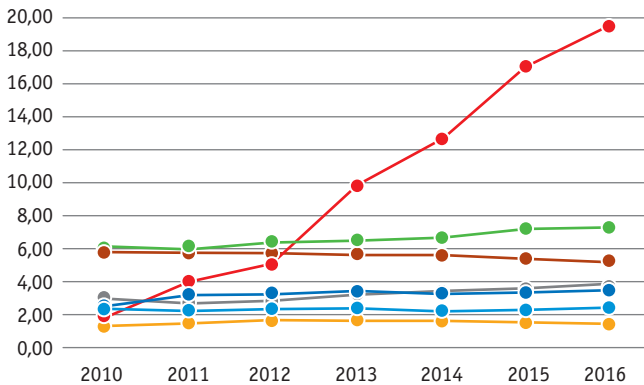


Рис. 2. Доля ВСМ в пассажирообороте наземного транспорта, %:

— Германия; — Франция; — Испания;  
— Италия; — Корея; — Япония; — Китай

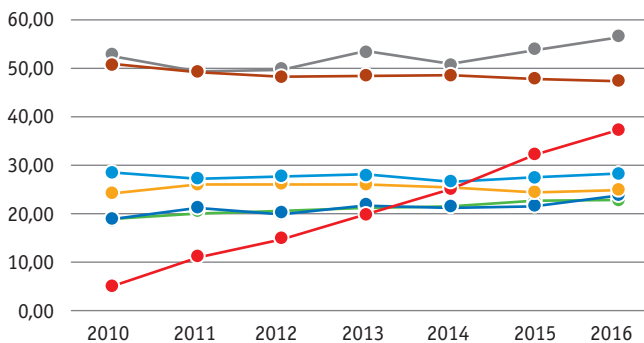


Рис. 3. Доля ВСМ в пассажирообороте железнодорожного транспорта, %:

— Германия; — Франция; — Испания;  
— Италия; — Корея; — Япония; — Китай

Как видно из рис. 2 и 3, показатели Китая демонстрируют стремительный рост, что говорит об опережающем развитии ВСМ по сравнению с другими видами транспорта. При этом обращает на себя внимание тот факт, что Китай не занимает лидирующие позиции по доле ВСМ в пассажирообороте железнодорожного транспорта, уступая Франции и Испании. Что касается высоких значений данного показателя во Франции и Испании, они обусловлены, с одной стороны, тем, что здесь имеются разветвленные сети ВСМ, соединяющие все крупные города, а с другой — что в силу небольшой (по сравнению с Китаем) территории этих стран расстояния между городами лежат в диапазоне конкурентных преимуществ ВСМ и оставляют гораздо меньше возможностей для использования обычного пассажирского железнодорожного сообщения.

Во всех странах, кроме Китая, доля ВСМ в пассажирообороте железнодорожного и наземного транспорта на протяже-

нии рассматриваемого периода менялась слабо, тем не менее происходившие изменения носили устойчивый характер. Чтобы сравнить динамику представленных показателей, вычислим для каждого из них средний годовой прирост (табл. 4).

Таблица 4

Средний годовой прирост показателей работы ВСМ за 2010–2016 гг.

Страна	Средний годовой прирост			
	пассажиро- оборота ВСМ, млрд пкм	доли ВСМ (%) в пассажирообороте		протя- женности ВСМ, км
		наземного транспорта	железнодорож- ного транспорта	
Германия	0,55	0,00	0,02	33,8
Франция	–0,47	–0,58	–0,11	43,7
Испания	0,57	0,75	0,16	136,7
Италия	0,20	0,08	0,02	9,7
Корея	0,88	0,80	0,19	40,8
Япония	3,62	0,57	0,25	84,5
Китай	69,63	5,35	2,93	3130,2

В настоящей работе ограничимся качественным анализом данных табл. 4 и будем исходить из того, что рост пассажирооборота ВСМ обусловлен следующими факторами:

- ростом подвижности населения;
- переключением на ВСМ пассажиропотоков с других видов транспорта;
- индуцированием дополнительного пассажиропотока (те пассажиры ВСМ, которые не совершили бы поездку другим видом транспорта при отсутствии ВСМ).

Если все три фактора оказывают существенное влияние на пассажирооборот ВСМ, это приводит не только к его росту, но и к увеличению доли в пассажирообороте наземного транспорта. Соответственно увеличение доли ВСМ в пассажирообороте железнодорожного транспорта свидетельствует о переключении пассажиропотоков с обычного железнодорожного на высокоскоростной транспорт. Если пассажирооборот ВСМ растет, но без увеличения его доли в наземном (железнодорожном) транспорте, можно утверждать, что это происходит только за счет роста подвижности населения.

Данные, приведенные в табл. 4, достаточно хорошо раскрывают особенности развития ВСМ за период 2010–2016 гг. В частности, для Германии и Италии характерен умеренный положительный прирост пассажирооборота при практически неизменной структуре распределения пассажиропотоков между разными видами наземного транспорта. То незначительное увеличение доли ВСМ в пассажирообороте наземного и железнодорожного транспорта, которое все-таки имеется в этих странах, можно полностью объяснить некоторым приростом протяженности ВСМ. Таким образом, рост пассажирооборота ВСМ Германии и Италии происходит только лишь за счет ро-

ста подвижности населения, поскольку потенциал переключения и индуцирования пассажиропотоков в этих странах был, по всей видимости, полностью исчерпан в прошлом — в период активного ввода в строй новых ВСМ.

Единственная из всех анализируемых стран, в которой пассажирооборот ВСМ снизился, — это Франция. Причем помимо собственно пассажирооборота ВСМ сократилась также его доля в пассажирообороте и наземного, и железнодорожного транспорта. Если к тому же принять во внимание, что в рассматриваемый период во Франции строились новые ВСМ (прирост протяженности составил в среднем 43,7 км/год), то данные табл. 4 однозначно свидетельствуют о существенном снижении спроса на пассажирские перевозки высокоскоростным транспортом и переключение пассажиропотоков на другие виды транспорта. По всей видимости, это является следствием очень активного развития каршеринга (краткосрочной аренды автомобилей) и дерегуляции рынка автобусных перевозок [13].

Корея и Испания демонстрируют достаточно близкую динамику пассажирооборота ВСМ. Здесь наблюдается рост пассажирооборота и существенное изменение структуры рынка пассажирских перевозок, что свидетельствует о значительном индуцированном спросе и переключении пассажиропотоков с других видов транспорта на ВСМ. Вместе с тем необходимо отметить, что, несмотря на близкие значения структурных показателей пассажирооборота обеих стран, в Корее прирост протяженности ВСМ существенно меньше. Это значит, что в Корее более высокий уровень индуцирования и переключения пассажиропотока на ВСМ, чем в Испании.

В Японии, так же как в Испании и Корее, развитие ВСМ характеризуется значительным индуцированным пассажиропотоком и его переключением с других видов транспорта, а больший прирост пассажирооборота обусловлен тем, что численность населения Японии существенно выше, чем в Испании и Корее.

Особое место, как видно из табл. 4, занимает Китай, все показатели которого на порядок выше, чем в остальных странах. При этом значительное превосходство Китая по пассажирообо-

роту и длине ВСМ полностью объясняется численностью населения. Однако столь высокий прирост доли ВСМ в пассажирообороте наземного и железнодорожного транспорта свидетельствует о значительном индуцированном спросе и масштабном переключении пассажиропотоков с других видов транспорта. Таким образом, ВСМ Китая не только самые протяженные в мире, но и качественно отличаются своим положением на рынке наземных пассажирских перевозок.

Отметим, что более точный количественный анализ динамики пассажирооборота ВСМ можно выполнить на основе методов, предложенных в [12], при наличии данных по пассажирообороту на каждой высокоскоростной линии.

## ВЫВОДЫ

Проведенный макроанализ показал, что, несмотря на огромное превосходство Китая по абсолютным показателям пассажирооборота и протяженности ВСМ, наиболее развитой сетью ВСМ относительно численности населения и размера экономики обладает Испания, а наибольший пассажирооборот на душу населения имеют Япония и Франция.

С точки зрения соотношения длины ВСМ и величины пассажирооборота с учетом численности населения и размера экономики наиболее эффективными сетями ВСМ обладают Япония и Корея, а наименее эффективной — Испания, так как в этой стране низкие относительные показатели пассажирооборота резко контрастируют с высоким уровнем развития ВСМ.

Анализ динамики пассажирооборота ВСМ показал, что в Китае, Японии, Корее и Испании наблюдается его устойчивый рост, обусловленный увеличением подвижности населения, индуцированным спросом и переключением пассажиропотоков с других видов транспорта. В то же время в Германии и Италии прирост пассажирооборота ВСМ связан только с увеличением подвижности населения. Что касается Франции, то там отмечается снижение пассажирооборота ВСМ, вызванное развитием автомобильных и автобусных перевозок.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 17-08-01123.*

## Литература

1. Мартыненко А. В., Петров М. Б. Влияние особенностей размещения населения на развитие ВСМ в Европе // Мир транспорта. 2018. № 1 (74). С. 118–135. ISSN 1992–3252.
2. High speed lines in the world (Summary) // International Union of Railways [Электронный ресурс]. URL: [https://uic.org/IMG/pdf/20180612a\\_high\\_speed\\_lines\\_in\\_the\\_world](https://uic.org/IMG/pdf/20180612a_high_speed_lines_in_the_world) (дата обращения: 04.10.2018).
3. Thompson L. S., Tanaka Y. High Speed Rail Passenger Service: World Experience and U.S. Applications // Thompson, Galenson and Associates [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tgaassoc.com/documents/final-version-hsr-corrected-9-20-11.pdf> (дата обращения: 04.10.2018).
4. High speed rail 2018 // International Union of Railways [Электронный ресурс]. URL: [https://uic.org/IMG/pdf/uic\\_high\\_speed\\_2018\\_ph08\\_web.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/uic_high_speed_2018_ph08_web.pdf) (дата обращения: 04.10.2018).

## References

1. Martynenko A. V., Petrov M. B. Impact of settlements on development of HSR in European countries [Vliyaniye osobennostey razmeshheniya naseleniya na razvitiye VSM v Evrope] // World of Transport and Transportation. 2018. No. 1 (74). Pp. 118–135. ISSN 1992–3252.
2. High speed lines in the world (Summary) // International Union of Railways [Electronic resource]. URL: [https://uic.org/IMG/pdf/20180612a\\_high\\_speed\\_lines\\_in\\_the\\_world](https://uic.org/IMG/pdf/20180612a_high_speed_lines_in_the_world) (access date: 04.10.2018).
3. Thompson L. S., Tanaka Y. High Speed Rail Passenger Service: World Experience and U. S. Applications // Thompson, Galenson and Associates [Electronic resource]. URL: <http://www.tgaassoc.com/documents/final-version-hsr-corrected-9-20-11.pdf> (access date: 04.10.2018).
4. High speed rail 2018 // International Union of Railways [Electronic resource]. URL: [https://uic.org/IMG/pdf/uic\\_high\\_speed\\_2018\\_ph08\\_web.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/uic_high_speed_2018_ph08_web.pdf) (access date: 04.10.2018).

5. Feigenbaum B. High-Speed Rail in Europe and Asia: Lessons for the United States // Reason Foundation [Электронный ресурс]. URL: <http://reason.org/news/show/high-speed-rail-in-europe-and-asia> (дата обращения: 04.10.2018).
6. Boqué J. R. High Speed Rail Projects: Economic Evaluation, Decision-making and Financing. Master's Thesis. Dresden : Technische Universität, 2012. 120 p.
7. Economic Analysis of High Speed Rail in Europe / Ed. by Ginés de Rus. Bilbao : BBVA Foundation, 2012. 138 p.
8. High Speed Rail as a tool for regional development. Paris : International Union of Railways — Railway Technical Publications, 2011. 180 p.
9. Мишарин А. С. Высокоскоростной железнодорожный транспорт как ключевой фактор развития транспортной системы России // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 2 (57). С. 7–10. ISSN 1994–831X.
10. Мишарин А. С. Высокоскоростные магистрали — артерии российского гигаполиса // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 2–3 (63)–(64). С. 7–10. ISSN 1994–831X.
11. Мартыненко А. В. Сравнительный анализ размещения населения в зонах прохождения ВСМ Москва — Казань и ВСМ европейских стран // Инновационный транспорт. 2017. № 4 (26). С. 20–25. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-4-20-25. ISSN 2311–164X.
12. Timofeeva G., Martynenko A. Analysis of transport network development via probabilistic modelling // Proceedings of 14<sup>th</sup> International Conference «Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems» (Pyatnitskiy's Conference) (STAB). Moscow, 2018. Pp. 1–2 [Электронный ресурс]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8408407&isnumber=8408327> (дата обращения: 04.10.2018).
13. The French passenger rail transport market // Arafer [Электронный ресурс]. URL: <http://www.arafer.fr/wp-content/uploads/2018/01/bilan-ferroviaire-2015-2016-version-anglaise.pdf> (дата обращения: 04.10.2018).
5. Feigenbaum B. High-Speed Rail in Europe and Asia: Lessons for the United States // Reason Foundation [Electronic resource]. URL: <http://reason.org/news/show/high-speed-rail-in-europe-and-asia> (access date: 04.10.2018).
6. Boqué J. R. High Speed Rail Projects: Economic Evaluation, Decision-making and Financing. Master's Thesis. Dresden : Technische Universität, 2012. 120 p.
7. Economic Analysis of High Speed Rail in Europe / Ed. by Ginés de Rus. Bilbao : BBVA Foundation, 2012. 138 p.
8. High Speed Rail as a tool for regional development. Paris : International Union of Railways — Railway Technical Publications, 2011. 180 p.
9. Misharin A. S. High-speed rail transport as a key factor in development of Russia's transport system [Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport kak klyuchevoy faktor razvitiya transportnoy sistemy Rossii] // Transport of the Russian Federation. 2015. No. 2 (57). Pp. 7–10. ISSN 1994–831X.
10. Misharin A. S. High-speed railways as the traffic arteries of a Russian giga-metropolis [Vysokoskorostnye magistrali — arterii rossiyского gigapolisa] // Transport of the Russian Federation. 2016. No. 2–3 (63)–(64). Pp. 7–10. ISSN 1994–831X.
11. Martynenko A. V. The comparative analysis of placing of the population in zones of passage HSR Moscow — Kazan and HSR the European countries [Sravnitel'nyy analiz razmeshheniya nasele-niya v zonakh prokhozhdeniya VSM Moskva — Kazan' i VSM evropeyskikh stran] // Innotrans. 2017. No. 4 (26). Pp. 20–25. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-4-20-25. ISSN 2311–164X.
12. Timofeeva G., Martynenko A. Analysis of transport network development via probabilistic modelling // Proceedings of 14<sup>th</sup> International Conference «Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems» (Pyatnitskiy's Conference) (STAB). Moscow, 2018. Pp. 1–2 [Electronic resource]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8408407&isnumber=8408327> (access date: 04.10.2018).
13. The French passenger rail transport market // Arafer [Electronic resource]. URL: <http://www.arafer.fr/wp-content/uploads/2018/01/bilan-ferroviaire-2015-2016-version-anglaise.pdf> (access date: 04.10.2018).

Объем статьи 0,7 авторских листа

УДК 629.367

**Алексей Александрович Абызов, доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия,**

**Игорь Яковлевич Березин, доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ В УСЛОВИЯХ ДВИЖЕНИЯ ПО ТРУДНОПРОХОДИМОЙ МЕСТНОСТИ

**Alexey Alexandrovich Abyzov, DSc in Engineering, Professor, Engineering Mechanics Department, South Ural State University (National Research University) (SUSU), Chelyabinsk, Russia,**

**Igor Yakovlevich Berezin, DSc in Engineering, Professor, Engineering Mechanics Department, South Ural State University (National Research University) (SUSU), Chelyabinsk, Russia**

### Modeling of the process of changing the speed of a fast-way tracked vehicle under the conditions of movement on the difficult situation

#### Аннотация

В статье предложена методика определения функции изменения скорости быстроходной гусеничной машины при движении по трассе. На каждом участке скорость принимается максимально возможной при выполнении ряда ограничений. Ее предельные значения для рассматриваемой машины устанавливаются с помощью математического моделирования. Характеристики участков определяются на основе описания трассы. Функция изменения скорости может применяться при компьютерном моделировании движения машины по трассе и оценке средней скорости движения.

Приведен пример реализации методики для быстроходной машины класса 10 т. Полученная функция изменения скорости сопоставлена с результатами натурного эксперимента. Различие расчетных и экспериментальных данных по средним значениям и среднеквадратическому отклонению не превышает 10 %.

**Ключевые слова:** гусеничная машина, математическая модель, скорость движения, надежность, характеристики трассы.

#### Summary

A method for determining the function of changing the speed of a high-speed tracked vehicle while driving on a track is proposed. At each section of the route, the speed of movement is taken as high as possible, at which a number of restrictions are fulfilled. The speed limits for the machine in question are determined using mathematical modeling. The characteristics of the sections of the track are determined on the basis of its description. The function of changing the speed can be used in computer modeling of the movement of the car on the highway and to estimate the average speed of movement.

An example of the implementation of the methodology for a high-speed machine class of 10 tons. The obtained function of changing the speed is compared with the results of a full-scale experiment. The difference between the calculated and experimental data on mean values and standard deviations does not exceed 10 %.

**Keywords:** tracked vehicle, mathematical model, speed, reliability, characteristics of the track.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-19-22

При создании новых образцов транспортных машин эксплуатационные характеристики, а также характеристики надежности ответственных элементов задаются при разработке технического задания. В связи с этим возникает необходимость использовать такие расчетные методы, которые позволяют прогнозировать основные показатели машины на ранних этапах проектирования. Применительно к быстроходным гусеничным машинам методы расчетной оценки долговечности элементов ходовой системы включают компьютерное моделирование движения машины для условий, максимально соответствующих реальной эксплуатации [1]. Путем численного интегрирования уравнений движения моделируют процессы изменения обобщенных координат, а затем — процессы изменения нагрузок, действующих в динамической системе, и процессы изменения напряжений в опасных зонах исследуемых деталей. Расчетные оценки ресурса деталей получают с помощью моделей накопления усталостных и износных повреждений.

При моделировании движения машин в условиях необустроенной местности обязателен учет переменного характера скорости. Например, использование в процессе моделирования средней скорости движения приводит к 1,5-кратному отклонению результатов от экспериментальных данных, соответствующих режиму естественного вождения. Таким образом, разработка метода определения функции изменения скорости, соответствующей заданным условиям движения по трассе и динамическим характеристикам машины, является актуальной задачей. При этом, в частности, может быть получена одна из важнейших характеристик транспортной машины — средняя скорость движения по трассе.



Сегодня используются различные подходы к определению процесса изменения скорости движения гусеничной машины. Например, оценке скорости движения при криволинейном движении посвящена работа [2], в [3] предложен статистический подход, позволяющий прогнозировать скорость движения машины при помощи характеристик трассы. Настоящая статья посвящена развитию методики [4], предполагающей определение функции изменения скорости на основе моделирования действий водителя по управлению машиной при движении по трассе. Приведен пример использования методики при моделировании движения машины по участку трассы, сопоставлены результаты расчетного процесса изменения скорости и экспериментальные данные.

Рассматриваемый подход предполагает, что в результате управляющих действий водителя функция изменения скорости машины приводится в соответствие с дорожными условиями. При этом на каждом участке трассы скорость должна быть максимально возможной, при которой выполняются ограничения по ускорениям на месте водителя, по тяговой динамике при преодолении подъемов, по заносу машины на криволинейных участках траектории и ограничения, связанные с физиологическими возможностями водителя по оценке дорожной ситуации и управлению машиной. В качестве исходных данных используются картографические описания типовых трасс, для которых предполагается моделирование движения машины. Подобные описания составлены как для отечественных трасс, так и для зарубежных испытательных полигонов [5–8]. Они содержат информацию о характеристиках грунта, углах спусков и подъемов, характеристиках микропрофиля поверхности, радиусах и протяженности криволинейных участков и др. При реализации методики в соответствии с описанием проводится разбиение трассы на характерные участки, на каждом из которых условия движения (характеристики грунта, углы подъема-спуска, микропрофиль трассы, кривизна траектории) остаются постоянными. В работе [9] протяженность таких участков и характеристики трассы на каждом из них предлагается «разыгрывать» случайным образом в соответствии со статистическими характеристиками трассы. В отличие от этого предлагаемый метод предусматривает разбиение трассы на участки исходя из анализа ее описания. Для получения предельных значений скорости движения по каждому из перечисленных ограничений проводятся предварительные расчетные исследования с помощью математической модели [1].

Реализация методики рассмотрена на примере быстроходной гусеничной машины класса 10 т. Описание фрагмента трассы, а также процессы изменения ряда кинематических и силовых параметров при движении машины получены в ходе экспериментальных исследований кафедры «Гусеничные машины» Курганского государственного университета [10].

Рассмотрим ограничения скорости движения по основным критериям, полученные для исследуемой машины.

При движении по участкам с регулярным микропрофилем, а также при преодолении одиночных препятствий среднеквадратические и пиковые значения ускорений на месте водителя не должны превышать предельных величин, установ-

ленных нормативными документами. На участках трассы, не имеющих одиночных препятствий, микропрофиль поверхности рассматривается как стационарная случайная функция. В соответствии с принятыми подходами при описании трассы микропрофиль каждого из участков относят к одному из пяти типов: тип I — практически ровная дорога, а тип V — наиболее сложный. На трассе имеются участки с микропрофилями II, III, IV и V типов, их фрагменты представлены на рис. 1, а числовые характеристики (средняя высота  $H_{\text{ср}}$  и длина неровностей  $L_{\text{ср}}$ ) приведены в табл. 1. Путем расчетных экспериментов для каждого из них определена максимальная скорость движения, при которой среднеквадратическое отклонение вертикальных ускорений на месте водителя не превышает 0,4g (см. табл. 1).

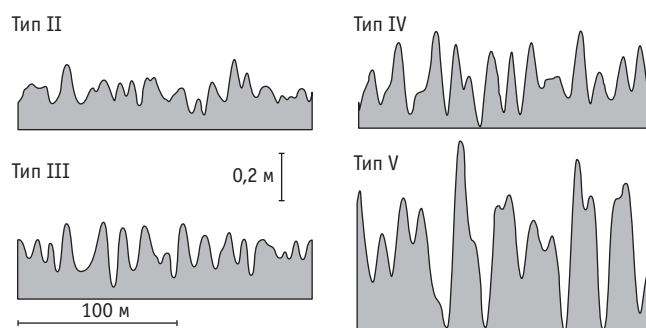


Рис. 1. Фрагменты микропрофилей типовых участков трассы

Таблица 1

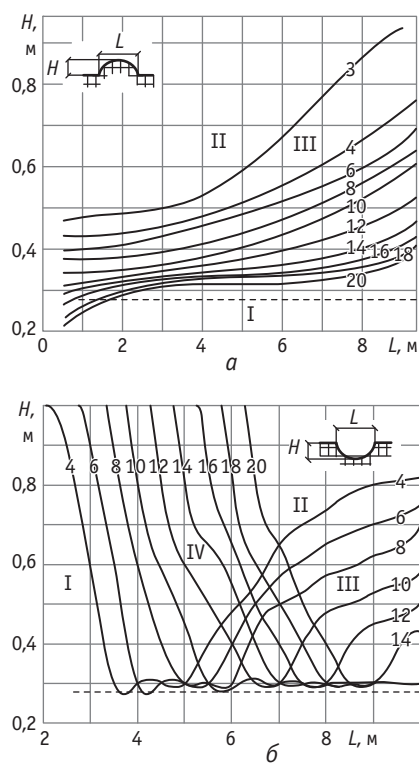
Характеристики типовых микропрофилей трассы

Тип микропрофиля	Средняя высота неровности $H_{\text{ср}}$ , см	Средняя длина неровности $L_{\text{ср}}$ , м	Максимальная скорость движения $V_{\text{max}}$ , м/с
II	10	4,8	Без ограничения
III	12	10,9	12
IV	19	11,6	5,3
V	41	15,5	2

В качестве одиночных препятствий рассматриваются неровности, для преодоления которых водитель вынужден дополнительно снижать скорость движения. При этом ограничением служит пиковое значение ускорения на месте водителя, которое не должно превышать 3g. Результаты, полученные при моделировании переезда неровностей типа выпуклостей и впадин различной длины  $L$  и высоты  $H$ , представлены на рис. 2.

При преодолении неровностей типа «выступ» для снижения перегрузок скорость необходимо снижать (рис. 2а). Для преодоления «впадины» (рис. 2б) при некоторых сочетаниях  $L$  и  $H$  можно использовать два способа — на высокой («перепрыгивание») или на низкой скорости («переползание»).

Один из основных факторов, который ограничивает скорость движения гусеничной машины по трассе, — занос при



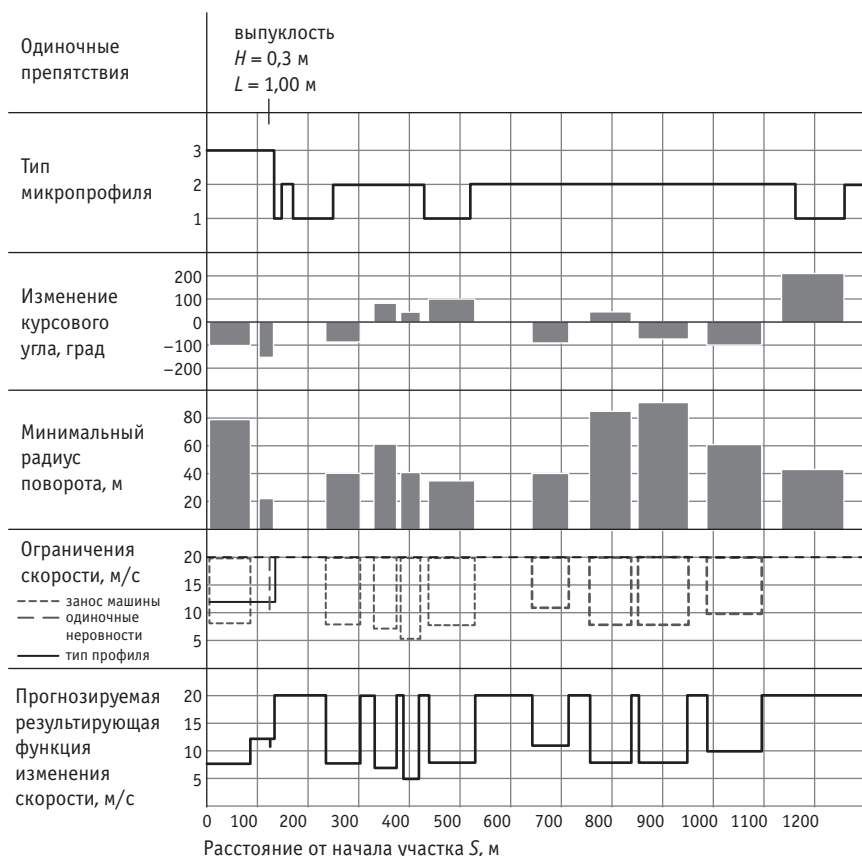
**Рис. 2. Ограничения скорости при преодолении одиночных препятствий, м/с:** зона I — ограничений скорости нет; зона II — преодоление невозможно без превышения нормативов; зоны III и IV — преодоление возможно на ограниченной скорости

преодоления криволинейных участков. Рассматриваемая машина оборудована планетарным механизмом поворота. При преодолении криволинейных участков большого радиуса водитель производит несколько включений фиксированных радиусов, в эти моменты машина движется по малому радиусу, и вероятно возникновение заносов. Для их исключения скорость необходимо дополнительно снижать относительно рекомендованного значения:

$$V_r = 1 + B\sqrt{gR\mu_{\max}} / (2R),$$

где  $B$  — ширина колеи машины;  
 $g$  — ускорение свободного падения;  
 $R$  — радиус поворота;  
 $\mu_{\max}$  — коэффициент сопротивления повороту.

В связи с отмеченной особенностью для моделирования движения на каждом из криволинейных участков трассы



**Рис. 3. Описание фрагмента трассы и прогнозируемая функция изменения скорости движения**

программу включения механизмов поворота, а также значения скорости движения, при которой исключается занос, необходимо определять на основе расчетных исследований [1, 11].

При преодолении подъемов скорость движения машины (номер включенной передачи) определяется на основе характеристик моторно-трансмиссионной установки.

На рис. 3 представлено описание фрагмента трассы. Он включает криволинейные участки различной протяженности и радиуса, фрагменты с микропрофилями трех типов, а также препятствие в виде выпуклости. Также на рис. 3 приведены ограничения скорости по рассматриваемым критериям и результирующая (прогнозируемая) функция изменения скорости. На основе этой функции с учетом характеристик моторно-трансмиссионной установки и физиологических возможностей водителя сформиро-

ваны программы управления двигателем, трансмиссией и механизмом поворота, использованные при компьютерном моделировании движения машины [1].

Результаты моделирования движения машины по данному фрагменту трассы и процесс изменения скорости, зафиксированный в ходе натурного эксперимента, представлены на рис. 4.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ представленных данных показывает, что среднее значение и среднеквадратическое отклонение расчетного и экспериментального процессов изменения скорости не превышает 10 %. Поскольку при натурных испытаниях процесс управления машиной, а следовательно, и скорость движения зависят от индивидуальных особенностей конкретного водителя, такой результат является вполне удовлетворительным. Влияние индивидуальных особенностей

водителей на скорость движения при необходимости может быть учтено путем использования метода статистических испытаний, предполагающего многократное повторение расчетов с внесением случайных поправок в программу управления силовой установкой и последующую статистическую обработку результатов. Предложенная методика может быть эффективно использована при моделировании движения машин по трассе для определения средней скорости движения, а также для расчетной оценки нагруженности и долговечности элементов ходовой системы и силовой установки [1].

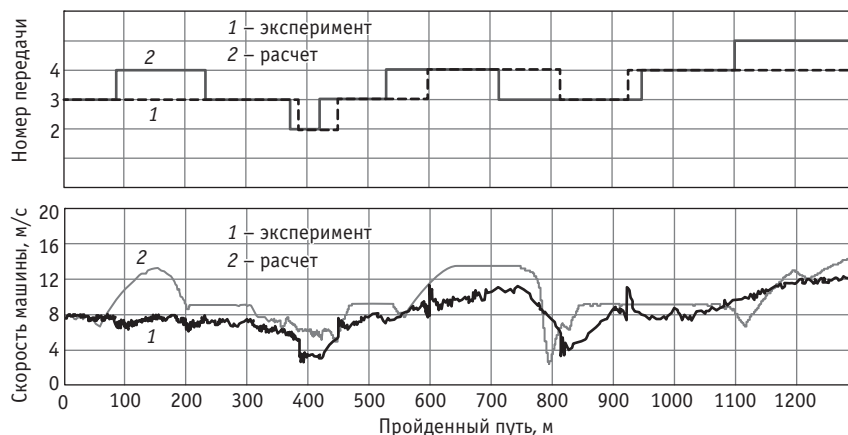


Рис. 4. Результаты моделирования движения

## Литература

- Березин И. Я., Абызов А. А. Моделирование процесса эксплуатации при имитационных ресурсных испытаниях мобильной техники // Техника и технологии строительства и эксплуатации автомобильных дорог : сб. науч. тр. М. : Изд-во МАДИ, 2000. С. 56–74.
- Прогнозирование подвижности быстроходных гусеничных машин при криволинейном движении / В. Б. Держанский, И. А. Наумов, В. Н. Тараторкин, Е. Б. Сарач // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. : Машиностроение. 2008. № 2 (71). С. 76–96. ISSN 0236–3941.
- Савочкин В. А., Дмитриев А. А. Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин. М. : Машиностроение, 1993. 320 с.
- Березин И. Я., Будинский С. Ю., Усольцев П. В. Регулирование скорости в задаче моделирования движения транспортной машины по случайному профилю // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин : сб. науч. тр. Челябинск : ЧПИ, 1985. С. 118–121.
- Desert terrain characterization of landforms and surface materials within vehicle test courses at U.S. Army Yuma Proving Ground, USA / S. N. Bacon, E. V. McDonald, S. E. Baker, et al. // Journal of Terramechanics. 2008. No. 45. Pp. 167–183.
- Affleck R. T., Melloh R. A., Schoop S. A. Cross-country mobility on various snow conditions for validation of a virtual terrain // Journal of Terramechanics. 2009. No. 46. Pp. 203–210.
- Bekker M. G. Theory of land locomotion. University of Michigan Press, 1956. 522 p.
- Wong J. Y. Theory of ground vehicles / 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons, 2001. 528 p.
- Котиев Г. О. Прогнозирование эксплуатационных свойств систем поддрессирования военных машин : автореф. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 36 с.
- Автоматизированный измерительно-регистрирующий комплекс для исследования нагрузочных режимов гусеничных машин / В. В. Болотов, Л. Б. Чернов, И. А. Шалаева и др. // Автоматизированные системы управления технологическими процессами и роботизации в машиностроении. Курган, 1981. С. 204–208.
- Абызов А. А., Березин И. Я. Моделирование процесса взаимодействия опорной поверхности гусеницы с грунтом при криволинейном движении быстроходной машины // Современное состояние и инновации транспортного комплекса : матер. междунар. науч.-техн. конф. Пермь : Изд-во ПГТУ, 2008. С. 106–111.

## References

- Berezin I. Ya., Abyzov A. A. Simulation of the operation process at simulation resource tests of mobile equipment [Modelirovanie protsessa ekspluatatsii pri imitatsionnykh resursnykh ispytaniyakh mobil'noy tekhniki] // Technique and technology of construction and operation of roads : proceedings. Moscow : Publishing House of MADI, 2000. Pp. 56–74.
- Prediction of mobility of high-speed caterpillars in curvilinear motion [Prognostirovanie podvizhnosti bystrokhodnykh gusenichnykh mashin pri krivoliniyem dvizhenii] / V. B. Derzhanskii, I. A. Naumov, V. N. Taratorkin, Ye. B. Sarach // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering. 2008. No. 2 (71). Pp. 76–96. ISSN 0236–3941.
- Savochkin V. A., Dmitriev A. A. Statistical dynamics of transport and traction tracked vehicles [Statisticheskaya dinamika transportnykh i tyagovykh gusenichnykh mashin]. Moscow : Mashinostroyeniye, 1993. 320 p.
- Berezin I. Ya., Budinskiy S. Yu., Usoltsev P. V. Speed regulation in the task of modeling of the movement of a transport vehicle along a random profile [Regulirovanie skorosti v zadache modelirovaniya dvizheniya transportnoy mashiny po sluchaynomu profilu] // Investigation of power plants and chassis of transport and traction machines : proceedings. Chelyabinsk : ChPI, 1985. Pp. 118–121.
- Desert terrain characterization of landforms and surface materials within vehicle test courses at U.S. Army Yuma Proving Ground, USA / S. N. Bacon, E. V. McDonald, S. E. Baker, et al. // Journal of Terramechanics. 2008. No. 45. Pp. 167–183.
- Affleck R. T., Melloh R. A., Schoop S. A. Cross-country mobility on various snow conditions for validation of a virtual terrain // Journal of Terramechanics. 2009. No. 46. Pp. 203–210.
- Bekker M. G. Theory of land locomotion. University of Michigan Press, 1956. 522 p.
- Wong J. Y. Theory of ground vehicles / 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons, 2001. 528 p.
- Kotiev G. O. Prediction of operational properties of the suspension systems of military vehicles [Prognostirovanie ekspluatatsionnykh svoystv sistem podressirovaniya voennykh mashin] : Synopsis of DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2000. 36 p.
- Automated measuring-recording complex for studying load conditions of tracked vehicles [Avtomatizirovanny izmeritel'no-registriruyushchiy kompleks dlya issledovaniya nagruzochnykh rezhimov gusenichnykh mashin] / V. V. Bolotov, L. B. Chernov, I. A. Shalaeva, et al. // Automated control systems for technological processes and robotization in mechanical engineering. Kurgan, 1981. Pp. 204–208.
- Abyzov A. A., Berezin I. Ya. Modeling the process of interaction of the support surface of the caterpillar with the ground during the curvilinear movement of a high-speed machine [Modelirovanie protsessa vzaimodeystviya opornoy poverkhnosti gusenitsy s gruntom pri krivoliniyem dvizhenii bystrokhodnoy mashiny] // Current state and innovations of the transport complex: materials of the International scientific and technical conference. Perm : Publishing House of PSTU, 2008. Pp. 106–111.

Объем статьи 0,54 авторских листа

УДК 621.398:656.34

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

**Евгений Александрович Стрекаловский**, начальник отдела новой техники и ведения технической политики Службы технического развития метрополитена, ГУП «Петербургский метрополитен», Санкт-Петербург, Россия,

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

## АНАЛИЗ И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ RFID-НАВИГАЦИИ В УСЛОВИЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА

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

**Evgeniy Alexandrovich Strekalovskiy**, Head of New Technology and Technical Policy Department, Metro Technical Development Division, SUE St. Petersburg Metroliten, St. Petersburg, Russia,

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

### Analysis and increase of RFID-navigation accuracy in metro conditions

#### Аннотация

Возрастающий интерес к повышению точности определения текущей координаты подвижных средств метрополитена обусловлен совершенствованием систем автоведения и устройств скоростного контроля характеристик линейных объектов. В статье в качестве эффективного метода повышения точности позиционирования подвижных средств предложено использовать RFID-навигацию, которая включает колесный датчик меры пройденного пути и multifunctional RFID-метки, содержащие в памяти точную координату места их установки вдоль пути.

Авторами проанализированы факторы, влияющие на характеристики точности позиционирования подвижных средств, и разработана математическая модель, позволяющая оценить погрешности их позиционирования.

Согласно результатам исследований, точность RFID-навигации достаточна для решения большинства задач метрополитена. Для особых случаев (например, для калибровки меры датчика пройденного пути) предложены меры, которые дают возможность дополнительно повысить навигационную точность.

**Ключевые слова:** RFID, RFID-навигация, повышение точности, время сканирования метки, система бесконтактной привязки к пути, нормальный закон распределения.

#### Summary

The increasing interest in improving the accuracy of vehicles current position determination is connected with the improvement of auto-driving systems and devices for high-speed control of line objects characteristic. The paper proposes to use RFID-navigation because it is an effective method for improving the accuracy of vehicles positioning that includes a wheel sensor for distance measurement and multifunctional RFID-tags containing in memory the exact coordinate of their installation site along the track.

The authors analyzed the factors that affect the characteristics of vehicles positioning accuracy and developed a mathematical model that allowed estimating the positioning error.

According to the research results, the accuracy of RFID-navigation is sufficient to solve the majority of metro problems. For special cases (in example, to calibrate the sensor for distance measurement), the authors offered measures that enable to additionally improve the navigation accuracy.

**Keywords:** RFID, RFID-navigation, accuracy increase, tag scanning time, system of contactless referencing to track, normal distribution law.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-23-27

#### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития метрополитена актуализируется вопрос совершенствования навигации (привязки к координатам пути) систем автоведения поездов, устройств скоростного контроля характеристик линейных объектов: элементов пути (положение ниток путей в плане и профиле), объектов СЦБ и связи (мониторинг уровней сигналов в рельсовых цепях, характеристик электромагнитных полей), систем электроснабжения (например, обнаружение опасной тепловой эмиссии на соединениях токопроводов).

Обычно для привязки к пути пассажирских поездов и контрольно-диагностических вагонов в метрополитене используется колесный датчик, в основу которого положена линейная мера  $m$  (эквивалент линейного перемещения подвижной единицы между двумя смежными импульсами, полученными от колесного датчика во времени). Но у колесного датчика есть очевидные недостатки: износ поверхности катания колес приводит к систематической погрешности при решении задачи привязки, а неконтролируемые проскальзывания колес в кривых и при торможении, нестационарность радиусов колес в точках контактирования «колесо — рельс» при колебаниях колесной пары в осевом направлении вызывают появление случайной погрешности.



С целью автоматического устранения систематической погрешности может быть применен метод калибровки меры колесного датчика. Для этого достаточно установить две смежные RFID-метки на точно измеренном в единицах системы СИ расстоянии (или использовать имеющиеся многофункциональные RFID-метки с измерением точного расстояния между ними), выполнить на этом участке подсчет числа импульсов  $n$  от момента обнаружения вагоном первой до момента обнаружения второй по ходу движения метки и вычислить меру

$$m = \frac{\kappa_2 - \kappa_1}{n},$$

где  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  — линейные метрические координаты первой и второй по ходу движения меток соответственно.

Эта мера  $m$ , представленная в единицах системы СИ, автоматически устраняет систематическую ошибку, связанную с износом колеса либо с плановой обточкой его поверхности катания.

Чтобы исключить накопление случайных ошибок, имеет смысл использовать связь с многофункциональными RFID-метками, которые являются частью системы бесконтактной привязки к пути (СБПП) и установлены, в частности, на всех линиях ГУП «Петербургский метрополитен», с записанными в их память линейными метрическими координатами [1, 2].

Однако эффективность калибровки меры колесного датчика и обнуления накопленных погрешностей напрямую зависит от точности привязки к координатам пути подвижных единиц, использующих RFID-технологии. Поэтому исследование точности позиционирования носителя приемопередатчика (головного вагона поезда, диагностического вагона) относительно напольных RFID-меток (в дальнейшем — меток), в памяти которых содержатся координаты их места установки, является актуальной задачей.

## ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМА ЕЕ РЕШЕНИЯ

При разработке системы бесконтактной привязки к пути ввиду ограниченности предлагаемых рынком решений были выбраны приемопередатчики (иначе — ридеры) с технологическими паузами в сканировании меток [1–3].

Ридерам этого типа для запуска требуется внешний управляющий сигнал, включающий в себя время сканирования меток, причем время сканирования выбирается в некотором ограниченном диапазоне значений. После получения команды на запуск ридер ищет метку до возникновения одного из двух возможных событий: либо метка успешно считывается, либо по истечении времени сканирования успешного считывания не происходит. При любом варианте дальнейший поиск прекращается, а результаты передаются на вагонный контроллер. Для продолжения сканирования требуется повторный запуск ридера. Как показала практика эксплуатации, при таком алгоритме взаимодействия ридера с меткой наблюдались случаи пропуска меток при разрешенных скоростях движения [4], что понижало надежность работы СБПП.

Наши исследования этой проблемы привели к убеждению, что один из способов повышения надежности считыва-

ния меток — переход на современные ридеры с непрерывным сканированием [4]. Таким ридерам не требуются внешние управляющие команды на повторный запуск сканирования меток: после команды на запуск ридер не прекращает сканирование до тех пор, пока не получает команды на принудительную остановку; в случае обнаружения метки сканирование не прекращается.

У ридеров с непрерывным сканированием процесс привязки поездов метрополитена к координатам пути предполагается следующим образом.

1. Ридер непрерывно излучает сканирующий сигнал, представляющий собой циклическую последовательность запросов к меткам и ожиданий от них ответов. Продолжительность цикла не превышает нескольких миллисекунд.

2. Каждая метка имеет некоторую зону радиовидимости, зависящую от множества параметров — уровня сигнала, излучаемого ридером, затухания в ридер-антенном тракте, коэффициента усиления антенны, параметров самой метки [1, 5]. При попадании антенны ридера в зону радиовидимости метки становится возможным обмен информацией между ридером и меткой. Следует заметить, что ширина зоны радиовидимости меток — случайная величина, распределенная по нормальному закону со средним выборочным 215 см и среднеквадратическим отклонением 2 см, при этом характерна симметричность зоны радиовидимости метки относительно места ее установки.

3. При получении в зоне радиовидимости запроса от ридера метка отвечает на него в течение нескольких секунд согласно протоколу Gen2 [6–9]. После обнаружения метки ридер инициирует считывание с нее служебной информации, в том числе сведения о координате места ее установки. Так как время, затрачиваемое на считывание служебной информации с метки, не равно нулю, при наезде антенны ридера с некоторой скоростью на зону радиовидимости метки последняя будет считана на некотором расстоянии после начала ее зоны радиовидимости. Очевидно, с ростом скорости это расстояние будет увеличиваться.

4. После завершения считывания служебной информации ридер передает результаты вагонному контроллеру СБПП для дальнейшей обработки, по окончании которой поезду присваивается новая координата. Время, затрачиваемое на обработку и информационный обмен между ридером и вагонным контроллером, не превышает нескольких миллисекунд.

Введем понятие «время считывания метки» и условимся понимать под ним интервал времени от момента попадания антенны ридера в зону радиовидимости метки до момента получения с нее служебной информации вагонным контроллером.

Согласно стендовым экспериментам, время считывания метки — случайная величина, распределенная по нормальному закону со средним выборочным 40 мс и со среднеквадратическим отклонением 5 мс. Наблюдаемые результаты объясняются следующим: при слабом сигнале в пограничной зоне радиовидимости подтверждаются не все передачи — необходимы повторные циклы связи; причина этого заключается в асинхронности циклов сканирования меток и момента наезда антенны ридера на зону радиовидимости метки.

На основе приведенного алгоритма привязки к координатам пути носителей ридеров с непрерывным сканированием (поездов) рассмотрим, как зависит точность привязки от их скорости, разброса зоны радиовидимости меток и времени считывания. Решение будем искать с помощью математического моделирования.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТОЧНОСТИ RFID-НАВИГАЦИИ

Введем исходные условия.

1. Примем координаты установки меток на пути известными с нулевой ошибкой (эти координаты пути записаны в память меток).

2. Будем рассматривать поезд как материальную точку, сконцентрированную в центре RFID-антенны.

3. Примем скорость движения поезда неизменной в зоне радиовидимости метки и условимся, что ее вектор направлен в сторону увеличения координаты пути.

Введем обозначения:  $l$  — ширина зоны радиовидимости метки, м (случайная величина, имеющая нормальный закон распределения со средним выборочным 2,15 м и среднеквадратическим отклонением 0,02 м);  $v$  — скорость поезда при проезде зоны радиовидимости метки, м/с;  $t_{сч}$  — время считывания метки, с (случайная величина, распределенная по нормальному закону со средним выборочным 0,04 с и среднеквадратическим отклонением 0,005 с);  $x_m$  — координата метки, записанная в ее памяти, м;  $x_{сч}$  — координата поезда в момент первого считывания метки, м.

Тогда с учетом введенных условий и обозначений фактическая координата поезда в момент присвоения ему координаты метки может быть вычислена как функция от скорости:

$$x_{сч}(v) = x_m - \frac{l}{2} + t_{сч} \cdot v,$$

где  $x_m - l/2$  — координата начала зоны радиовидимости метки,  $l/2$  обусловлена свойством симметричности зоны радиовидимости.

Координата поезда в момент считывания метки соответствует сумме координаты начала зоны радиовидимости метки и пройденного поездом пути за время считывания метки относительно начала зоны ее радиовидимости.

Найдем разницу между координатой поезда в момент считывания метки и координатой, записанной в метке:

$$\Delta x(v) = x_m - x_{сч}(v) = -\frac{l}{2} + t_{сч} \cdot v. \quad (1)$$

Очевидно, что величина  $\Delta x(v)$  является случайной, так как представляет собой результат суммы двух других случайных величин: половины зоны радиовидимости метки ( $l/2$ ) и расстояния, пройденного поездом за время считывания метки ( $t_{сч} \cdot v$ ). При этом распределение  $\Delta x(v)$  подчинено нормальному закону, поскольку сумма двух нормально распределенных случайных величин также имеет нормальное распределение [10–12]. Для определения параметров полученного распределения обратимся к теории вероятностей [10].

Известно, что при умножении некоторой случайной величины  $x$  на константу  $a$  математическое ожидание полученной случайной величины  $a \cdot x$  определяется как

$$M[a \cdot x] = a \cdot M[x]. \quad (2)$$

С учетом выражения (2) и определения дисперсии становится возможным получить дисперсию случайной величины  $a \cdot x$ :

$$\begin{aligned} D[a \cdot x] &= \\ &= M[(a \cdot x - M[a \cdot x])^2] = M[(a \cdot x - a \cdot M[x])^2] = \\ &= M[\{a \cdot (x - M[x])\}^2] = M[a^2 \cdot (x - M[x])^2] = \\ &= a^2 \cdot M[(x - M[x])^2] = a^2 \cdot D[x] = a^2 \cdot \sigma_x^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, согласно выражениям (1)–(3), параметры распределения случайной величины  $\Delta x(v)$  могут быть вычислены следующим образом:

$$\mu_{\Delta x}(v) = -\frac{\mu_l}{2} + v \cdot \mu_{t_{сч}},$$

где  $\mu_l$  — среднее выборочное ширины зоны радиовидимости меток;

$\mu_{t_{сч}}$  — среднее выборочное времени считывания меток;

$$\sigma_{\Delta x(v)}^2 = v^2 \cdot \sigma_{t_{сч}}^2 + \frac{\sigma_l^2}{4},$$

где  $\sigma_{t_{сч}}^2$  — выборочная дисперсия времени считывания меток;

$\sigma_l^2$  — выборочная дисперсия ширины зоны радиовидимости меток.

Рассмотрим полученные результаты подробнее.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

С помощью рассмотренных выше формул получено семейство плотностей распределения  $\Delta x(v)$  — разницы между координатой поезда в момент считывания метки и координатой, записанной в ее памяти, в зависимости от скорости движения поезда в зоне радиовидимости метки. Результаты представлены на рис. 1.

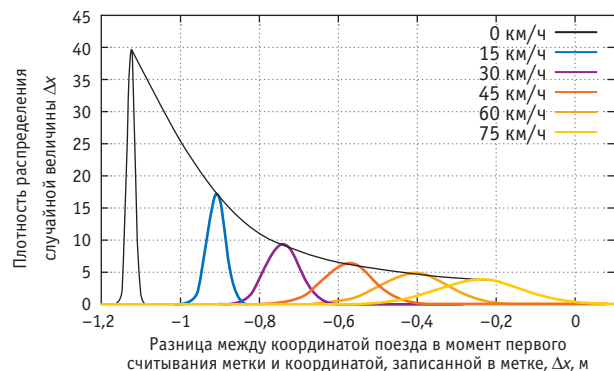


Рис. 1. Семейство плотностей распределения случайной величины  $\Delta x$  в зависимости от скорости движения поезда в зоне радиовидимости метки

Математическое ожидание  $\mu_{\Delta x}(v)$  следует рассматривать как *смещение считывания*, которое во время присвоения поезду уточненной координаты можно легко скорректировать. Из рис. 1 видно, что с повышением скорости движения поезда величина смещения уменьшается, однако при этом увеличивается дисперсия распределения. Разброс значений относительно математического ожидания, характеризуемых дисперсией  $\sigma_{\Delta x(v)}^2$ , определяет точность RFID-навигации поездов метрополитена к координатам пути. На рис. 2 графически представлена зависимость смещения считывания и среднеквадратического отклонения ошибки привязки от скорости при заданных параметрах исходных распределений.

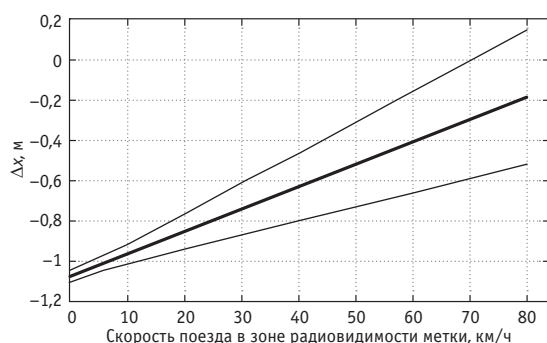


Рис. 2. Зависимость  $\Delta x$  от скорости:

- математическое ожидание случайной величины  $\Delta x$ ;
- верхние и нижние границы  $\pm 3\sigma$  возможных принимаемых значений  $\Delta x$  при указанной скорости движения поезда

Как видно из рис. 2, ошибка привязки на скоростях, близких к нулю, не превышает нескольких сантиметров. Движение на таких скоростях наблюдается в зоне остановки первого вагона на станциях метрополитена, где требуется повышенная точность остановки поезда при прицельном торможении. Для станций открытого типа ошибки привязки в несколько десятков сантиметров вполне приемлемы. Для станций закрытого типа требования более жесткие, соответственно необходима разработка методов повышения точности привязки.

При движении на перегонах со скоростями около 50 км/ч ошибка привязки не превышает  $\pm 20$  см. Этой точности вполне достаточно для решения задач автоведения поездов метрополитена, а также для скоростной диагностики линейных объектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании в RFID-навигации ридеров с непрерывным сканированием и компенсации смещения считывания записанной в память метки координаты (в текущей реализации СБПП коррективка не выполняется) ожидаемой точности привязки должно быть достаточно для решения большинства задач метрополитена. Однако при применении RFID-навигации на станциях закрытого типа необходимы меры по повышению точности привязки (например, использование меток с характеристиками, приближенными к среднему выборочному). Кроме того, для обеспечения плавности прицельного торможения на финишной стадии целесообразно установить дополнительные метки с координатами, расположенные за 3–4 м до остановки первого вагона.

## Литература

1. Костроминов А. М., Крючкова Т. В. Регрессионная модель зоны радиовидимости для системы бесконтактной привязки к пути подвижного состава метрополитена // Транспорт Урала. 2012. № 3 (34). С. 49–53. ISSN 1815–9400.
2. Костроминов А. М., Крючкова Т. В., Королев М. Ю. Алгоритм функционирования системы управления движением электроподвижного состава в метрополитене на базе RFID-технологии // Известия ПГУПС. 2014. № 2 (39). С. 42–48. ISSN 1815–588X.
3. Применение RFID-технологий в системе автоведения поездов метрополитена / А. М. Костроминов, М. Ю. Королев, В. В. Гаврилов, Т. В. Крючкова // Известия ПГУПС. 2009. № 3 (20). С. 91–97. ISSN 1815–588X.
4. Костроминов А. М., Костроминов А. Р. А., Тюлядин О. Н. Оценка вероятности пропуска считывания информации с радиочастотных меток аппаратурой СБПП // Известия ПГУПС. 2017. Т. 14. Вып. 4. С. 650–656. ISSN 1815–588X.
5. Контроль состояния ридер-антенного тракта аппаратуры СБПП в условиях электродепо метрополитена / А. М. Костроминов, С. А. Рахманин, Б. О. Смирнов, О. Н. Тюлядин // Известия ПГУПС. 2016. Т. 13. Вып. 2. С. 180–186. ISSN 1815–588X.
6. Дшхунян В. Л., Шаньгин В. Ф. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты. М.: ООО «Изд-во АСТ»; Изд-во «НТ Пресс», 2004. 695 с.
7. Dobkin D. M. The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice. Newton, MA, USA: Newnes, 2007. 504 p.

## References

1. Kostrominov A. M., Kryuchkova T. V. Regression model of tags radiovisibility zone for the system of non-contact binding to the track of underground rolling stock [Regressionnaya model' zony radiovidimosti dlya sistemy beskontaktnoy privyazki k puti podvijnogo sostava metropolitena] // Transport of the Urals. 2012. No. 3 (34). Pp. 49–53. ISSN 1815–9400.
2. Kostrominov A. M., Kriuchkova T. V., Korolev M. Iu. Operational algorithm for the traffic management system of metro electric stock based on RFID-technology [Algoritm funktsionirovaniya sistemy upravleniya dvizheniem elektropodvijnogo sostava v metropolitene na baze RFID-tekhologii] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2014. No. 2 (39). Pp. 42–48. ISSN 1815–588X.
3. Application of RFID-technologies in the system of auto-conduct of metro trains [Primenenie RFID-tekhologiy v sisteme avtovedeniya poezdov metropolitena] / A. M. Kostrominov, M. Yu. Korolev, V. V. Gavrilov, T. V. Kryuchkova // Proceedings of Petersburg Transport University. 2009. No. 3 (20). Pp. 91–97. ISSN 1815–588X.
4. Kostrominov A. M., Kostrominov A. R., Tyulyandin O. N. The assesment of information readout omission probability from RF tags by the system of contactless track connection (SBPP) [Otsenka veroyatnosti propuska schityvaniya informatsii s radiochastotnykh metok apparatury SBPP] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2017. Vol. 14. Issue 4. Pp. 650–656. ISSN 1815–588X.
5. Control of reader-antenna link of SNCBT equipment in the conditions of metro depot [Kontrol' sostoyaniya rider-antennogo trakta apparatury SBPP v usloviyakh elektrodepo metropolitena] / A. M. Kostrominov, S. A. Rakhmanin, B. O. Smirnov, O. N. Tyulyandin // Proceedings of Petersburg Transport University. 2016. Vol. 13. Issue 2. Pp. 180–186. ISSN 1815–588X.
6. Dshkhunyan V. L., Shan'gin V. F. Electronic identification. Contactless electronic identifiers and smart cards [Elektronnaya identifikatsiya. Beskon-

8. Finkenzeller K. RFID Handbook. Fundamental and Applications in Contactless Smart Cards and Identification / 2<sup>nd</sup> ed. Chichester, West Sussex, England : Willey, 2003. 427 p.
9. GS 1 EPCglobal Inc. EPC<sup>TM</sup> Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, 2015 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2\\_Protocol\\_Standard.pdf](http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf) (дата обращения: 11.04.2016).
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / 4-е изд. М. : Наука, 1969. 576 с.
11. Freedman D., Pisani R., Purves R. Statistics. International student edition / 4<sup>th</sup> ed. New York, NY, USA : W. W. Norton & Company, 2007. 720 p.
12. Hogg R., Craig A., McKean J. Introduction to Mathematical Statistics / 6<sup>th</sup> ed. New Jersey : Prentice Hall, 2004. 692 p.

- taktnye elektronnye identifikatory i smart-karty]. Moscow : LLC Publishing House AST ; Publishing House «NT Press», 2004. 695 p.
7. Dobkin D. M. The RF in RFID : Passive UHF RFID in Practice. Newton, MA, USA : Newnes, 2007. 504 p.
8. Finkenzeller K. RFID Handbook. Fundamental and Applications in Contactless Smart Cards and Identification / 2<sup>nd</sup> ed. Chichester, West Sussex, England : Willey, 2003. 427 p.
9. GS 1 EPCglobal Inc. EPC<sup>TM</sup> Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, 2015. [Electronic resource]. URL: [http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2\\_Protocol\\_Standard.pdf](http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf) (access date: 11.04.2016).
10. Venttsel' E. S. Probability theory [Teoriya veroyatnostey] / 4<sup>th</sup> ed. Moscow : Science, 1969. 576 p.
11. Freedman D., Pisani R., Purves R. Statistics. International student edition / 4<sup>th</sup> ed. New York, NY, USA : W. W. Norton & Company, 2007. 720 p.
12. Hogg R., Craig A., McKean J. Introduction to Mathematical Statistics / 6<sup>th</sup> ed. New Jersey : Prentice Hall, 2004. 692 p.

Объем статьи 0,55 авторских листа



УДК 621.332

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

**Александр Викторович Паранин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСТЕКАНИЯ ОБРАТНОГО ТЯГОВОГО ТОКА

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

**Alexander Viktorovich Pararin**, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Analysis of rail track operation conditions on the basis of modeling return traction current spreading

#### Аннотация

В статье рассмотрены вопросы, связанные с расчетом распределения обратных тяговых токов в рельсах и потенциалов «земля — рельс» участков, электрифицированных на постоянном токе. Использование системы моделирования на основе конечных элементов позволяет упростить решение задачи расчета токораспределения в неоднородной рельсовой линии и анализ ее работы в таких вынужденных режимах, как обрыв соединителей и излом рельсов. Расчет, дополненный значениями токов электровозов (реальными либо смоделированными), дает возможность определять узкие места в обратной тяговой сети еще на этапе подготовки участка к движению поездов повышенной массы и длины и своевременно планировать мероприятия для их устранения.

**Ключевые слова:** рельсовая линия, токораспределение, потенциал «земля — рельс», конечно-элементное моделирование.

#### Summary

The paper deals with the issues connected with calculation of return traction currents spreading in rails and «earth — rail» potentials on continuous current railway sections. The use of finite element modeling system simplifies the solution of current spreading calculation problem in assorted rail track and the analysis of its operation in such forced modes as break of rail bonds or rail failure. The calculation supplemented by values of electric locomotives currents (real or modeled) allows determining «bottlenecks» in return traction power system on the stage of preparing section to movement of trains with increased weight and length and planning the measures to eliminate them.

**Keywords:** rail track, current spreading, «earth — rail» potential, finite element modeling.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-28-34

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В стратегии развития ОАО «РЖД» до 2030 г. поставлена задача по увеличению оборота грузовых поездов повышенного веса и длины для повышения пропускной способности на отдельных направлениях. Как известно, при высокой интенсивности движения отказы систем автоматики серьезно снижают показатели эффективности участка в целом. Значения обратных токов электровозов системы 3000 В могут достигать 5000 А при вождении тяжеловесных поездов по участкам со сложным профилем. Такие значения превышают номинальные для узлов рельсовой линии, поэтому при анализе фактических токовых нагрузок необходимо проводить расчеты распределения токов в обратной тяговой сети с учетом движения электроподвижного состава.

В литературе по электроснабжению железных дорог [1] и защите от электрокоррозии [2] приводятся уравнения распределения потенциалов и токов в рельсовой линии для различных случаев расположения подвижных единиц и разных систем питания контактной сети. Эти уравнения получены путем решения системы дифференциальных уравнений 1-го порядка в предположении однородности рельсовой линии:

$$\begin{cases} -\frac{d\varphi(x)}{dx} = (R + j\omega L)i(x) \\ -\frac{di(x)}{dx} = (G + j\omega C)\varphi(x) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\varphi(x)$ ,  $i(x)$  — значения потенциала «земля — рельс» и тока в точке рельсовой линии с координатой  $x$ ;

$R, L$  — погонные значения активного сопротивления, Ом/м, и индуктивности рельсов, Гн/м;

$G, C$  — погонная проводимость, Сим·м, и емкость перехода «рельс — земля», Ф·м.

С учетом рассмотрения бесконечной и однородной рельсовой линии для электротяги постоянного тока получило распространение следующее решение системы (1):

$$\begin{cases} \varphi(x) = \frac{R_B}{2} \cdot I \cdot e^{-\alpha|x_I - x|} \\ i(x) = \frac{1}{2} \cdot I \cdot e^{-\alpha|x_I - x|} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\alpha = \sqrt{R \cdot G}$  и  $R_B = \sqrt{\frac{R}{G}}$  — постоянная распространения и волновое сопротивление рельсов (Ом/м) соответственно;

$I$  — значение тока, втекающего в рельсовую линию или вытекающего из нее в точке с координатой  $x$ ;

$x$  — расстояние, на котором требуется определить значение тока и потенциала.

Если участок однопутный, то можно использовать принцип наложения без дополнительных условий. На многопутных участках имеются электрические переемы между путями, поэтому для применения принципа наложения следует составить систему алгебраических линейных уравнений, из которой необходимо найти токи всех междупутных соединителей данного участка.

В качестве примера рассмотрим следующий случай: двухпутный участок с двумя междупутными соединителями и консольной схемой питания тяговой сети (рис. 1), рельсовая линия однородная. Если принять сопротивление междупутных соединителей ничтожно малым, то получим следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varphi_3 = \varphi_4 \\ I_{tp} = I_{e1} + I_{e2} \\ \varphi_1 = \frac{R_B}{2} \left[ I_{p1} + I_{tp} \cdot e^{-\alpha|x_{tp} - x_{p1}|} + I_{e1} \cdot e^{-\alpha|x_{e1} - x_{p1}|} + \right. \\ \left. + I_{p2} \cdot e^{-\alpha|x_{p2} - x_{p1}|} \right] \\ \varphi_2 = \frac{R_B}{2} \left[ -I_{p2} + I_{e2} \cdot e^{-\alpha|x_{e2} - x_{p1}|} - I_{p2} \cdot e^{-\alpha|x_{p2} - x_{p1}|} \right] \\ \varphi_3 = \frac{R_B}{2} \left[ I_{p2} + I_{e1} \cdot e^{-\alpha|x_{e1} - x_{p2}|} + I_{p1} \cdot e^{-\alpha|x_{p1} - x_{p2}|} + \right. \\ \left. + I_{tp} \cdot e^{-\alpha|x_{tp} - x_{p2}|} \right] \\ \varphi_4 = \frac{R_B}{2} \left[ -I_{p2} + I_{e2} \cdot e^{-\alpha|x_{e2} - x_{p2}|} + I_{p1} \cdot e^{-\alpha|x_{p1} - x_{p2}|} \right] \end{cases} \quad (3)$$

где  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  — потенциалы в точках подключения междупутных соединителей к рельсам;

$I_{tp}, I_{e1}, I_{e2}$  — токи отсоса тяговой подстанции, 1-го и 2-го электровозов соответственно;

$x, \dots$  — координаты элементов расчетной схемы (см. рис. 1).

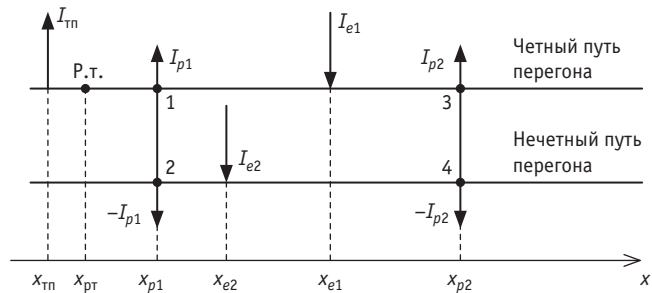


Рис. 1. Схема расчетного участка:

$I_{tp}, I_{e1}, I_{e2}, I_{p1}, I_{p2}$  — ток отсоса тяговой подстанции, 1-го и 2-го электровоза, 1-го и 2-го междупутного соединителя;  $x_{p1}, x_{p2}, x_{e1}, x_{e2}, x_{tp}, x_{pt}$  — координаты 1-го и 2-го соединителя, 1-го и 2-го электровоза, отсоса тяговой подстанции и координата расчетной точки

По схеме рис. 1 определим значения тока и потенциала «земля — рельс» для выбранной расчетной точки (на рис. 1 — Р.т.) как функцию времени. Изменение тока в расчетной точке определяется движением электровозов.

Решение системы уравнений (3) позволяет получить мгновенные значения токов электротяговых переемычек:

$$I_{p1} = -\frac{1}{2e^{-2\alpha|x_{p1} - x_{p2}|} - 2} \left( I_{e1} \left( e^{-\alpha(|x_{p1} - x_{p2}| + |x_{e1} - x_{p2}|)} - e^{-\alpha(|x_{p1} - x_{p2}| + |x_{p2} - x_{tp}|)} + e^{-\alpha|x_{p1} - x_{tp}|} - e^{-\alpha|x_{e1} - x_{p1}|} \right) + \right. \\ \left. + I_{e2} \left( e^{-\alpha(|x_{p1} - x_{p2}| + |x_{p2} - x_{tp}|)} - e^{-\alpha(|x_{p1} - x_{p2}| + |x_{e2} - x_{p2}|)} + e^{-\alpha|x_{p1} - x_{tp}|} + e^{-\alpha|x_{e2} - x_{p2}|} \right) \right); \quad (4)$$

$$I_{p2} = -\frac{1}{2e^{-2\alpha|x_{p1} - x_{p2}|} - 2} \left( I_{e1} \left( e^{-\alpha(|x_{p1} - x_{p2}| + |x_{p1} - x_{tp}|)} - e^{-\alpha(|x_{p1} - x_{p2}| + |x_{e1} - x_{p1}|)} + e^{-\alpha|x_{e1} - x_{p2}|} - e^{-\alpha|x_{p2} - x_{tp}|} \right) + \right. \\ \left. + I_{e2} \left( e^{-\alpha(|x_{p1} - x_{p2}| + |x_{e2} - x_{p1}|)} - e^{-\alpha(|x_{p1} - x_{p2}| + |x_{p1} - x_{tp}|)} + e^{-\alpha|x_{p2} - x_{tp}|} + e^{-\alpha|x_{e2} - x_{p1}|} \right) \right). \quad (5)$$

При известных зависимостях токов междупутных соединителей от текущих координат электровозов (4), (5), используя метод наложения, определим ток в рельсах в расчетной точке:

$$I_{рт} = \frac{(I_{e1} + I_{e2})}{2} e^{-\alpha|x_{тп} - x_{рт}|} + \frac{I_{p1}}{2} e^{-\alpha|x_{p1} - x_{рт}|} + \\ + \frac{I_{p2}}{2} e^{-\alpha|x_{p2} - x_{рт}|} + \begin{cases} \frac{I_{e1}}{2} e^{-\alpha|x_{e1} - x_{рт}|}, & x_{e1} \geq x_{рт} \\ -\frac{I_{e1}}{2} e^{-\alpha|x_{e1} - x_{рт}|}, & x_{e1} < x_{рт} \end{cases} \quad (6)$$

Моделирование токораспределения при движении поездов потребует изменения знака у слагаемых с током электровоза на противоположный в выражениях, аналогичных (6), для учета прохода над расчетной точкой. Поэтому аналитическая модель участка будет представлена набором кусочно-заданных функций для каждой расчетной точки. Добавление в модель нового поезда потребует дополнения всех уравнений системы выражением, учитывающим влияние тока электровоза. При анализе работы рельсовой линии с дополнительным соединителем необходимо добавить в исходную систему еще три уравнения. Исследование неоднородной рельсовой линии усложнит аналитическую модель — внесет в решаемую систему уравнений зависимость первичных параметров рельсовой линии от координаты.

Таким образом, аналитический метод расчета токораспределения имеет ряд фундаментальных недостатков:

предполагает наличие однородной рельсовой линии, введение неоднородности увеличивает объем вычислений;

моделирование токораспределения при движении электроподвижного состава требует изменения вида решаемых уравнений;

добавление в модель еще одного поезда добавляет в решаемые уравнения новые члены;

добавление в систему междупутного соединителя увеличивает общее количество уравнений.

Перечисленные недостатки не позволяют использовать данный подход для практических инженерных расчетов на действующих многопутных участках железной дороги.

### КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ

Альтернативный способ расчета — метод конечных элементов (МКЭ). Он хорошо подходит для расчета физических процессов, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных с непостоянными, зависящими от координат коэффициентами. В МКЭ расчетная область (геометрия объекта), нарисованная в натуральную величину, разбивается на элементарные участки — происходит дискретизация решаемых уравнений по пространству. Коэффициенты решаемых уравнений задаются как функции координаты в пространстве, что позволяет вводить в модель индивидуальные первичные параметры рельсовой линии для любого участка. Добавление дополнительных соединителей или электровозов потребует изменений в исходных параметрах модели, но не в решаемых дифференциальных уравнениях. На сегодняшний момент МКЭ широко используется в инженерной практике и зарекомендовал себя как достаточно надежный способ расчета при соответствующем качестве настройки модели. Например, в работе [3] МКЭ применялся для анализа эффективности использования протяженного заземлителя в пределах одной межподстанционной зоны, т.е. для решения аналогичной задачи.

Для демонстрации возможностей конечно-элементного моделирования и с учетом необходимости верификации предлагаемой модели смоделируем участок, изображенный на рис. 1. Верификацию построим в сравнении результатов расчета аналитической и конечно-элементной моделей.

В рамках статьи воспользуемся средой моделирования ComsolMultiphysics и создадим в ней одномерную конечно-эле-

ментную модель. Так как задача анализа асимметрии обратного тягового тока не стоит, то в модели ходовые рельсы одного пути перегона будут представлены прямой линией, соединенной отрезками (междупутными перемычками) с другой линией, обозначающей второй путь перегона (рис. 2).

Среда моделирования ComsolMultiphysics позволяет решать дифференциальные уравнения в частных производных, поэтому перепишем систему (1) относительно потенциала «рельс — земля» в частных производных, пренебрегая реактивной составляющей на постоянном токе:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} - a^2 \varphi(x) = 0. \quad (7)$$

Решаемое в среде моделирования ComsolMultiphysics уравнение (7) может быть задано через дифференциальное уравнение в частных производных, которое подходит для описания многих физических процессов:

$$e_a \frac{d^2 V}{dt^2} + d_a \frac{dV}{dt} + \nabla \cdot (-c \nabla V - \alpha V + \gamma) + \beta \cdot \nabla V + rV = f. \quad (8)$$

Чтобы привести уравнение (8) к виду выражения (7), необходимо приравнять к нулю коэффициенты  $e_a$ ,  $d_a$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , тогда итоговое уравнение будет таким:

$$-c \nabla \cdot \nabla V + rV = f, \quad (9)$$

где 
$$\nabla \cdot \nabla V = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) V,$$

$V$  — искомое значение потенциала рельса относительно удаленной земли;

$c$  — коэффициент диффузии, имеет размерность, обратную сопротивлению рельсов, м/Ом;

$r$  — коэффициент абсорбции, имеет размерность проводимости изоляции, См/м;

$f$  — источник, в нашей модели представляет значение тока, втекающего в рельсовую линию от электровозов или вытекающего в точках отсоса, А/м.

Начальным условием в модели является равенство нулю потенциала «рельс — земля» и его первой производной в начальный момент времени. Граничное условие в точке подключения фидера обратного тока тяговой подстанции — величина тока фидера. Ток электровоза представлен коэффициентом решаемого дифференциального уравнения.

Для введения в модель тока электровоза сделаем допущение, что он стекает в рельсы не в точках контакта «колесо — рельс», а равномерно по всей длине локомотива. Это упростит математическое описание источника тока и не внесет существенной погрешности, поскольку длина локомотива пренебрежимо мала по сравнению с анализируемой длиной участка рельсовой линии (рис. 3). Для снижения ошибки вычислений размер минимального анализируемого элемента рельсовой линии (шаг сетки) установим в 1 м.

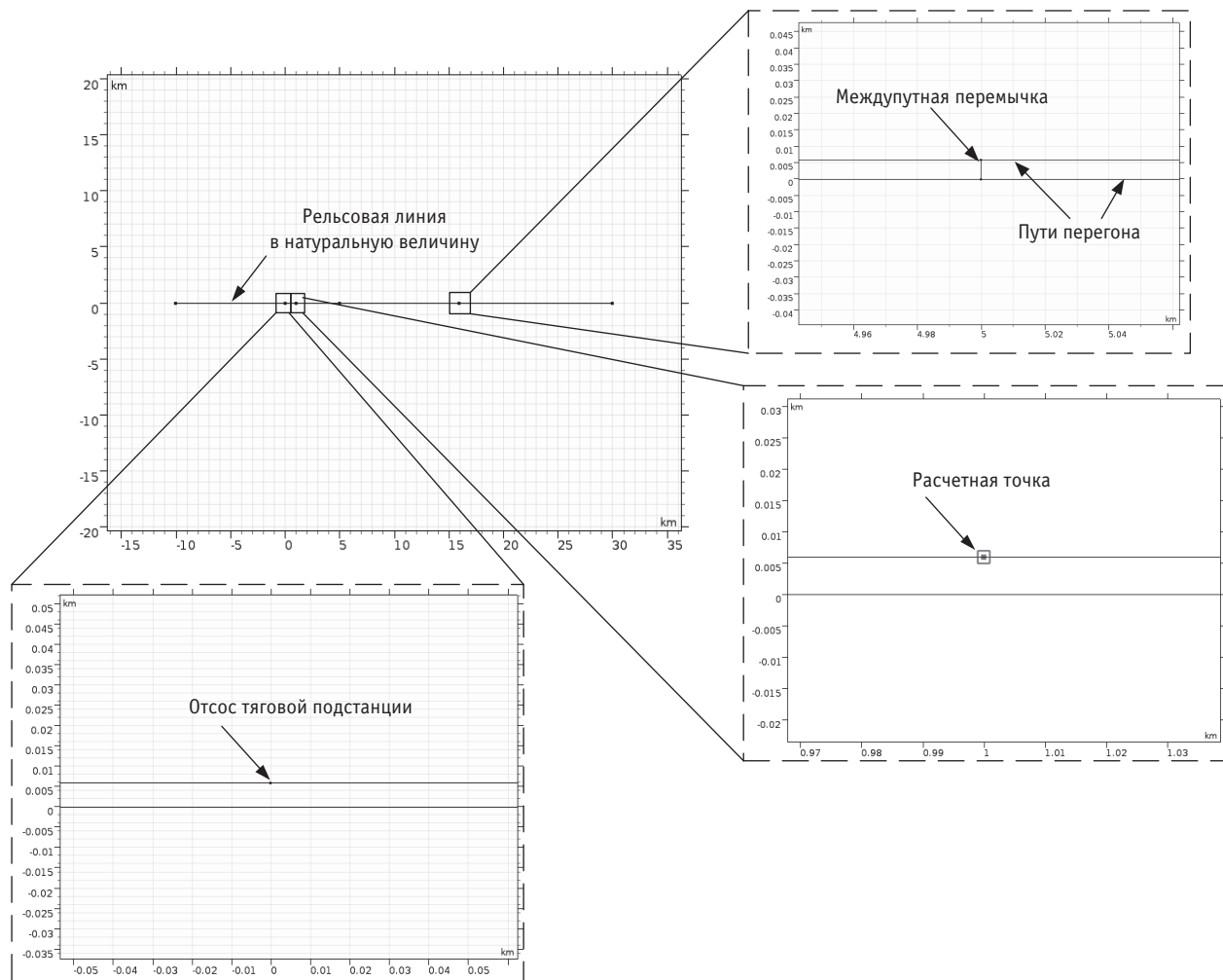


Рис. 2. Геометрия конечно-элементной модели

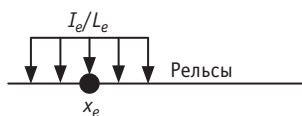


Рис. 3. Схема замещения электровоза

Так как предлагаемая модель решает уравнение (9) относительно потенциала «рельс — земля», то для определения тока в рельсах воспользуемся выражением

$$i(x) = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x}. \quad (10)$$

## ВЕРИФИКАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МОДЕЛИ

### Сравнение с аналитической моделью

Для верификации конечно-элементной модели выполним моделирование токораспределения для участка, приведенного на рис. 1, со следующими параметрами:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = 0,3323 \left[ \frac{1}{\text{км}} \right] \\ X_{\text{тп}} = 0 \text{ [км]} \\ X_{\text{рт}} = 0,9 \text{ [км]} \\ X_{\text{р1}} = 5 \text{ [км]} \\ X_{\text{р2}} = 16 \text{ [км]} \\ X_{\text{е1}} = 15 - 80 \cdot t \text{ [км]} \\ X_{\text{е2}} = 6 + 70 \cdot t \text{ [км]} \\ I_{\text{е1}} = 1000 \text{ [А]} \\ I_{\text{е2}} = 1200 \text{ [А]} \end{array} \right. \quad (11)$$

Качественно степень совпадения значений потенциала «рельс — земля» и тока в расчетной точке можно оценить из рис. 4 и 5.

Средние расхождения результатов расчета сравниваемых моделей составили 0,15 и 0,1 % для потенциала и тока соответственно. Моделирование проводилось для времени нахождения электровозов между координатами  $x_{\text{р1}}$  и  $x_{\text{р2}}$ .



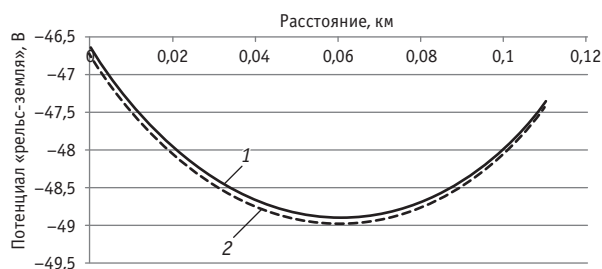


Рис. 4. Графики напряжений «рельс — земля» в расчетной точке:  
1 и 2 — данные аналитической  
и конечно-элементной модели соответственно

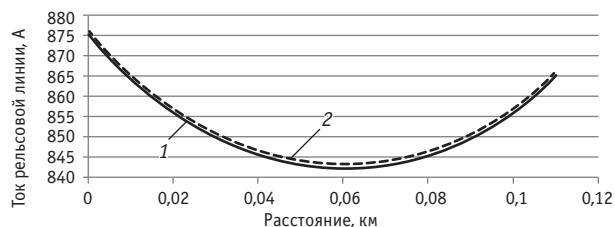


Рис. 5. Графики тока в расчетной точке:  
1 и 2 — данные аналитической  
и конечно-элементной модели соответственно

### Сравнение с результатами измерений

Практическая ценность предложенной модели расчета токораспределения заключается в возможности анализировать реальные участки железной дороги с учетом фактической поездной обстановки и различных режимов работы. Так, в рамках проводимого исследования в УрГУПС при содействии Свердловской железной дороги был смоделирован один из наиболее сложных участков обращения поездов повышенной массы. Цель исследования заключалась в определении участка рельсовой линии с наибольшей токовой нагрузкой для последующего анализа тепловых режимов работы оборудования. Требуемые для моделирования данные были предоставлены соответствующими службами и подразделениями дороги. Значения тока электровоза получены с использованием программы моделирования систем электроснабжения подвижного состава «Кортес», применяемой в дорожной лаборатории «Трансэнерго».

Результаты моделирования прохода по данному участку поезда массой 9 тыс. т выявили дроссель-трансформатор с наибольшей токовой нагрузкой, расположенный у дополнительного входного сигнала станции в начале затяжного подъема. Также моделирование показало, что смежный с ним дроссель-трансформатор имеет в среднем меньшую на 20 % токовую нагрузку из-за ответвления части тока по междупутной перемычке.

Прямые измерения тока на дроссель-трансформаторе, выполненные разработанным ранее прибором [4], и данные системы мониторинга локомотива, регистрирующие потребляемый ток, позволили сравнить расчеты конечно-элементной модели с экспериментальными данными (рис. 6).

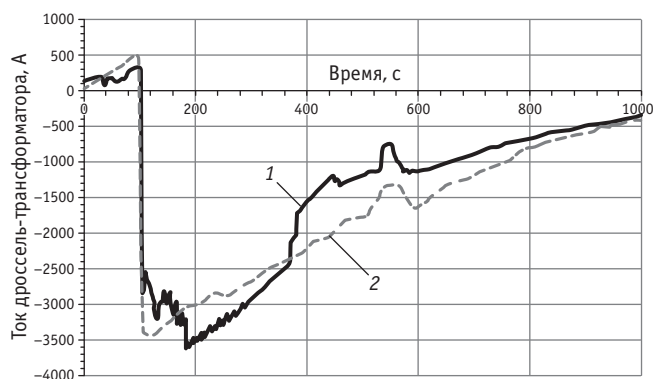


Рис. 6. Результаты прямых измерений (1)  
и моделирования (2) тока

Погрешность модели относительно результатов измерений составила  $19,8 \pm 0,4$  % с 95 %-м доверительным интервалом. На рис. 6 можно выделить два интервала расхождения значений:

100–200 с — шунтирование колесными парами проходящего состава изолирующих стыков приводило к образованию переменной составляющей на входе фильтра измерителя с частотой, отличной от частоты сигнального тока, что запустило процесс автоподстройки фильтров для ее подавления и вызвало снижение измеренного значения;

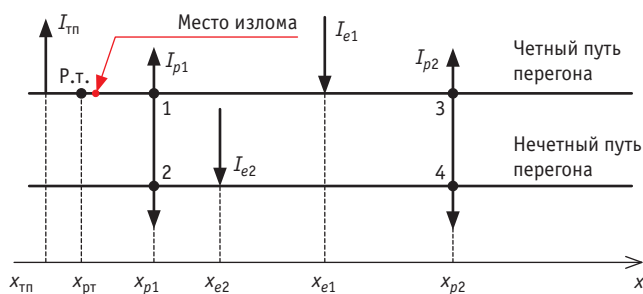
350–400 с — может быть обусловлено наличием локальной неоднородности в реальной рельсовой линии, не учтенной в модели. Строго говоря, дроссель-трансформатор следующего блок-участка, не учтенный в модели, может быть причиной этой неоднородности. Подробный анализ такого расхождения значений — задача будущих исследований.

### ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Другим свойством предлагаемой модели является возможность анализа влияния локальных неоднородностей рельсовой линии на токораспределение. Под локальной неоднородностью будем поднимать заметное отклонение первичных параметров рельсовой линии от средних погонных значений. В рамках иллюстрации возможностей конечно-элементной модели для учета влияния локальной неоднородности на токораспределение смоделируем ситуацию излома рельса. С точки зрения первичных параметров излом приведет к увеличению погонного сопротивления рельсовой линии.

Внесение в модель данных по неоднородности рельсовой линии основано на изменении значений коэффициентов в уравнении (9): коэффициент диффузии, обратный по значению погонному сопротивлению рельсов, представлен как кусочно-заданная функция координаты  $x$ . В точке излома рельса (рис. 7) коэффициент диффузии резко возрастает.

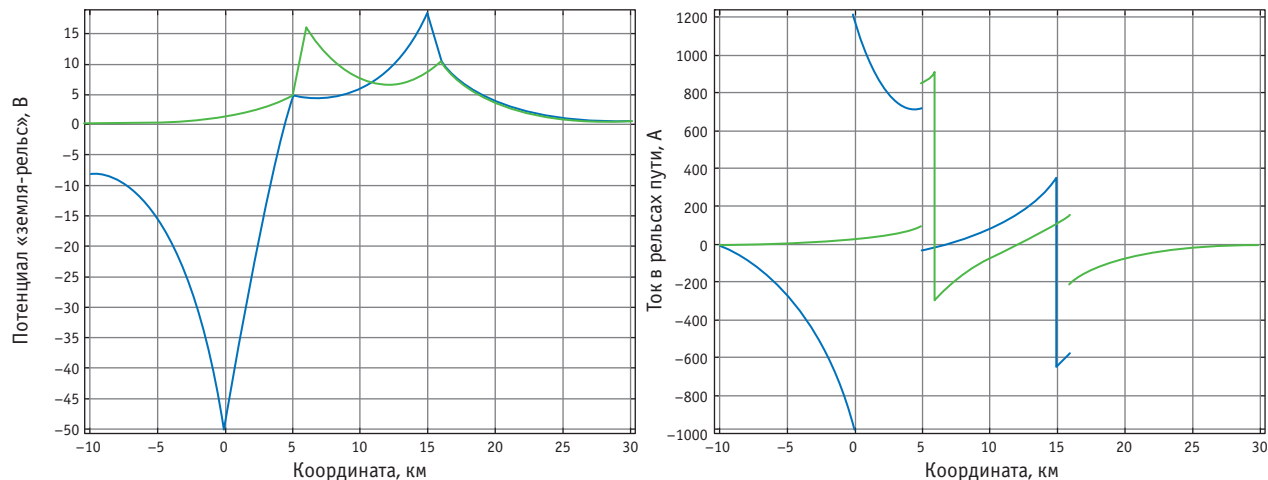
Распределение потенциала «рельс — земля» и тока в исправной рельсовой линии в начальный момент времени представлено на рис. 8, в рельсовой линии с изломом — на рис. 9.



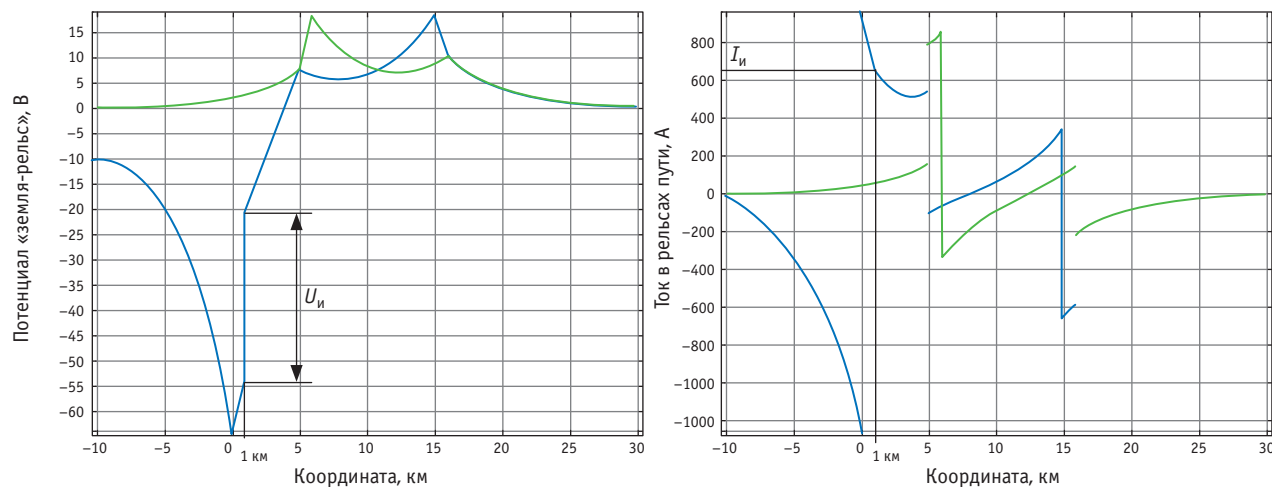
**Рис. 7. Схема рельсовой линии с изломом рельса**

Как можно заметить по результатам моделирования, разность потенциалов в воздушном промежутке в месте излома составляет порядка 35 В при токе около 600 А. В работе [5] указано, что при токе около 50 А и разности потенциалов в 80–90 В создаются условия для зажигания электрической дуги, а при напряжениях порядка 30–40 В осуществляется устойчивое го-

рение дуги. Понятно, что напряжение в месте излома зависит от значения внесенного сопротивления и первичных параметров рельсовой линии, но численная оценка вносимого изломом дополнительного сопротивления — это отдельная исследовательская задача, выходящая за рамки данной статьи. Поэтому для оценки возможности зажигания электрической дуги в месте излома проведем моделирование на ряде вносимых изломом сопротивлений (0,01; 0,05; 0,1; 0,3 Ом) при различных сопротивлениях изоляции рельсовой линии от земли (0,1; 0,5; 1; 2 Ом·км). Для каждого сочетания указанных значений проведем моделирование токораспределения на рассмотренной ранее конечно-элементной модели. На рис. 10 представлены графики распределения потенциала «рельс — земля» и тока в рельсовой линии. Из графика токов видно, что при заданных условиях его минимальное значение в месте излома составляет порядка 220 А, т.е. значение тока достаточно для устойчивого горения дуги. Данные по значению разности потенциалов в изломе приведены в табл. 1.



**Рис. 8. Распределение потенциала «рельс — земля» и тока в исправной рельсовой линии**



**Рис. 9. Распределение потенциала «рельс — земля» и тока в рельсовой линии с изломом в точке 1 км и внесенным сопротивлением 0,1 Ом в месте излома**

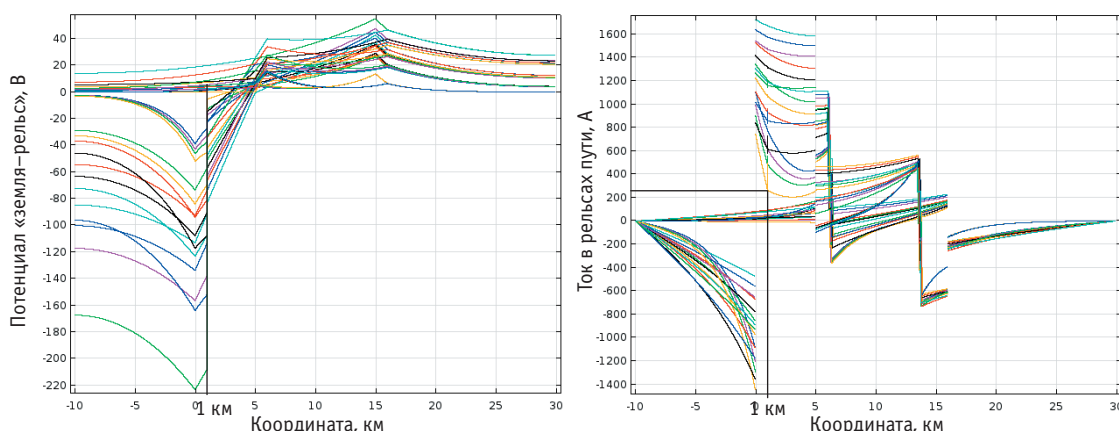


Рис. 10. Распределение потенциала «рельс — земля» и тока в рельсовой линии с изломом в точке 1 км и различными сочетаниями первичных параметров

Таблица 1

Значения разности потенциалов в месте излома при различных комбинациях вносимого изломом сопротивления и переходного сопротивления «рельс — земля»

$\frac{R_{\text{переход}}}{R_{\text{внесен}}}$	0,1 Ом·км	0,5 Ом·км	1 Ом·км	2 Ом·км
0,01 Ом	-25,7 В	-56,07 В	-72,5 В	-89,8 В
0,05 Ом	-25,8 В	-57,7 В	-76,1 В	-96,2 В
0,1 Ом	-25,9 В	-59,4 В	-79,8 В	-102,2 В
0,3 Ом	-26,2 В	-63,2 В	-89,3 В	-123,1 В

Как видно из табл. 1, при нормативном сопротивлении изоляции рельсовой линии (1 Ом·км) условия для зажигания дуги создаются при значениях переходного сопротивления в изломе 0,1 Ом. С другой стороны, аналогичная ситуация с точки зрения токораспределения возникает при увеличении переходного сопротивления в болтовых соединениях крепления дроссельных перемычек. Из приведенного анализа можно сделать вывод, что повышение переходного сопротивления в местах крепе-

ния дроссельных соединителей до значений в 0,1 Ом потенциально создает условия для зажигания дугового разряда в обход изолирующего стыка. Но этот вопрос требует отдельного изучения с использованием модели, учитывающей асимметрию тягового тока, и это задача будущих исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена конечно-элементная модель распределения потенциала и тягового тока в рельсовой линии и рассмотрена ее верификация на основе сравнения с аналитическим расчетом относительно простого случая и сравнения с данными эксперимента. Практическая ценность предлагаемой модели состоит в возможности анализа работы рельсовых линий реальных многопутных участков железной дороги для поиска элементов с ненормативной токовой нагрузкой. Аналитическая методика расчета непригодна для этих целей и не может быть использована для многопутных участков. Указанные свойства предлагаемой модели являются следствием преимуществ, предоставляемых системой конечно-элементного моделирования. С научной точки зрения рассмотренная модель интересна возможностями анализа вынужденных режимов работы рельсовой линии при наличии неисправных элементов.

## Литература

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учеб. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
2. Защита подземных металлических сооружений от коррозии / И. В. Стрижевский, А. Д. Белоголовский, В. И. Дмитриев и др. : справ. М. : Стройиздат, 1990. 303 с.
3. Лесников Д. В. Совершенствование методики расчета протяженных заземлителей на участках постоянного тока // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 71–76. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-71-76. ISSN 1815–9400.
4. Рожкин Б. В. Измеритель значений тягового тока и его асимметрии в обратной тяговой сети // Инновационный транспорт. 2013. № 4 (10). С. 59–64. ISSN 2311–164X.
5. Шнырев А. П., Козлов Ю. С. Технологические основы сварочных процессов. М. : Агар, 2001. 152 с.

## References

1. Markvardt K. G. Power supply of electrified railways [Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog] : textbook. Moscow : Transport, 1982. 528 p.
2. Protection of underground metal constructions from corrosion [Zashhita podzemnykh metallicheskh sooruzheniy ot korrozii] / I. V. Strizhevskiy, A. D. Belogolovskiy, V. I. Dmitriev, et al. : handbook. Moscow : Stroyizdat, 1990. 303 p.
3. Lesnikov D. V. Improvement of the method of the calculation of expedited grounders in the stations of a constant current [Sovershenstvovanie metodiki rascheta protyazhennykh zazemlitley na uchastkakh postoyannogo toka] // Transport of the Urals. 2017. No. 1 (52). Pp. 71–76. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-71-76. ISSN 1815–9400.
4. Rozhkin B. V. An instrument for measuring traction current and its asymmetry in reverse traction network [Izmeritel' znacheniy tyagovogo toka i ego asimmetrii v obratnoy tyagovoy seti] // Inntrans. 2013. No. 4 (10). Pp. 59–64. ISSN 2311–164X.
5. Shnyrev A. P., Kozlov Yu. S. Technological basis of welding processes [Tekhnologicheskie osnovy svarechnykh protsessov]. Moscow : Agar, 2001. 152 p.

Объем статьи 0,76 авторских листа

УДК 658.3:656.2+625.7

Владимир Евгеньевич Кошкарлов, кандидат технических наук,  
начальник 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

## НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

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

### New technology of designing and building high-speed railway mainlines

#### Аннотация

В статье рассмотрены перспективы проектирования и строительства нежестких конструкций безбалластного железнодорожного пути высокоскоростных магистралей (ВСМ) на основе асфальтобетонных технологий.

Для существующих и разрабатываемых конструкций предложено использовать инновационное решение — устройство несущего слоя безбалластного строения пути из специальных асфальтовых бетонов с полимерными (каучуковыми) добавками. Показано, что каучуковые модификаторы позволяют повысить когезионную прочность, трещиностойкость, долговечность и строительную ровность несущего слоя верхнего строения пути в широком диапазоне температур и эксплуатационных нагрузок от высокоскоростного транспорта.

**Ключевые слова:** высокоскоростные магистрали, безбалластный путь, верхнее строение пути, нежесткая конструкция, асфальтобетон, ровность, несущий слой, модификатор асфальтобетона, профилактическая эмульсия.

#### Summary

The paper considers the opportunities of designing and building non-rigid constructions of high-speed mainlines ballastless track on the basis of asphalt concrete technologies. For existing and developing constructions the authors offer to use the innovative solution — construction of the ballastless track bearing stratum of special asphalt concretes with polymer (rubber) additives. It is shown that rubber modifiers will improve the cohesive strength, crack resistance, durability and constructive regularity of the track bearing stratum in a wide range of temperatures and service loads from high-speed transport.

**Keywords:** high-speed mainlines, ballastless track, non-rigid construction, asphalt concrete, regularity, bearing stratum, asphalt concrete modifier, preventive emulsion.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-35-40

Всего через несколько лет — в 2020-х гг. — высокоскоростные магистрали (ВСМ) станут реальностью российского железнодорожного транспорта. Уже сегодня на стадии разработки и технической подготовки к строительству находятся проекты ВСМ Москва — Санкт-Петербург, Москва — Казань — Екатеринбург и др. [1–3].

Кроме финансовых, к числу наиболее серьезных проблем, которые предстоит решить при реализации проектов ВСМ, относятся технические, т.е. выбор, адаптация зарубежных технологий строительства ВСМ и/или разработка (доработка) приемлемых российских технологий на основе передового отечественного опыта.

Известно, что при создании первых железных дорог использовалась классическая конструкция пути, состоящая из рельсовых плетей, шпал и щебеночного основания. Длительное время она, предельно простая и технологичная, считалась единственно возможной.

Однако высокоскоростные магистрали — это инновационная транспортная система, требующая соответственно и инновационных подходов к строительству [1, 2, 4]. Причем важнейшим критерием для ВСМ является ровность, обеспечивающая безопасность движения поездов при скоростях 200–400 км/ч.

Для увеличения ровности, повышения прочности и долговечности, а также ремонтпригодности верхнего строения пути нами предложен подход, основанный на использовании при проектировании и строительстве ВСМ асфальтобетонных технологий [2, 5]. Изучение и обоснование параметров нежестких типов конструкций с применением модифицированного асфальтобетона в несущем слое безбалластного верхнего строения пути (НС БВСП) выполнено с учетом мирового и отечественного опыта строительства железных дорог, а также анализа исследований, проведенных на экспериментальном полигоне ВНИИЖТ [6, 7].



Исторически с увеличением скоростей движения поездов стали создаваться новые конструкции пути — без балласта, с опиранием рельсов на сплошное монолитное основание. Как показывает сравнительный анализ балластных и безбалластных конструкций, последние имеют ряд существенных преимуществ для ВСМ (см. критерии 2, 6, 8–10 в табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ свойств конструкций пути

№ п/п	Свойство конструкций железнодорожного пути, критерии для их сравнительной оценки	Балластный путь (БП)	Безбалластный путь (ББП)
1	Низкие капитальные затраты на строительство	+	–
2	Низкие затраты на текущее содержание	–	+
3	Возможность регулирования геометрии рельсовой колеи	+	–
4	Восстановление пути после сходов и катастроф	+	–
5	Гашение шума и вибрации	+	–
6	Устойчивость бесстыкового пути	–	+
7	Унификация для различных условий эксплуатации	+	–
8	Удобство применения на ИССО (мосты, тоннели, эстакады)	–	+
9	Высокая точность обеспечения геометрии пути при эксплуатации	–	+
10	Надежность при скоростном движении (ВСМ)	–	+

Для того чтобы ответить на вопрос, какой из множества существующих сегодня типов безбалластной конструкции выбрать для высокоскоростного движения в российских усло-

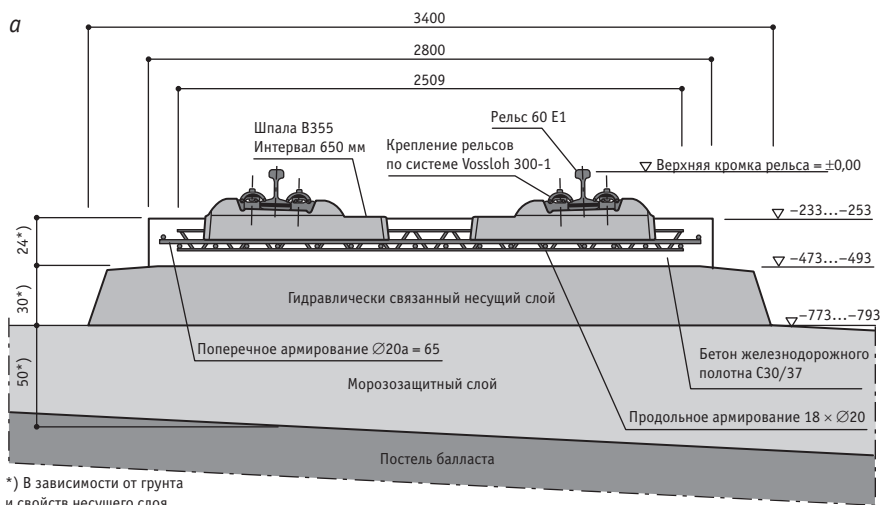
виях, рассмотрим ряд зарубежных конструкций, испытанных на полигоне ВНИИЖТ [6, 7], и дадим предложения по их усилению и модернизации на основе использования асфальтобетонных технологий.

Безбалластная конструкция RHEDA 2000®, состоящая из модифицированных двублочных шпал с выступающей арматурой (рис. 1), достаточно широко распространена в зарубежной практике. Шпалы вмонтированы в монолитный армированный бетонный несущий слой так, что их арматура при укладке соединяется с арматурой несущего бетонного слоя. RHEDA 2000® — это монолитное железнодорожное полотно, состоящее из двух слоев, которые вступают в планомерное сцепление. Бетонный несущий слой шириной 3,0 м и толщиной 240 мм опирается на гидравлически связанный несущий слой шириной 3,6 м и толщиной 300 мм.

К недостаткам RHEDA 2000® стоит отнести жесткость, опирание верхнего строения на несущий слой из гидравлически связанного материала, также жесткого, и отсутствие шумопоглощения. Считаем, что в этой конструкции вместо гидравлически связанного можно использовать нежесткий слой из асфальтобетона или полимерасфальтобетона.

Следующая конструкция ББП — LVT (Low Vibration Track), состоящая из рельсов, рельсовых скреплений типа Vossloh W30, полушпал железобетонных ненапряженных с резиновыми чехлами и амортизирующими прокладками. Несущая конструкция пути выполнена из неармированного бетона (рис. 2).

Конструкция ББП по типу LVT также отличается жесткостью, поскольку выполнена из цементобетона, не содержит нежестких элементов и несущих слоев. Полушпалы в чехлах с амортизирующими прокладками заливаются путевым бетоном, толщина которого под подошвой полушпалы составляет не менее 20 см. По нашему мнению, в этой конструкции, как и в предыдущей, можно создать нежесткий несущий слой из асфальтобетона для повышения эксплуатационной надежности и ровности верхнего строения.



\*) В зависимости от грунта и свойств несущего слоя

Рис. 1. Безбалластная конструкция пути RHEDA 2000®:  
а — поперечный профиль; б — внешний вид





Таблица 2

Сравнение типовых безбалластных конструкций

Характеристика пути	RHEDA 2000®	LVT	Bögl
Известная протяженность в мире, км	2205	1031	4391
Скорость укладки, км/сут	500	250	650
Строительная высота БВСП, мм	780	805	752
Ремонтопригодность: высокая (+), низкая (–)	–	+	–
Возможность укладки стрелочных переводов	+	+	+
Заводская готовность: высокая (+), низкая (–)	–	–	+
Унификация конструкции для ИССО	–	+	–
Возможность устройства нежесткой конструкции несущего слоя из АБС*	+	+	+
Локализация в России в настоящий период	–	+	–

\*АБС — асфальтобетонная смесь, в том числе дисперсно-армированная.

Несомненно, что конструкции безбалластного пути должны учитывать местные климатические и транспортные условия эксплуатации ВСМ, в том числе возможность устройства верхнего строения пути на нежестком слое из уплотненного специального асфальтобетонного материала. Пример перспективной (рекомендуемой нами) нежесткой конструкции строения пути со слоем поглощения динамических волн и температурных напряжений, изготовленным из специального вязко-упругого резино-дисперсно-армированного асфальтобетона, представлен на рис. 4. Материал асфальтобетонного слоя разработан с использованием комплексных модификаторов на основе резины. Нежесткая конструкция нижнего строения и несущего слоя верхнего строения пути (см. рис. 4) включает:

стабилизированный слой земполотна, укрепленного комплексным органическим вяжущим (КОВ);

морозозащитный слой из песчано-щебеночной смеси (ПЩС);

несущую конструкцию безбалластного пути из трех связанных нежестких слоев: основание НК БВСП из пористого дисперсно-армированного асфальтобетона; нижний слой покрытия НК БВСП из плотного резиноасфальтобетона; верхний слой НК БВСП из щебеночно-мастичного асфальтобетона на резинобитумном вяжущем (РВЩА).

Подбор состава специального асфальтобетона для ВСМ возможен с использованием характеристик, предназначенных для проектирования дорожных одежд нежесткого типа, а также по методу Supergravel, закрепленному в ряде национальных стандартов РФ.

Такой специальный асфальтобетон и органическое (битумное, битумно-полимерное, резинобитумное) вяжущее для его приготовления требуют ряда физико-механических испытаний применительно к климатическим условиям эксплуатации нежесткой конструкции транспортного сооружения.



Рис. 4. Пример нежесткой конструкции строения пути для ВСМ

Как уже было отмечено, важнейшей характеристикой верхнего строения пути для ВСМ и особенно несущего слоя, устраиваемого под шпально-рельсовую плетку и/или безбалластное верхнее строение пути, является его строительная и эксплуатационная ровность.

Допустимая геометрическая неровность рельса пути высокоскоростного движения на заданной длине в плане и профиле не должна превышать 2 мм. Для отечественных проектов ВСМ эта норма может быть повышена до инженерной точности 1,0–1,5 мм, что обеспечит безопасность и надежность эксплуатации ВСМ в сложных и разнообразных климатических условиях нашей страны.

Для того чтобы выявить достоинства и недостатки нежестких (асфальтобетонных) и жестких (цементобетонных) конструкций, выполним их сравнительный анализ на основе опыта проектирования, строительства и эксплуатации под динамическими транспортными нагрузками (табл. 3).

Как видно из табл. 3, в отличие от гидравлического вяжущего (цемента), необратимо твердеющего с образованием жесткой (каменной) среды, органические битумно-полимерные вяжущие (ПБВ, РБВ) обладают пластичностью, релаксацией, поглощением напряжений, что важно для обеспечения длительной ровности несущего слоя строения пути под воздействием нагрузок и температурных изменений окружающей среды.

Кроме того, сравнение строительных и эксплуатационных характеристик материала несущего слоя верхнего строения пути выявляет существенные преимущества асфальтобетона, наиболее важные из которых — экономичность, ремонтпригодность, возможность модификации с целью достижения заданных эксплуатационных и прочностных параметров для обеспечения длительной ровности и надежности пути, технологичность в условиях строительства и ремонта и др.

Таблица 3

Сравнение жестких (цементобетонных) и нежестких (асфальтобетонных) конструкций несущего слоя строения пути

Показатель	Характеристика и преимущества несущих конструкций пути	
	жестких (цементобетон)	нежестких (асфальтобетон)
Обеспечение заданного модуля упругости слоя	+	+
Нарезка и герметизация деформационных швов	+	–
Релаксация температурных и динамических напряжений	–	+
Пластичность материала слоя	–	+
Ползучесть (деформация при длительных нагрузках)	–	+
Ударная хрупкость	+	–
Теплостойкость	+	–
Морозостойкость	+	+
Водостойкость	–	+
Шумопоглощение	–	+
Ремонтпригодность	–	+
Экономичность	–	+
Технологичность	–	+
Высокая скорость строительства линейных объектов	–	+
Необходимость ухода за материалом слоя при формировании и эксплуатации конструкции	+	–
Возможность эффективной модификации для получения заданных эксплуатационных характеристик	–	+

Такие характеристики, как ползучесть при высоких и хрупкость при низких температурах, сдвигустойчивость при деформациях, регулируются в асфальтобетонном слое конструкции за счет композиций с полимерами и их разновидностями (каучуками, резины, эластомерами). Для этих целей рекомендуется использовать, например, отечественную модифицирующую добавку «Векторуббер» [9], которая производится на основе резиновой крошки и специальных полимеров, обладает всеми свойствами полимерно-дисперсного армирования асфальтобетона и является более экономичной по сравнению с зарубежными аналогами. Кроме того, каучуковый модификатор асфальтобетона «Векторуббер» позволит обеспечить когезионную прочность, трещиностойкость, долговечность и строительную ровность несущего слоя верхнего строения пути в широком диапазоне температур и эксплуатационных нагрузок от высокоскоростного транспорта. Предложения по устройству несущего слоя из модифицированного каучуком асфальтобетона рекомендованы ОАО «Скоростные магистрали» при вариантном проектировании ВСМ Москва — Казань — Екатеринбург.

На линиях ВСМ для защиты БВСП от неблагоприятных внешних климатических воздействий и профилактики пылеобразования, а также для предотвращения поверхностной коррозии бетона можно рекомендовать такую дополнительную операцию по содержанию пути, как периодическая обработка поверхности катионной битумной эмульсией «Эмульдор» [10] или профилактической эмульсией на основе нефтяного связующего ПС-1 [11].

Следует отметить, что в настоящее время в России асфальтобетонные технологии уже достаточно развиты, и это создает хорошие перспективы для перехода на устройство нижнего несущего слоя верхнего строения пути ВСМ из модифицированного (дисперсно-армированного) асфальтобетона с заданными эксплуатационными характеристиками. В частности, асфальтобетон в несущем слое БВСП с каучуковым модификатором может быть использован при строительстве ВСМ Челябинск — Екатеринбург [12], что не только обеспечит повышение надежности, ровности и безопасности пути, но и будет способствовать развитию высокоскоростного железнодорожного транспорта на Урале.

## Литература

1. Научные основы организации инновационной деятельности на транспорте и в дорожном хозяйстве (теория, методология, практика) : моногр. / А. Г. Галкин, В. М. Самуйлов, В. Е. Кошкар, Е. В. Кошкар. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. 189 с.
2. 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.
3. Белозеров В. Л. Высокая скорость движения в России: возможности и перспективы // Инновационный транспорт. 2014. № 2 (12). С. 3–5. ISSN 2311–164X.
4. Пышный И. М., Козлова А. А. Будущие инновации высокоскоростного транспорта // Инновационный транспорт. 2018. № 1 (27). С. 19–22. DOI: 10.20291/2311-164X-2018-1-19-22. ISSN 2311–164X.

## References

1. Scientific foundations of the organization of innovative activities in transport and in the road economy (theory, methodology, practice) [Nauchnye osnovy organizatsii innovatsionnoy deyatel'nosti na transporte i v dorozhnom khozyaystve (teoriya, metodologiya, praktika)] : monograph / A. G. Galin, V. M. Samuylov, V. E. Koshkarov, E. V. Koshkarov. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2012. 189 p.
2. Development of theory and practice of innovation in transport and in road management [Razvitie teorii i praktiki innovatsionnoy deyatel'nosti na transporte i v dorozhnom khozyaystve] : monograph / V. M. Samuylov, E. V. Koshkarov, V. E. Koshkarov, M. A. Levchenko. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2017. 205 p.
3. Belozеров V. L. High-speed traffic in Russia: possibilities and perspectives [Vysokoskorostnoye dvizhenie v Rossii: vozmozhnosti i perspektivy] // Innotrans. 2014. No. 2 (12). Pp. 3–5. ISSN 2311–164X.
4. Pushnyi I. M., Kozlova A. A. Future innovations in high-speed transport [Budushhie innovatsii vysokoskorostnogo transporta] // Innotrans. 2018. No. 1 (27). Pp. 19–22. DOI: 10.20291/2311-164X-2018-1-19-22. ISSN 2311–164X.



5. Самуйлов В. М., Неволин Д. Г., Кошкарров 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.
6. Савин А. В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 1. С. 55–59. ISSN 2223–9731.
7. Савин А. В. Условия применения безбалластного пути : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2017. 340 с.
8. Аккерман С. Г., Мыльников М. М. Предложения по улучшению алгоритма спрямления продольного профиля // Инновационный транспорт. 2018. № 2 (28). С. 44–47. DOI: 10.20291/2311-164X-2018-2-44-47. ISSN 2311–164X.
9. Модификатор асфальтобетона Векторуббер [Электронный ресурс]. URL: <http://vectobit.ru/Vectorubber.html> (дата обращения: 09.09.2018).
10. Дмитриев В. Н., Гриневич Н. А., Кошкарров Е. В. Новые дорожные технологии и материалы : моногр. Екатеринбург : Изд-во УрГУ, 2008. 144 с.
11. СТО 47678749-002-2017. Профилактическая эмульсия. Технические условия. Екатеринбург : НИЦ «Асфальтит», 2017.
12. Петров М. Б., Журавская М. А., Кузнецов А. И. Инновационный транспортно-логистический проект «ВСМ Екатеринбург — Челябинск»: агломерационные риски и эффекты // Инновационный транспорт. 2017. № 4 (26). С. 3–10. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-4-3-10. ISSN 2311–164X.
5. Samuylov V. M., Nevolin D. G., Koshkarov V. Y. Innovative method for design and construction of high speed railroads using flexible types of structures [Innovatsionnyy metod proektirovaniya i stroitel'stva VSM s ispol'zovaniem nezhestkikh tipov konstruktсий] // Innotrans. 2016. No. 2 (20). Pp. 31–37. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-31-37. ISSN 2311–164X.
6. Savin A. V. Track design selection for high-speed traffic operations [Vybora konstruktсий puti dlya vysokoskorostnogo dvizheniya] // Vestnik VNIIZhT. 2014. No. 1. Pp. 55–59. ISSN 2223–9731.
7. Savin A. V. Conditions of ballastless track application [Usloviya primeneniya bezballastnogo puti] : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2017. 340 p.
8. Akkerman S. G., Mylnikov M. M. Suggestions for improvement of the longitudinal profile flattening algorithm [Predlozheniya po uluchsheniyu algoritma spryamleniya prodol'nogo profilya] // Innotrans. 2018. No. 2 (28). Pp. 44–47. DOI: 10.20291/2311-164X-2018-2-44-47. ISSN 2311–164X.
9. Modifier of asphalt concrete Vektorubber [Modifikator asfal'tobetona Vektorubber]. [Electronic resource]. URL: <http://vectobit.ru/Vectorubber.html> (access date: 09.09.2018).
10. Dmitriev V. N., Grinevich N. A., Koshkarov E. V. New road technologies and materials [Novye dorozhnye tekhnologii i materialy] : monograph. Ekaterinburg : Publishing House of USU, 2008. 144 p.
11. СТО 47678749-002-2017. Preventive emulsion. Technical specifications [Profilakticheskaya emul'siya. Tekhnicheskie usloviya]. Ekaterinburg : RC «Asfaltit», 2017.
12. Petrov M. B., Zhuravskaya M. A., Kuznetsov A. I. The innovative transport-logistic project «HSR Ekaterinburg — Chelyabinsk»: agglomeration risks and effects [Innovatsionnyy transportno-logisticheskiy proekt «VSM Ekaterinburg — Chelyabinsk»: aglomeratsionnye riski i efekty] // Innotrans. 2017. No. 4 (26). Pp. 3–10. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-4-3-10. ISSN 2311–164X.

Объем статьи 0,68 авторских листа

УДК 656.072

Артем Олегович Шмидт, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой»  
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ГИБКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СОСТАВНОСТИ ПОЕЗДОВ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИГОРОДНЫХ ПАССАЖИРОПОТОКОВ

Artem Olegovich Shmidt, postgraduate student, Operations Management Department,  
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Automation of flexible regulation of train formation based on suburban passenger traffic forecasting

#### Аннотация

В статье рассмотрена задача создания рациональной системы гибкого регулирования составности пригородных поездов с применением информационных технологий. Выполнен анализ существующей системы, выявлены ее недостатки, главный из которых — необоснованность заказа вагонов у моторвагонного депо. Предложена методика организации системы гибкого регулирования составности, основанная на прогнозировании пассажиропотоков с недельной детализацией и использовании средств АСУ пригородной компании. Показано, что применение методики позволит упростить процессы планирования и согласования составности, а также сократить затраты при одновременном сохранении маршрутной сети.

**Ключевые слова:** пригородные перевозки, пригородная компания, гибкое регулирование составности, прогнозирование пассажиропотока, факторный анализ, автоматизация.

#### Summary

The paper considers a problem of creating a rational system of flexible regulation of suburban train formation with the use of information technologies. The author carried out the analysis of the existing system and revealed its shortcomings. The main shortcoming is unreasonable order of cars at motive-coach depot. He offer a method of organizing flexible regulation of train formation based on passenger traffic forecasting with weekly detail and the use of suburban passenger company automatic control systems. It is shown that the use of the method proposed will simplify the processes of planning and coordination of train formation and also will reduce costs with maintaining the route network.

**Keywords:** commuter traffic, suburban passenger company, flexible regulation of train formation, passenger traffic forecasting, factor analysis, automation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-41-47

Сегодня перевозчики пассажиров пригородного сообщения работают в сложных финансово-экономических условиях. Убыточность пригородного комплекса заставляет операторов и заказчиков перевозок (региональную власть) искать пути оптимизации. Кризис пригородных перевозок 2015 г. убедительно доказал, что население нуждается в таком способе передвижения, а значит, отменять социально значимые рейсы пригородных поездов недопустимо.

Следует отметить, что некоторые регионы для сокращения субсидий на железнодорожные перевозки пошли по пути установления минимальной составности поездов с использованием не только сидячих, но и стоячих мест. Однако проезд пассажира в стоячем положении, особенно если принимать во внимание значительную по сравнению с европейскими государствами протяженность маршрутов, является недопустимым и небезопасным.

Другие регионы, например Пермский край, выбрали иной путь. Определив маршрутную сеть, они дали право перевозчику самостоятельно устанавливать рациональную составность поездов в зависимости от пассажиропотока. Такая модель, получившая название «гибкое регулирование составности пригородных поездов» [1], подходит для территорий с относительно невысоким стабильным пассажиропотоком.

До сих пор определение составности основывалось исключительно на эмпирических данных персонала пригородной компании, полученных в ходе наблюдения, а также на билетно-кассовой отчетности. Билетно-кассовая отчетность, содержащая точные сведения о количестве перевезенных пассажиров посуточно и о размере выручки, тем не менее не показывала адекватной картины по каждому конкретному поезду. Поэтому решения, принимаемые сотрудниками отдела перевозок, нельзя назвать обоснованными. Это подтверждается и практикой: в какие-то дни заказанного количества вагонов не хватает для размещения всех пассажиров на отдельных участках маршрута, либо, наоборот, предложение мест в конкретном пригородном поезде значительно превышает размер пассажиропотока.

Сегодня схема гибкого регулирования составности (рис. 1) имеет следующие существенные недостатки:

заказываемое количество вагонов не является обоснованным;

заказ утверждается моторвагонным депо на месяц и не подлежит оперативной корректировке;

составность конкретных поездов зависит от ограничений по их обороту.



Рис. 1. Схема гибкого регулирования составности

Как будет показано далее, все названные недостатки можно устранить либо сгладить. Предпосылкой для этого является поступательное развитие автоматизированной системы управления пригородной пассажирской компанией (АСУ ППК).

Уже сегодня при условии качественной работы персонала пригородной компании имеется возможность собирать адекватную базу данных о пассажирокоорреспонденциях каждого поезда каждый день. Этого удалось достичь благодаря привязке проездных документов к конкретному пригородному поезду. Привязка разовых проездных документов осуществляется в билетных кассах к ближайшему по отправлению со станции поезду, а также мобильными кассами разъездных кассиров-контролеров. После выгрузки всех данных о проданных билетах в АСУ ППК оператор группы учета и отчетности, инженер-маркетолог или руководитель может получить файл с выгрузкой данных по конкретному поезду на конкретную дату (рис. 2).

Однако, как видно на примере рис. 2, этот файл сам по себе очень громоздкий, неинформативный и сложный для восприятия. Кроме того, он не дает полного представления о динамике пассажиропотока на рассматриваемом поезде. Чтобы повысить наглядность файла, его можно свернуть с помощью инструментария Excel до шахматки корреспонденций (рис. 3).

По шахматке определяется посадка и высадка на каждом остановочном пункте, а на основании этих данных — один из наиболее важных для дальнейшего анализа параметров — густота пассажиропотока. Расчет густоты выполняется по формуле

$$\begin{aligned} A_1 &= A_{от}^H \\ A_2 &= A_1 - A_{пр}^1 + A_{от}^1 \\ A_{i+1} &= A_i - A_{пр}^i + A_{от}^i, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — густота пассажиропотока после головной и после первой станции участка, пасс.;

$A_{от}^H$  — количество пассажиров, отправленных с головной станции, пасс.;

$A_{i+1}$  — густота пассажиропотока после отправления со станции  $i$ , пасс.;

$A_{пр}^1$  и  $A_{пр}^i$  — количество пассажиров, прибывших на станцию 1 и станцию  $i$  (высадка), пасс.;

$A_{от}^1$  и  $A_{от}^i$  — количество пассажиров, отправленных со станции 1 и станции  $i$  (посадка), пасс.

Далее строится гистограмма густот пассажиропотока между всеми остановочными пунктами (рис. 4).

Гистограмма густот дает характеристику распределения пассажиропотока по маршруту следования. Максимальная из густот служит для определения рациональной составности каждого конкретного поезда исходя из условия предоставления сидячих мест всем пассажирам:

$$n_{ваг} \geq \frac{\Gamma_j}{\alpha_{исп}^i \cdot a}, \quad (2)$$

где  $n_{ваг}$  — рациональное количество вагонов в пригородном поезде;

$\Gamma_j$  — максимальная густота пассажиропотока в конкретном поезде  $j$ , пасс.

$\alpha_{исп}^i$  — коэффициент использования вместимости подвижного состава в период  $i$ ;

$a$  — среднее количество сидячих мест в одном вагоне поезда.

Недостатки, присущие АСУ ППК, не дают возможности получить истинную картину распределения пассажиропотока. Тому есть несколько причин.

1. Наличие билетов туда-обратно. Система привязывает один проездной документ и двух пассажиров к поезду, на котором клиент совершает поездку только в направлении «туда». Таким образом, менеджмент пригородной компании не обладает информацией, в каком поезде была совершена поездка в направлении «обратно».

2. Открытие продажи билетов за 10 сут до отправления пригородного поезда. При продаже за 10 сут билетный кассир не имеет возможности привязать проездной документ к конкретному поезду, если пассажир не дает полную информацию о поездке. Но так как билет действует в течение суток, указанных в нем, поездка может быть фактически совершена на каком угодно пригородном поезде по данному маршруту.

№ пп	№ поезда (направление)	Станция отправления	Станция назначения	Всего билетов	В т.ч. Платные	В т.ч. Дети	В т.ч. Федераль ные	В т.ч. Региона льные всего	В т.ч. Учащи еся	В т.ч. Железн одорожн ики	В т.ч. Военнос лужащи е	Всего пассажиров
1	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Пермь 1	4	4	0	0	0	0	0	0	4
2	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Оп Мотовил	2	1	0	0	1	0	0	0	2
3	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Оп Юбилейн	5	5	0	0	0	0	0	0	5
4	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Оп Молодеж	4	4	0	0	0	0	0	0	4
5	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Оп Камгэс	1	1	0	0	0	0	0	0	1
6	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Левшино	9	8	0	0	1	0	0	0	10
7	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Голованово	2	2	0	0	0	0	0	0	2
8	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Оп 38 км	1	0	0	0	0	1	0	0	1
9	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Оп 48 км (Ле	5	2	0	1	2	0	0	0	5
10	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Сылва	4	4	0	0	0	0	0	0	4
11	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Оп 54 км (Ле	1	0	0	1	0	0	0	0	1
12	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Оп Алебастр	7	6	0	0	1	0	0	0	9
13	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Комарихинск	19	14	0	4	1	0	0	0	20
14	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Кутамыш	1	1	0	0	0	0	0	0	1
15	6204, [ПЕРМЬ 2 - ЧУСОВСКАЯ]	Пермь 2	Калино	10	5	0	1	0	0	4	0	10

Рис. 2. Выгрузка из АСУ ППК по поезду

Поезд №6204	Пермь 2	Дзержинская	Пермь 1	Оп Славяново	Оп Мотовилиха	Оп Язовая	Оп Юбилейная	Балмошная	Оп Кислотный	Оп Молодежная	Оп Камгэс	Левшино
Пермь 2							2			6	5	8
Дзержинская												
Пермь 1												24
Оп Славяново										2		1
Оп Мотовилиха										3	1	2
Оп Язовая												
Оп Юбилейная										3		
Балмошная												
Оп Кислотный												
Оп Молодежная												1
Оп Камгэс												
Левшино												

Рис. 3. Шахматка пассажирокорреспонденций

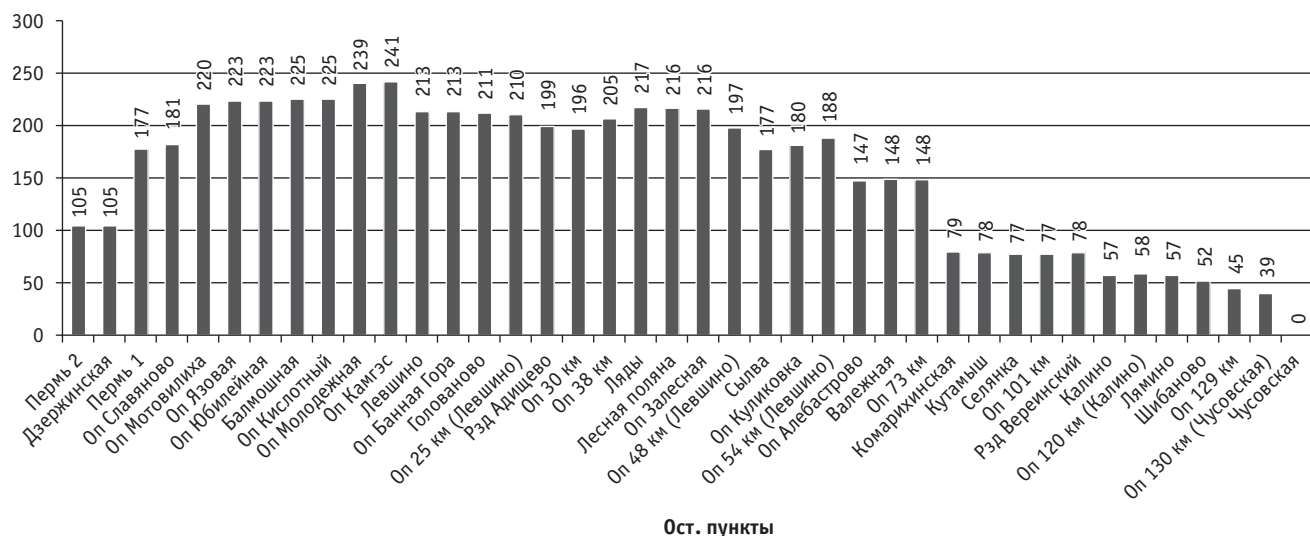


Рис. 4. Гистограмма густот пассажиропотоков, пасс.



3. Наличие абонементных билетов. В большинстве регионов такие билеты реализуются на бланках строгой отчетности без возможности привязки к конкретному поезду. Отчет о проданных абонементных билетах можно получить лишь за месяц. Количество пассажиров при этом приравнивается к суммарному количеству суток, на которые распространяет действие каждый конкретный абонементный билет.

4. Безбилетный провоз детей до пяти лет. Система таких пассажиров не учитывается.

Для получения адекватной картины необходимо принять следующие меры.

1. Организовать продажу проездных документов туда-обратно с использованием бесконтактных смарт-карт (БСК) путем записи билетов в билетных или мобильных кассах и валидацию билетов в вагонах пригородных поездов. Валидация бумажных билетов туда-обратно по штрихкоду может затруднить работу кассиров-контролеров, поэтому необходимо стимулировать пассажиров пользоваться БСК, например, при помощи программы лояльности или системы скидок.

2. Организовать продажу абонементных билетов на БСК и их валидацию мобильными кассами в конкретном поезде (рис. 5).

3. Считывать разовые проездные документы, проданные временно в стационарных билетных кассах, непосредственно в поездах, а не привязывать их к поезду при продаже.

4. Ввести категорию «дети до пяти лет» в АСУ ППК и выдавать родителям безденежный проездной документ.

Параллельно с внедрением полного и максимально точного учета пассажиров в поездах следует приступить к модернизации АСУ ППК, которая позволит прогнозировать составность в зависимости от влияющих на нее факторов. Этим будет заниматься подсистема «Аналитика», центральное место в которой отводится базе данных по поездам.

АРМ АСУ ППК по запросу оператора станет предоставлять следующую информацию по каждому конкретному поезду, которая будет отражать характеристики не только пассажиро-, но и клиентопотока:



Рис. 5. Считывание абонементных билетов в пригородных поездах

рейтинг корреспонденций; динамику выбранных корреспонденций (посуточно, по выбранным дням недели, по выбранным датам, по дням месяца); динамику выбранных корреспонденций в разрезе времени (по категориям пассажиропотока);

динамику максимальных густот пассажиропотоков (посуточно, по выбранным дням недели, по выбранным датам, по дням месяца);

корреспонденции с устойчивым трендом роста (падения) в выбранном промежутке времени;

расчет рационального количества вагонов по заданным параметрам.

Поскольку картина, отражающая реальную ситуацию в пригородных перевозках, стала формироваться совсем недавно и достоверного статистического материала не хватает, прогнозировать пассажиропоток пока затруднительно. Хотя это необходимо руководству пригородных компаний, чтобы осуществлять гибкое регулирование составности обоснованно и оперативно.

В настоящее время для прогнозирования пассажиропотока используются два основных метода — экстраполяции трендов и многофакторного анализа [2]. Согласно [3], метод экстраполяции трендов имеет существенные недостатки:

не учитывает влияния макроэкономических показателей;

может применяться только при отсутствии периодов скачкообразного изменения спроса.

Последний недостаток особенно не подходит для пригородных перевозок, которые характеризуются высокой неравномерностью во всех временных разрезах.

Чтобы строить долгосрочные и оперативные прогнозы, необходимо учитывать целый ряд факторов и их влияние на пассажиропоток [4].

В частности, ключевым фактором, от которого зависит достоверность оперативного прогноза, является температура воздуха. Ее влияние на величину пригородного пассажиропотока подтверждено не только научными исследованиями (например, [5]), но и практикой. Так, в АО «Пермская пригородная компания» сводная отчетная справка посуточно-го выполнения плана перевозок дополняется данными о температуре воздуха. За несколько месяцев наблюдений установлена взаимосвязь между температурой и пассажиропотоком.

В нашей работе [6] помимо температуры исследовалось влияние и других климатических факторов — суммарного количества выпавших за месяц осадков, процента солнечных дней в каждом конкретном месяце, средней продолжительности светлой части суток. Там же на основе полученного уравнения множественной регрессии был сделан прогноз пассажиропотока (рис. 6), высокое качество которого подтверждено коэффициентами корреляции (0,933) и детерминации (0,870). Однако анализ был выполнен по искаженным данным (помесячно) и не доведен до конца в соответствии с методикой, изложенной в [7].

По нашему мнению, в АСУ ППК необходимо вводить данные о прогнозной температуре воздуха, уровне осадков на полигоне обслуживания, а также прогнозные коэффициенты, учитывающие социально-экономические факторы конкретного региона. Определени-

ем прогнозных значений этих факторов, а также установлением степени их влияния на пригородные перевозки должен заниматься ежегодно сектор маркетинга пригородной компании. Если, например, пригородные перевозки в Пермском крае принять за региональные (аналог перевозкам дальнего следования в пределах региона), то в соответствии с [3] к перечню выше рассмотренных факторов можно добавить следующие:

численность городского населения, тыс. чел.;

численность сельского населения, тыс. чел.;

численность безработных, чел.;

средний размер назначенных пенсий, руб.;

валовой региональный продукт на душу населения;

плотность автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием (на конец года), км путей на 1000 км<sup>2</sup> территории.

После того как АСУ ППК будет доработана, схема гибкого регулирования составности изменится и приблизится к алгоритму, представленному на рис. 7.

К рис. 7 поясним формирование АСУ ППК проекта матрицы-заказа составности на последующий месяц. Матрица формируется с учетом следующих ограничений:

$$\begin{cases} n^p \geq \frac{\Gamma_{\max}^p \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_q}{\alpha_{\text{исп}} \cdot a}, & / a \\ p = 1 \dots m; & / a \\ n_{i \rightarrow j}^p = n_{j \rightarrow i}^p; & / б \\ \sum_{j=1}^l \sum_{p=1}^m n_j^p \cdot l_{\text{ваг}} + b \leq \sum_{l=1}^l L_{\text{пол}}^j; & / в \\ n^p \geq 2 \text{ или } n^p : 2 = c, c \in Z, & / г \end{cases} \quad (3)$$

где  $n^p$  — количество вагонов в поезде  $p$  при ограничении по освоению максимальной густоты или по минимальной составности (кратности);

$\Gamma_{\max}^p$  — максимальная густота пассажиропотока на поезде  $p$  маршрутной сети;

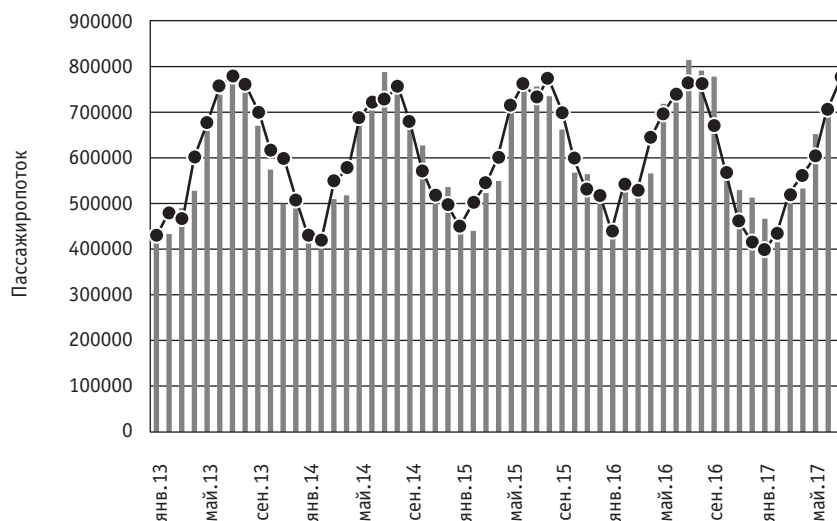


Рис. 6. Совмещенные графики прогнозного и фактического пассажиропотока по четырем факторам, пасс.:

— факт; —●— прогноз по модели

$p$  — порядковый номер поезда маршрутной сети;

$m$  — количество поездов маршрутной сети региона;

$k_1, k_2, \dots, k_q$  — поправочные коэффициенты к максимальным фактическим густотам текущего периода;

$i$  — индекс станции отправления;

$j$  — индекс станции назначения (оборота);

$n_{i \rightarrow j}^p$  — количество вагонов в поезде  $p$  от станции  $i$  до станции  $j$ ;

$n_{j \rightarrow i}^p$  — количество вагонов в поезде  $p$  от станции  $j$  до станции  $i$ ;

$n_j^p$  — количество вагонов из-под поезда  $p$  на станции оборота  $j$ ;

$l_{\text{ваг}}$  — длина вагона электропоезда, м;

$b$  — длина для безопасной установки моторвагонного подвижного состава на пути отстоя, м;

$L_{\text{пол}}^j$  — полезная длина пути (путей) отстоя на станции оборота, м.

В системе неравенств (3) обозначены следующие ограничения:

$a$  — по освоению максимальной густоты пассажиропотока;

$b$  — по обороту;

$в$  — по суммарной полезной длине путей отстоя на станции оборота;

$г$  — по минимальной составности или кратности секций.

Таким образом, при организации человеко-машинной системы прогнозирования пассажиропотока с недельной детализацией после доработки АСУ ППК будет максимально автоматизировано гибкое регулирование составности пригородных поездов на территории субъектов с относительно невысоким стабильным пассажиропотоком. Это упростит процесс планирования и согласования составности, сделает ее расчет максимально объективным и рациональным. В результате перевозчики смогут экономить затраты при сокращении вагоно-километров пробега либо поддерживать качество перевозок на базовом уровне комфорта, при котором каждому пассажиру будет предоставлено место в вагоне, обеспечено размещение ручной клади, крупногабаритных вещей, велосипедов, колясок, живности. Реализация предлагаемых мер позволит улучшить организацию пригородных перевозок, обеспечить должный уровень мобильности населения региона и придать субсидированию железнодорожного транспорта обоснованный характер.

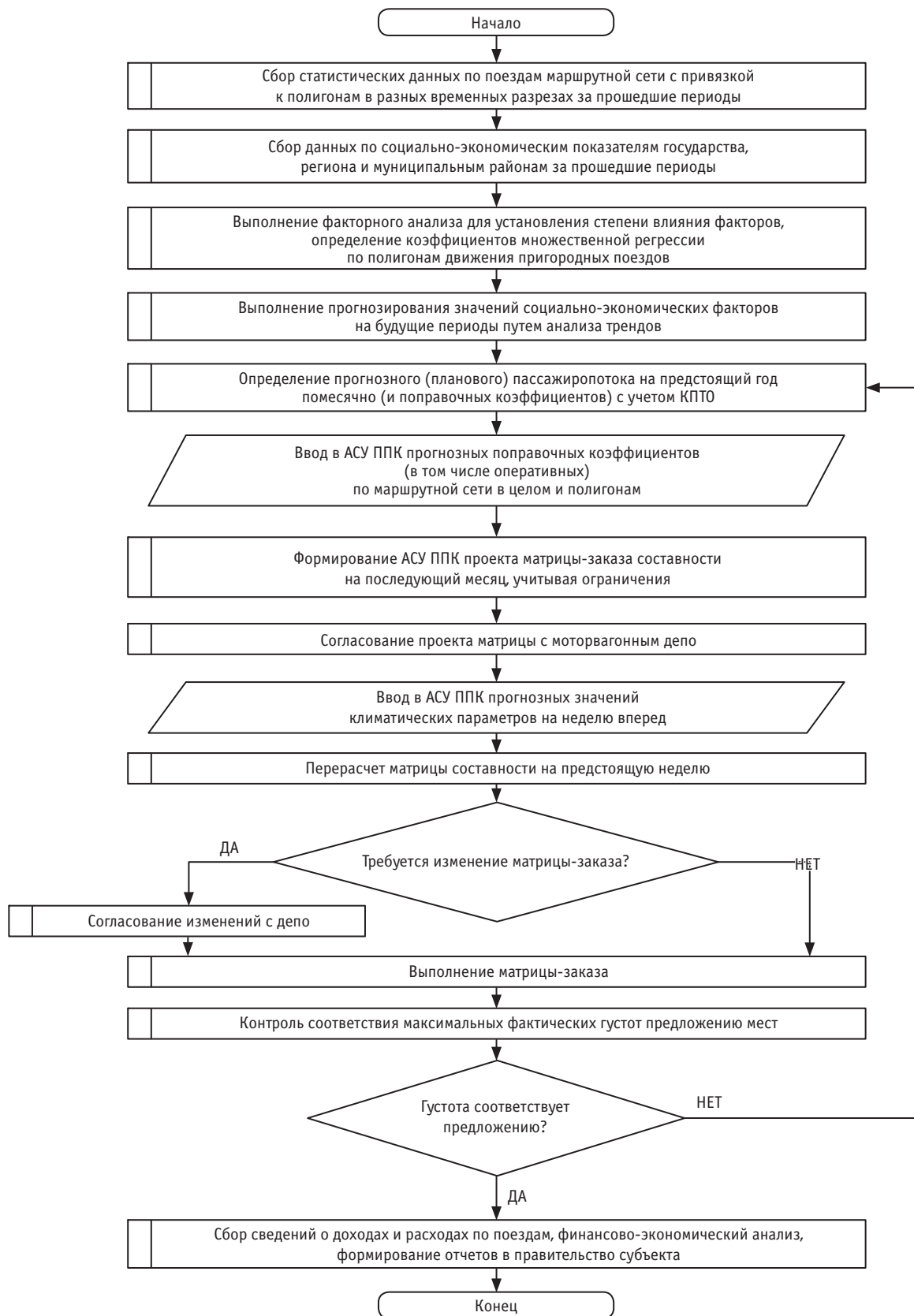


Рис. 7. Схема гибкого регулирования составности путем прогнозирования пригородных пассажиропотоков

## Литература

1. Герасимчук К. Е., Шмидт А. О. Возможность эксплуатации модульных электропоездов для пригородных перевозок в Пермском крае // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 60–65. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-60-65. ISSN 1815–9400.
2. Правдин Н. В., Негрей В. Я. Прогнозирование пассажирских потоков. Методика, расчеты, примеры. М. : Транспорт, 1980. 222 с.
3. Оценка научных результатов по прогнозированию региональных пассажирских транспортных потоков / Е. А. Макарова, К. В. Суржин, С. Б. Елизаров, С. С. Морозов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 1. С. 23–35. ISSN 2304–9642.
4. Смирнова О. Ю., Герасимчук К. Е. Подходы к анализу факторов, влияющих на пригородное сообщение // Вестник УрГУПС. 2017. № 4 (36). С. 85–95. DOI: 10.20291/2079-0392-2017-4-85-95. ISSN 2079–0392.
5. Кочнев Ф. П. Оптимальные параметры пригородных пассажирских перевозок. М. : Транспорт, 1975. 304 с.
6. Шмидт А. О. Исследование влияния климатических факторов на размеры пассажиропотока пригородным железнодорожным транспортом в Пермском регионе // Современные научные исследования: теория и практика : матер. Междунар. (заоч.) науч.-практ. конф. София, 2017. С. 113–121.
7. Тимофеева Г. А., Мартыненко А. В. Эконометрика : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2016. 111 с.

## References

1. Gerasimchuk K. E., Shmidt A. O. Possibility of modular electric trains use for commuter traffic in the Perm Region [Vozmozhnost' ekspluatatsii modul'nykh elektropoezdov dlya prigorodnykh perevozok v Permskom krae] // Transport of the Urals. 2016. No. 3 (50). Pp. 60–65. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-60-65. ISSN 1815–9400.
2. Pravdin N. V., Negrey V. Ya. Predicting passenger flows. Methods, calculations, examples [Prognozirovaniye passazhirsikh potokov. Metodika, raschety, primery]. Moscow : Transport, 1980. 222 p.
3. Assessment of scientific results on the regional passenger traffic flows forecasting [Otsenka nauchnykh rezul'tatov po prognozirovaniyu regional'nykh passazhirsikh transportnykh potokov] / E. A. Makarova, K. V. Surzhin, S. B. Elizarov, S. S. Morozov // Bulletin of Joint Scientific Council of JSC Russian Railways. 2017. No. 1. Pp. 23–35. ISSN 2304–9642.
4. Smirnova O. Yu., Gerasimchuk K. E. Approaches to the analysis of factors, influencing on suburban report [Podkhody k analizu faktorov, vliyayushikh na prigorodnoye soobshhenie] // Herald of USURT. 2017. No. 4 (36). Pp. 85–95. DOI: 10.20291/2079-0392-2017-4-85-95. ISSN 2079–0392.
5. Kochnev F. P. Optimal parameters of commuter traffic [Optimal'nye parametry prigorodnykh passazhirsikh perevozok]. Moscow : Transport, 1975. 304 p.
6. Shmidt A. O. A Study of climatic factors influence on size of suburban passenger traffic in the Perm region [Issledovanie vliyaniya klimaticheskikh faktorov na razmery passazhiropotoka prigorodnym zheleznodorozhnym transportom v Permskom regione] // Modern scientific research: theory and practice : proceedings of International scientific and practical conference. Sofia, 2017. Pp. 113–121.
7. Timofeeva G. A., Martynenko A. V. Econometrics [Ekonometrika] : textbook. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2016. 111 p.

Объем статьи 0,8 авторских листа



УДК 629.4.077:629.4.087

Владимир Афанасьевич Войтенко, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
«Микро- и наноэлектроника» Луганского национального университета имени Владимира Даля (ЛНУ), Луганск

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСКОВОГО ТОРМОЗА С ПЛАВАЮЩЕЙ ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКОЙ

Vladimir Afanasyevich Voytenko, PhD in Engineering, Associate Professor,  
Head of Micro- and Nanoelectronics Department, Lugansk Vladimir Dahl National University (LNU), Lugansk

### A study of dynamic characteristics of plate brake with floating brake shoe

#### Аннотация

Рассмотрена конструкция и принцип действия предназначенного для подвижного состава железных дорог и электропоездов метрополитена дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой. Приведена методика расчета динамических характеристик, которая позволяет сделать выбор основных геометрических размеров плавающей тормозной колодки с учетом свойств материалов фрикционной пары дискового тормоза.

Приведены графические зависимости и аппроксимационные выражения, устанавливающие связь между угловыми скоростями вращения плавающей тормозной колодки и тормозного диска при различных геометрических размерах колодки и диска и различных значениях коэффициента трения материалов фрикционной пары. Рассмотрены результаты расчетов и их соответствие данным контрольных экспериментов, а также степень влияния различных параметров конструкции и процесса торможения на динамические характеристики дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой.

**Ключевые слова:** дисковый тормоз, тормозной диск, плавающая тормозная колодка, фрикционная пара, вращающий момент, поворотная ось.

#### Summary

The paper considers the design and operation principle of a plate brake with a floating brake shoe, designed for railway rolling stock and metro multiple unit trains. The author describes a method for calculating the dynamic characteristics of a plate brake with a floating brake shoe that allows selecting the main geometrical dimensions of the floating brake shoe taking into account the friction pair materials characteristics.

Graphic dependencies and approximation expressions that establish the relationship between the rotational speed of the floating brake shoe and the brake disc for different geometrical dimensions of the floating brake shoe and the brake disc and different values of the friction coefficient are given out. The paper discusses the results of calculations and their correspondence to the results of control experiments, as well as the degree of influence of various design and braking process parameters on the dynamic characteristics of the plate brake with floating brake shoe.

**Keywords:** plate brake, brake disk, floating brake shoe, friction pair, torque, swivelling axis.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-48-52

Дисковый тормоз занимает лидирующие позиции среди других видов тормозов на высокоскоростном подвижном составе железных дорог мира. Наиболее известными зарубежными производителями дисковых тормозов являются Wabtec, Faiveley, Knorr-Bremse, Daco [1, 2]. К основным достоинствам дисковых тормозов импортного производства можно отнести высокую эффективность, надежность и безопасность, что достигается за счет элементов конструкции и узлов повышенной сложности и высокой точности, а также за счет применения высококачественных конструкционных и фрикционных материалов. Среди недостатков этих тормозов следует отметить сложность обслуживания в условиях российских железных дорог, необходимость в специализированном оборудовании для диагностики и ремонта, а также в специально подготовленном обслуживающем персонале.

Сегодня зарубежные дисковые тормоза широко применяются на высокоскоростном подвижном составе российских железных дорог, в то время как отечественный дисковый тормоз, который серийно выпускался в Твери, снят с производства. Соответственно решить проблему захвата российского рынка дисковых тормозов зарубежными производителями можно только на основе внедрения новых отечественных конкурентоспособных разработок [3–7].

По нашему мнению, существуют значительные резервы повышения эксплуатационных характеристик дисковых тормозов за счет применения плавающей тормозной колодки. Предварительные исследования дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой, проведенные автором статьи, показали преимущества новой конструкции по сравнению с традиционной [8–10]. Это в первую очередь равномерный и в среднем меньший износ рабочих поверхностей фрикционной пары, меньший уровень шума и малое искрообразование, быстрое удаление инородных сред и продуктов износа из зоны фрикционного взаимодействия, отсутствие канавок на рабочих поверхностях фрикционной пары. Перечисленные параметры во многом зависят от геометрических размеров и используемых материалов фрикционной пары. Поскольку динамические характеристики дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой наиболее полно отражают взаимосвязь параметров конструкции

и параметров процесса торможения, их изучение является актуальной научно-технической задачей.

Цель нашего исследования заключается в установлении зависимости между угловой скоростью вращения плавающей тормозной колодки и угловой скоростью вращения тормозного диска и в поиске оптимальных параметров конструкции и применяемых фрикционных материалов.

Дисковый тормоз с плавающей тормозной колодкой может работать в двух основных режимах — в зависимости от расстояния между поворотной осью колодки и ее центром масс. Так, если это расстояние больше некоторого критического, то плавающая тормозная колодка будет занимать оптимальное положение на рабочей поверхности тормозного диска, при котором сумма вращающих моментов, приложенных к колодке относительно поворотной оси, стремится к нулю. При этом плавающая тормозная колодка будет совершать колебания около оптимального положения, амплитуда которых определяется текущими условиями взаимодействия рабочих поверхностей фрикционной пары дискового тормоза. В случае если расстояние между поворотной осью плавающей тормозной колодки и ее центром масс меньше критического, колодка будет совершать непрерывное вращение вокруг поворотной оси в процессе торможения. Угловая скорость вращения плавающей тормозной колодки зависит от текущих условий взаимодействия рабочих поверхностей фрикционной пары дискового тормоза [9]. В данной работе рассмотрен случай непрерывного вращения плавающей тормозной колодки вокруг поворотной оси, проходящей через ее центр масс (рис. 1).

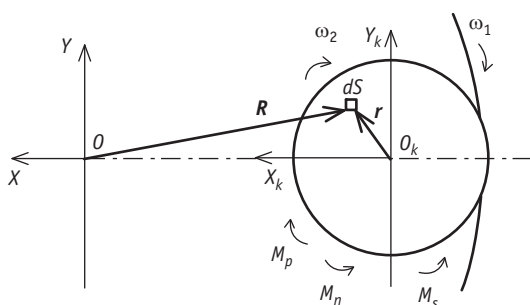


Рис. 1. Схема, поясняющая направления действия вращающих моментов на плавающую тормозную колодку

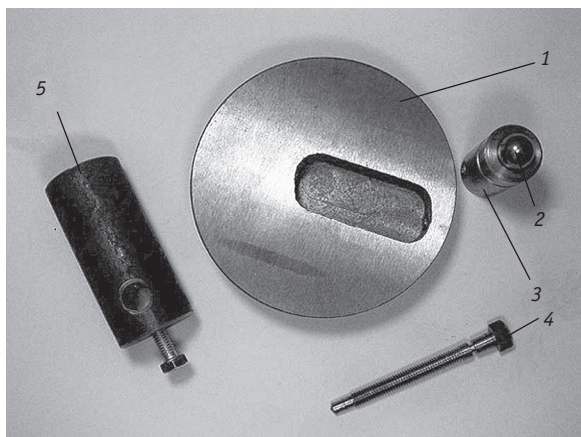
На рис. 1 показаны:  $O$  — ось вращения тормозного диска;  $O_k$  — поворотная ось плавающей тормозной колодки;  $dS$  — элемент площади рабочей поверхности фрикционной пары;  $r$  — радиус-вектор положения элемента площади  $dS$  поверхности фрикционной пары в системе координат  $X_kO_kY_k$ , связанной с поворотной осью тормозной колодки;  $R$  — радиус-вектор положения элемента площади  $dS$  поверхности фрикционной пары в системе координат  $XOY$ , связанной с осью вращения тормозного диска;  $\omega_2$ ,  $\omega_1$  — угловые скорости плавающей тормозной колодки и тормозного диска;  $M_n$  — суммарный момент сил трения, направленный противоположно вращению тормозной колодки;  $M_p$  — суммарный момент сил трения в направлении вращения тормозной колодки;  $M_s$  — момент сил сопротивления в подшипнике.

Сравнение двух основных режимов работы показывает, что именно режим вращения позволяет получить максимальные преимущества дискового тормоза новой конструкции перед традиционным дисковым тормозом. Однако постоянное вращение плавающей тормозной колодки в процессе всего торможения требует применения более дорогостоящего упорного подшипника скольжения или качения.

Методика расчета угловой скорости вращения плавающей тормозной колодки  $\omega_2$  в зависимости от угловой скорости вращения тормозного диска  $\omega_1$  с учетом параметров конструкции и параметров торможения заключается в следующем. В процессе взаимодействия рабочих поверхностей дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой на точку рабочей поверхности колодки действует сила трения, величина которой зависит от коэффициента трения, представляющего собой функцию относительной скорости точки рабочей поверхности и температуры. Действие силы трения приводит к возникновению вращающего момента относительно поворотной оси колодки. Будем считать положительными суммарные моменты  $M_p$  сил трения относительно поворотной оси плавающей тормозной колодки, совпадающие по направлению с угловой скоростью  $\omega_2$ , и отрицательными суммарные моменты  $M_n$  сил трения относительно поворотной оси плавающей тормозной колодки, направленные противоположно  $\omega_2$  (см. рис. 1). Рассчитав суммарный отрицательный момент  $M_n$  и суммарный положительный момент  $M_p$ , а также момент сопротивления  $M_s$  в подшипнике на поворотной оси плавающей тормозной колодки, проверяем, при каких угловых скоростях  $\omega_1$  и  $\omega_2$  будет выполняться равенство  $M_p = M_n + M_s$ . Получим зависимость угловой скорости вращения плавающей тормозной колодки  $\omega_2$  от угловой скорости вращения тормозного диска  $\omega_1$ , а также зависимость коэффициента трения от относительной скорости точек рабочих поверхностей фрикционной пары и температуры, определяемой тепловыми процессами в дисковом тормозе при торможении.

Адекватность результатов, полученных при помощи описанной методики расчета динамических характеристик дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой, проверялась путем сравнения с данными контрольных экспериментов. Для этого использовалась экспериментальная плавающая тормозная колодка 1 из серого чугуна марки СЧ20 с подшипником скольжения поворотной оси 3 в башмаке 5, шариком 2 упорного подшипника и возможностью изменения расстояния между поворотной осью и центром масс колодки при помощи регулировочного винта 4 (рис. 2). Также применялась плавающая тормозная колодка, содержащая упорный самоустанавливающийся подшипник, встроенный в колодку. В экспериментах использовался тормозной блок с невентилируемым тормозным диском из серого чугуна.

Зависимость коэффициента трения скольжения рабочих поверхностей фрикционной пары от угловых скоростей вращения тормозного диска  $\omega_1$  и плавающей тормозной колодки  $\omega_2$  определялась экспериментально при помощи тензорезистивного динамометра. Угловые скорости вращения тормозного диска и плавающей тормозной колодки измерялись с использованием светоотражающих меток, наклеенных на отражающие поверхности диска и колодки, оптическим тахометром.



**Рис. 2. Детали экспериментальной плавающей тормозной колодки:**

- 1 — колодка в форме диска с пазом; 2 — шарик;  
3 — поворотная ось; 4 — регулировочный винт;  
5 — башмак с подшипником скольжения

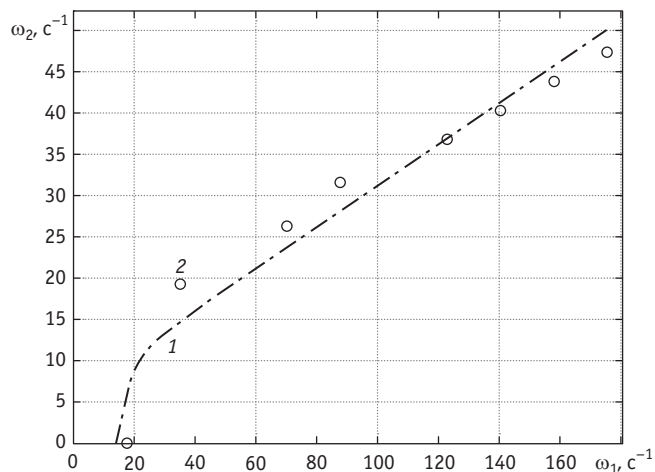
На основании сравнительного анализа расчетных данных и результатов контрольных экспериментов было установлено, что они хорошо согласуются, поэтому аппроксимационные зависимости, полученные при расчете, могут считаться достоверными. На рис. 3 в качестве примера приведены расчетная и экспериментальная зависимости угловой скорости вращения плавающей тормозной колодки от угловой скорости вращения тормозного диска.

Из рис. 3 следует, что угловая скорость вращения плавающей тормозной колодки  $\omega_2$  изменяется по линейному закону в диапазоне изменения угловых скоростей вращения тормозного диска  $\omega_1$ , составляющем 30–180 с<sup>-1</sup>. При изменении угловой скорости вращения тормозного диска  $\omega_1$  в диапазоне 16–30 с<sup>-1</sup> плавающая тормозная колодка быстро замедляется от угловой скорости 15 с<sup>-1</sup> до полной остановки, причем в диапазоне изменения угловых скоростей  $\omega_1$  тормозного диска 0–16 с<sup>-1</sup> она остается неподвижной.

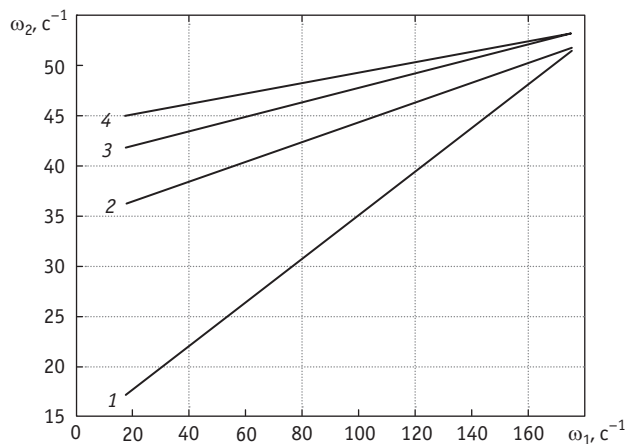
На основе предложенной методики расчета динамических характеристик дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой, а также методики линейной аппроксимации данных были получены следующие зависимости.

Зависимость угловой скорости вращения плавающей тормозной колодки  $\omega_2$  от угловой скорости вращения тормозного диска  $\omega_1$  для различных значений радиуса  $r_k$  колодки при начальном значении коэффициента трения рабочих поверхностей фрикционной пары  $\mu_0 = 0,34$ , радиусе тормозного диска  $R_d = 0,32$  м, моменте сопротивления в подшипнике поворотной оси  $M_s = 1,51$  Н·м представлена на рис. 4. При  $r_k$  менее 0,075 м  $\omega_2$  сильно зависит от  $\omega_1$ . Во всех случаях зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  носит линейный характер.

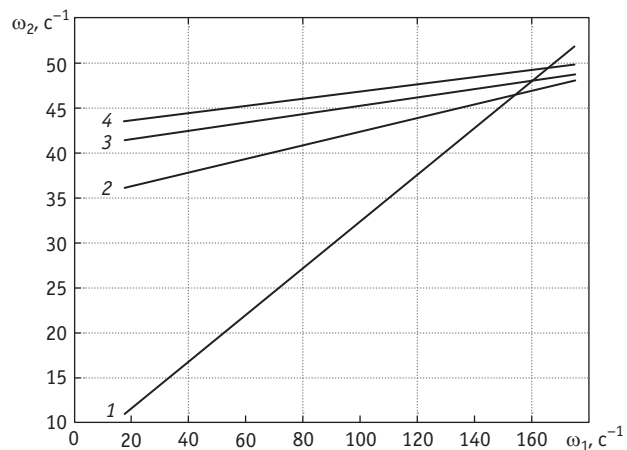
Зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  для разных значений начального коэффициента трения  $\mu_0$  при радиусе тормозного диска  $R_d = 0,32$  м, радиусе плавающей тормозной колодки  $r_k = 0,06$  м, моменте сопротивления в подшипнике поворотной оси  $M_s = 1,51$  Н·м показана на рис. 5. При начальных значениях коэффициента трения  $\mu_0$ , меньших 0,35, величина  $\omega_2$  сильно зависит от  $\omega_1$ .



**Рис. 3. Зависимости угловой скорости вращения плавающей тормозной колодки  $\omega_2$  от угловой скорости вращения тормозного диска  $\omega_1$ :**  
1 — расчет; 2 — эксперимент



**Рис. 4. Зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  для плавающей тормозной колодки разного радиуса:**  
1 —  $r_k = 0,063$  м; 2 —  $r_k = 0,075$  м; 3 —  $r_k = 0,088$  м; 4 —  $r_k = 0,1$  м



**Рис. 5. Зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  для плавающей тормозной колодки при разных значениях коэффициента трения в начале торможения:**  
1 —  $\mu_0 = 0,25$ ; 2 —  $\mu_0 = 0,3$ ; 3 —  $\mu_0 = 0,35$ ; 4 —  $\mu_0 = 0,4$

Зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  для разных значений радиуса упорного подшипника  $r_0$  при радиусе тормозного диска  $R_d = 0,32$  м, радиусе плавающей тормозной колодки  $r_k = 0,06$  м, начальном значении коэффициента трения  $\mu_0 = 0,34$  представлена на рис. 6. При радиусе упорного подшипника  $r_0$  меньше  $0,007$  м  $\omega_2$  сильно зависит от  $\omega_1$ . Оптимальным является упорный подшипник с радиусом  $r_0 = 0,009$  м, так как дальнейшее увеличение  $r_0$  слабо влияет на зависимость  $\omega_2(\omega_1)$ .

Зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  для разных значений радиуса тормозного диска  $R_d$  при радиусе упорного подшипника  $r_0 = 0,01$  м, радиусе плавающей тормозной колодки  $r_k = 0,06$  м, начальном значении коэффициента трения  $\mu_0 = 0,34$  показана на рис. 7. При радиусе тормозного диска  $R_d$  меньше  $0,267$  м угловая скорость  $\omega_2$  сильно зависит от  $\omega_1$ . Оптимальным является радиус тормозного диска  $R_d = 0,32$  м, так как дальнейшее увеличение  $R_d$  слабо влияет на  $\omega_2(\omega_1)$ , к тому же такое значение радиуса тормозного диска наиболее распространено. Это обстоятельство также свидетельствует в пользу плавающей тормозной колодки, так как замена фиксированной тормозной колодки на плавающую не потребует изменения размеров тормозного диска.

В ходе исследований было установлено, что на зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  очень слабо влияет температура рабочих поверхностей фрикционной пары и практически не оказывает влияния величина силы прижатия рабочих поверхностей. Также было установлено, что зависимости  $\omega_2(\omega_1)$  при различных комбинациях геометрических размеров и параметров дискового тормоза и плавающей тормозной колодки близки к линейным и могут быть с малой абсолютной и относительной погрешностью аппроксимированы линейной зависимостью.

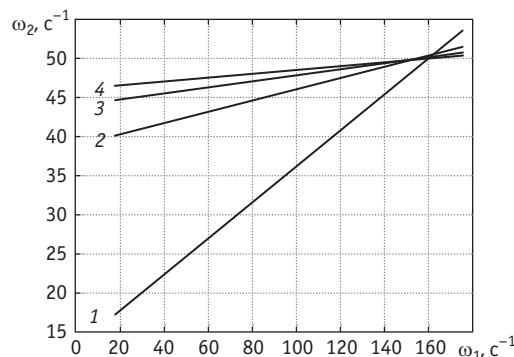


Рис. 6. Зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  для плавающей тормозной колодки при разных значениях радиуса упорного подшипника: 1 —  $r_0 = 0,006$  м; 2 —  $r_0 = 0,007$  м; 3 —  $r_0 = 0,009$  м; 4 —  $r_0 = 0,01$  м

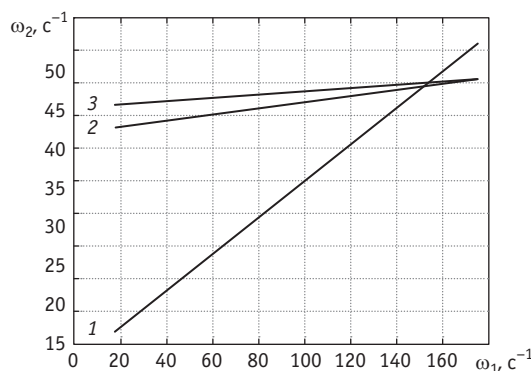


Рис. 7. Зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  для плавающей тормозной колодки при разных значениях радиуса тормозного диска: 1 —  $R_d = 0,213$  м; 2 —  $R_d = 0,267$  м; 3 —  $R_d = 0,32$  м

Таблица 1

### Результаты моделирования

Коэффициент трения фрикционной пары в начале торможения $\mu_0$	Радиус			Коэффициенты в аппроксимационном выражении $\omega_2(\omega_1)$	
	плавающей тормозной колодки $r_k$ , м	упорного подшипника $r_0$ , м	тормозного диска $R_d$ , м	$\alpha_1$ , $c^{-1}$	$\alpha_2$
0,34	0,063	0,01	0,32	13,333	0,218
	0,075			34,620	0,098
	0,088			40,585	0,072
	0,1			44,094	0,052
0,25	0,06	0,01	0,32	6,433	0,259
0,3				34,737	0,076
0,35				40,585	0,047
0,4				42,807	0,040
0,34	0,06	0,006	0,32	13,216	0,230
		0,007		38,830	0,072
		0,009		43,977	0,039
		0,010		46,082	0,024
0,34	0,06	0,010	0,213	7,135	0,279
			0,267	42,339	0,047
			0,320	46,199	0,025



Для случаев, показанных на рис. 4–7, коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в аппроксимационных выражениях  $\omega_2(\omega_1) = \alpha_1 + \omega_1 \cdot \alpha_2$  приведены в табл. 1. С использованием данных табл. 1 удобно сделать обоснованный выбор геометрических размеров дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой и материалов фрикционной пары для достижения требуемых конструктивных и эксплуатационных характеристик дискового тормоза новой конструкции.

Предложенная методика расчета динамических характеристик дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой позволяет получить достоверные результаты расчетов и аппроксимационные выражения, по которым можно осуществить выбор геометрических размеров дискового тормоза новой конструкции с учетом материалов фрикционной пары. Установлено, что зависимость угловой скорости вращения плавающей тормозной колодки от угловой скорости вращения тормозного диска при разных значениях радиусов колодки и диска, момента сопротивления на поворотной оси и коэффициента трения скольжения рабочих поверхностей фрикционной пары носит линейный

характер. Причем на зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  мало влияет температура рабочих поверхностей фрикционной пары и практически не влияет сила прижатия рабочих поверхностей. Зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  слабо выражена для материалов фрикционной пары с большим начальным коэффициентом трения скольжения (композиты на основе металлокерамики) и сильно выражена для материалов фрикционной пары с малыми начальными значениями коэффициента трения скольжения (чугун, композиты на клеевой основе). Зависимость  $\omega_2(\omega_1)$  позволяет легко управлять изменением радиуса упорного подшипника поворотной оси плавающей тормозной колодки при любой комбинации параметров дискового тормоза, что делает новый тип дискового тормоза хорошо адаптируемым под различные геометрические размеры и материалы фрикционных накладок плавающей тормозной колодки, при этом не требуется изменять конструкцию тормозного диска и клещевого механизма. Крайне важная работа упорного подшипника при сравнительно малых угловых скоростях вращения плавающей тормозной колодки обеспечит его длительный срок службы.

## Литература

1. Сипягин Е. Стратегия обновления // Гудок. 2018. 4 июля. С. 2.
2. Коппель А. Тормоз, который придумал Knorr // Гудок. 2016. 29 февр. С. 2.
3. Фрикционные тормоза для электропоезда ЭС2Г «Ласточка» / С. Г. Чув, С. А. Пополовский, П. М. Тагиев, И. Г. Юрченко // Локомотив. 2017. № 2. С. 40–43. ISSN 0869–8147.
4. Курочкин А. А., Сипягин Е. С., Мошков А. А. Создается отечественный дисковый тормоз для подвижного состава // Локомотив. 2017. № 12. С. 32–35. ISSN 0869–8147.
5. Результаты стендовых испытаний усовершенствованного клещевого механизма дискового тормоза с новыми тормозными накладками пассажирского вагона / М. В. Гудас, Г. Н. Горюнов, С. А. Сорокин и др. // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 1. С. 13–17. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-1-13-17. ISSN 2223–9731.
6. Галай Э. И. Дисковый тормоз для грузового вагона // Вагоны и вагонное хозяйство. 2017. № 1. С. 32–33. ISSN 1817–6089.
7. Мошков А. А. Разработка рациональной конструкции блока дискового тормоза для скоростных грузовых и высокоскоростных пассажирских вагонов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 217 с.
8. Войтенко В. А. Перспективные конструкции для дисковых тормозов высокоскоростных поездов // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 5 (78). С. 8–11. ISSN 1994–831X.
9. Войтенко В. А. Математическая модель трения и износа в дисковом тормозе новой конструкции // Вестник РГУПС. 2018. № 3. С. 8–15. ISSN 0201–727X.
10. Войтенко В. А. Исследование силового взаимодействия в дисковом тормозе с плавающей тормозной колодкой // Бюллетень транспортной информации. 2018. № 10 (280). С. 15–19. ISSN 2072–8115.

## References

1. Sipyagin E. Replacement Strategy [Strategiya obnoveniya] // Gudok. 2018. July, 4. P. 2.
2. Koppel' A. The brake invented by Knorr [Tormoz, kotoryy pridumal Knorr] // Gudok. 2016. February, 29. P. 2.
3. Friction brakes for the ES 2G «Lastochka» multiple-unit train [Friktsionnye tormoza dlya elektropoezda ES 2G «Lastochka»] / S. G. Chuev, S. A. Populovskiy, P. M. Tagiev, I. G. Yurchenko // Locomotive. 2017. No. 2. Pp. 40–43. ISSN 0869–8147.
4. Kurochkin A. A., Sipyagin E. S., Moshkov A. A. A domestic plate brake for rolling stock is being created [Sozdaetsya otechestvennyy diskovyy tormoz dlya podvizhnogo sostava] // Locomotive. 2017. No. 12. Pp. 32–35. ISSN 0869–8147.
5. Results of bench tests of the improved caliper mechanism of the disc brake with the new brake pads of the passenger car [Rezultaty stendovyykh ispytaniy usovershenstvovannogo kleshhevogo mekhanizma diskovogo tormoza s novymi tormoznymi nakladkami passazhirskogo vagona] / M. V. Gudas, G. N. Goryunov, S. A. Sorokin, et al. // Vestnik VNIIZhT. 2018. Vol. 77. No. 1. Pp. 13–17. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-1-13-17. ISSN 2223–9731.
6. Galay E. I. Plate brake for a freight car [Diskovyy tormoz dlya грузового vagona] // Railway Cars and Carriage Equipment. 2017. No. 1. Pp. 32–33. ISSN 1817–6089.
7. Moshkov A. A. Development of rational design of plate brake unit for high-speed freight and passenger cars [Razrabotka ratsional'noy konstruktssii bloka diskovogo tormoza dlya skorostnykh gruzovykh i vysokoskorostnykh passazhirskikh vagonov] : PhD in Engineering Thesis. M., 2014. 217 p.
8. Voytenko V. A. Perspective designs of plate brakes for high-speed trains [Perspektivnye konstruktssii dlya diskovykh tormozov vysokoskorostnykh poezdov] // Transport of the Russian Federation. 2018. No. 5 (78). Pp. 8–11. ISSN 1994–831X.
9. Voytenko V. A. Mathematical model of friction and wear in the disk brake of the new construction [Matematicheskaya model' treniya i iznosa v diskovom tormoze novoy konstruktssii] // Vestnik RGUPS. 2018. No. 3. Pp. 8–15. ISSN 0201–727X.
10. Voytenko V. A. A study of force interaction in plate brake with floating brake shoe [Issledovanie silovogo vzaimodeystviya v diskovom tormoze s plavayushhey tormoznoy kolodkoy] // Bulletin of Transport Information. 2018. No. 10 (280). Pp. 15–19. ISSN 2072–8115.

Объем статьи 0,62 авторских листа

УДК 629.423

Кирилл Иванович Доманов, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Юрий Александрович Хлобыстов, заместитель технического директора по сертификации и испытаниям ООО «Первая Локомотивная Компания» (ООО «ПЛК»), Энгельс, Россия

## ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПОДКОНТРОЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЯГОВЫХ И СЦЕПНЫХ СВОЙСТВ ГРУЗОВОГО ЭЛЕКТРОВОЗА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ НА УЧАСТКАХ ЮЖНО-УРАЛЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Kirill Ivanovich Domanov, postgraduate student, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Yuriy Alexandrovich Khlobystov, Deputy Technical Director for certification and testing, LLC First Locomotive Company (LLC FLC), Engels, Russia

## Evaluation of the results of controlled operation to determine the tractor and coupler properties of the load electric power of double power on the sites South Ural Railway

### Аннотация

Повышение эффективности перевозочного процесса неразрывно связано с усовершенствованием тягового подвижного состава. В частности, внедрение в эксплуатацию двухсистемных электровозов позволит сократить эксплуатируемый парк локомотивов, количество участков обслуживания в результате их удлинения, число пунктов смены локомотивных бригад, время следования грузовых поездов за счет безостановочного проследования стыковых станций, электрифицированных на постоянном и однофазном переменном токе, и организовать управление движением подвижного состава по принципам полигонных технологий.

В статье рассмотрены основные результаты подконтрольной эксплуатации двухсистемного электровоза нового поколения на участках Южно-Уральской железной дороги и проанализированы его преимущества по сравнению с электровозами, которые используются на этих участках в настоящее время.

**Ключевые слова:** двухсистемный электровоз, подконтрольная эксплуатация, опытные поездки, сила тяги, сила сцепления.

### Summary

Improving the efficiency of the transportation process is inextricably linked with the improvement of traction rolling stock. When two-system electric locomotives are put into operation, it will be possible to reduce the fleet of locomotives in operation, the number of traction arms due to their lengthening and the number of locomotive change points, to reduce the time of freight trains, due to the technical possibility of non-stop tracing of butt electrified stations in the organization control of the movement of rolling stock on the principles of ground technologies. It has promising possibilities for replacing outdated locomotives of alternating and permanent types of current.

The paper describes the main results of the controlled operation of a two-system electric locomotive of a new generation. The analysis, which showed its advantages in operation in comparison with electric locomotives currently operating in these areas, was carried out.

**Keywords:** two-system electric locomotive, controlled operation, experienced trips, traction force.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-53-57

**В** «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» отражены основные проблемы, характерные для локомотивного эксплуатационного хозяйства в прошлом десятилетии: отсутствие серийного производства магистральных грузовых электровозов постоянного тока, магистральных грузовых тепловозов, двухсистемных электровозов и локомотивов с асинхронным тяговым приводом [1].

Перед локомотивостроительными предприятиями тогда были поставлены задачи, которые представляли собой серьезный вызов. Как результат, сегодня производятся новые грузовые магистральные электровозы постоянного тока с коллекторным тяговым двигателем серии 2ЭС6, Брянский машиностроительный завод продолжает сборку секций первого российского грузового магистрального тепловоза с электрической передачей переменного-постоянного тока и коллекторным тяговым двигателем 2ТЭ25КМ. Проблема отсутствия локомотивов с асинхронным тяговым приводом была решена за счет создания Группой Синара при участии немецкого концерна Siemens («Уральские локомотивы») грузовых магистральных электровозов постоянного тока 2ЭС10 и успешного внедрения их в эксплуатацию [2].

Но одна из отмеченных в [1] задач — серийное производство и внедрение в эксплуатацию грузовых двухсистемных электровозов — так и не получила своего технического решения и остается важным

стратегическим направлением развития локомотивного комплекса. До сих пор на Кавказской и Октябрьской железных дорогах России, а также на Южной железной дороге на Украине эксплуатируются магистральные грузовые двухсистемные электровазы ВЛ82М, которые были построены на Новочеркасском электровазостроительном заводе в 1979 г. В связи с достаточно продолжительной эксплуатацией жизненный цикл этих электровазов завершился, но современной альтернативы по их замене в компании ОАО «РЖД» нет.

Тем не менее проблема может быть решена путем внедрения в эксплуатацию магистрального грузового двухсистемного электроваза 2ЭВ120 нового поколения, способного безостановочно проследовать стыковые станции. Электроваз разработан ООО «Первая Локомотивная Компания» совместно с Bombardier Inc. (отделение Bombardier Transportation в России), его производство осуществляет Энгельсский локомотивостроительный завод. В табл. 1 приведен анализ технических параметров электроваза 2ЭВ120 и электровазов, эксплуатируемых на участке, где проводилась подконтрольная эксплуатация [3].

Особенностью электроваза 2ЭВ120 является оптимальное управление тяговыми моментами с распределением тягового усилия между осями колесно-моторных блоков. При проскальзывании колесных пар поосное регулирование силы тяги стремится обеспечить стабильную силу тяги электроваза на заданном контроллере машиниста уровне. В системе автоматической защиты колесных пар от боксования и юза песок не используется и может подаваться по усмотрению машиниста тремя способами:

от кнопки на пульте управления с подсыпкой под все передние колесные пары тележек электроваза;

ножной педалью с пневматическим клапаном и подсыпкой под первую по ходу движения колесную пару;

выбором одного из трех режимов импульсной подачи песка с подсыпкой под 1-ю, 3-ю, 5-ю, 7-ю колесные пары по ходу движения. Импульсная подсыпка имеет параметрические заданные интервалы времени включения вентилей песка и паузы между импульсами. Разрешением на пескоподачу является реализация тяговой нагрузки электроваза свыше 50 %.

Подконтрольная эксплуатация проходила на участках обращения железнодорожного подвижного состава Челябинск — Картамы — Магнитогорск Южно-Уральской железной дороги в четном и нечетном направлениях в составе тяговой единицы грузовых поездов с массой 7000 т включительно. Опытные поездки осуществлялись преимущественно в благоприятных по сцеплению колес с рельсами условиях. Электроваз реализовывал до 100 % своей тяговой нагрузки. Бустерный режим, увеличивающий силу тяги электроваза в диапазоне скоростей до 48 км/ч, не использовался. На участках пути с пониженным коэффициентом сцепления были ситуации, когда заданная контроллером машиниста сила тяги не реализовывалась. Снижение тягового момента на осях ограничивало проскальзывание колесных пар со скоростями скольжения до 8 км/ч, в результате возникала необходимость подачи песка, который, в свою очередь, повышал коэффициент сцепления и позволял реализовывать электровазу требуемую силу тяги.

В ходе подконтрольной эксплуатации было установлено, что использование режима импульсной автоматической подачи песка и особенность работы главных компрессоров с выдержкой повторного их включения через 2 мин приводило к истощению питательной магистрали и снижению давления с 0,9 до 0,7 МПа за интервал времени от 60 до 90 с. В зоне пониженного давления питательной магистрали кратковременные импульсы песка понижали давление в трубопроводе с встроенным в нее датчиком давления ниже 0,61 МПа, что распознавалось системой управления как сигнал для отключения тяговой нагрузки. Во время движения электроваза с составом на руководящих подъемах неоднократно были отмечены случаи срабатывания защиты силовых цепей, что приводило к отключению цепи электрической тяги. Также выявлено, что нажатие на пневматический клапан подачи песка под переднюю колесную пару импульсно снижал давление в трубопроводе с манометром на пульте управления в диапазоне 0,02–0,04 МПа. Сигнал расположенного в этом же трубопроводе датчика давления распознавался системой управления как команда на отключение тяговой нагрузки преобразователей. По этой причине режимы автоподдачи песка с более длительными интервалами времени практически не использовались. Подача песка осуществлялась от кнопки и ножной педали.

Таблица 1

Параметры электровазов при движении тяговой единицей в составе в режиме тяги на подъемах крутизной 8 ‰

Серия электроваза	Параметры								
	$U_3$ , кВ	$n_{\text{ол}}$	$m_{\text{л}}$ , т	$V_{\text{max}}$ , км/ч	$P_{\text{эдсч}}$ , кВт	$F_{\text{касч}}$ , кН	$V_{\infty}$ , км/ч	$m_{\text{с}}$ , т	$a_{\text{эд}}$ , кВт·ч / $10^4$ т·км
ВЛ10	3	8	184	100	4920	319	51,2	3285	292,5
2ЭС6	3	8	200	120	6420	418	51,0	4355	289,1
2ЭС10	3	8	200	120	9130	538	56,2	5625	288,8
ВЛ80С	25	8	192	110	6560	400	54,4	4143	291,0
2ЭВ120	3/25	8	200	120	10000	600	52,8	6336	298,9

Примечание.  $U_3$  — номинальное напряжение на токоприемнике,  $n_{\text{ол}}$  — количество осей электроваза,  $m_{\text{л}}$  — масса электроваза,  $V_{\text{max}}$  — максимальная (конструкционная) скорость,  $P_{\text{эдсч}}$  — номинальная электрическая мощность тяговых двигателей,  $F_{\text{касч}}$  — номинальная касательная сила тяги,  $V_{\infty}$  — номинальная скорость,  $m_{\text{с}}$  — масса состава,  $a_{\text{эд}}$  — удельный расход электроэнергии.

Наиболее показательной по реализации тяговых свойств в неблагоприятных условиях стала опытная поездка на участках Челябинск — Карталы — Магнитогорск в нечетном направлении и Магнитогорск — Карталы в четном направлении. Выпадение снега на рельсы, местами снежная метель при температуре окружающей среды  $-3^{\circ}\text{C}$  позволили оценить сцепные свойства электровоза на пределе по сцеплению.

Во время опытных поездок было установлено, что наибольшая реализация силы тяги электровоза наблюдалась на перегоне Челябинск — Синеглазово в начале движения поезда на расчетном подъеме 6,3 ‰ при образовании снега на рельсах. На рис. 1 представлен график скорости движения поезда с учетом времени хода. При заданной силе тяги на секцию 350 кН ( $F_{\text{к max}} = 700$  кН) и при использовании песка реализовано 250 кН (500 кН), т.е. на 30 % меньше заданной величины. Скорость движения поезда по ст. Синеглазово после подъема составила 75 км/ч при разрешенной скорости проследования 80 км/ч.

Скорость движения на перегоне протяженностью 10 км Золотая Сопка — Магай в нечетном направлении с расчетным подъемом этого участка диапазоном крутизны 5–6,4 ‰ при входе на подъем составила 68 км/ч, в середине подъема изменялась от 63 до 65 км/ч, а на выходе с подъема достигла 73 км/ч. Заданная и реализованная сила тяги (рис. 2) в начале подъема на секцию была равна 200 кН, в середине — 260 кН. Сила тяги в диапазоне скоростей свыше 50 км/ч ограничивалась тяговой характеристикой номинального режима работы электровоза [4].

Анализ опытных поездок двухсекционного двухсистемного электровоза 23В120 в сравнении с электровозом постоянного тока в трехсекционном исполнении ВЛ10К показал, что при следовании на выходе с расчетного подъема на перегоне Золотая Сопка — Магай скорость электровоза 1,5ВЛ10К составляет 62–65 км/ч, т.е. на 10 км/ч ниже, чем у 23В120 [5]. На других подъемах участка Челябинск — Карталы — Магнитогорск в четном и нечетном направлениях скорость движения поездов массой 6500–7000 т с электровозом 23В120 была выше

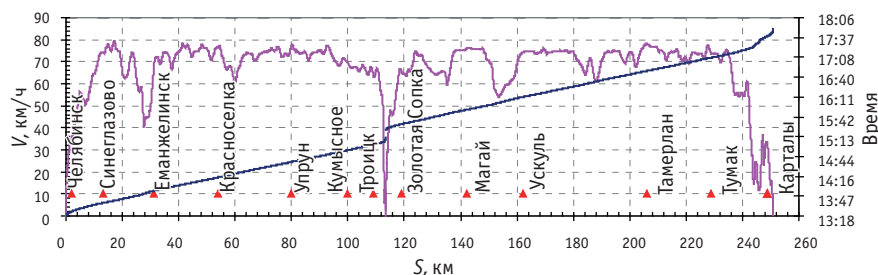


Рис. 1. Скорость движения электровоза 23В120 тяговой единицей в составе с учетом времени хода на участке Челябинск — Карталы

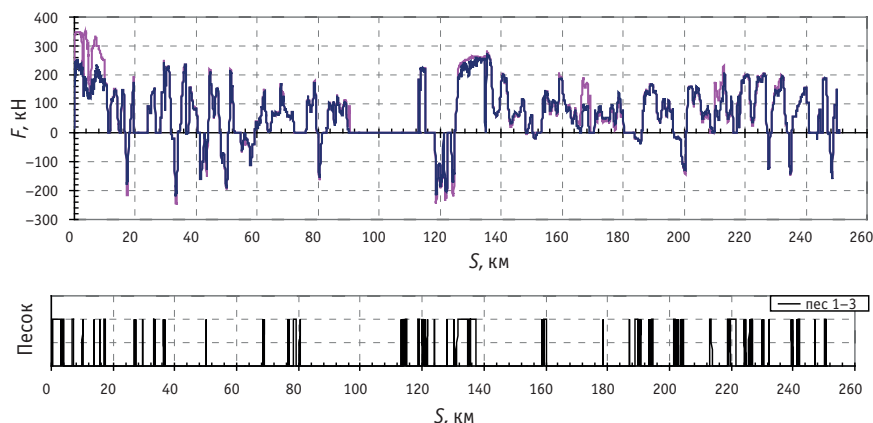


Рис. 2. Заданная и реализованная сила тяги двухсекционного электровоза и использование песка на участке Челябинск — Карталы:  
—  $F$  заданная; —  $F$  реализованная

на 5–10 км/ч, чем скорость с электровозом 1,5ВЛ10К.

При анализе результатов опытной поездки в наиболее неблагоприятных условиях сцепления колеса с рельсом (снег на рельсах, сильный ветер) первой по ходу секции локомотива получены значения скорости проскальзывания четырех колесных пар (рис. 3).

На участке Карталы — Челябинск четного направления относительное время проскальзывания колесных пар локомотива  $T_{\text{л}}$  составило 5,74 %, относительный путь, пройденный колесными парами локомотива  $S_{\text{л}}$  за счет проскальзывания, — 2,23 %, а относительное время подачи песка  $T_{\text{п}}$  — 0,02 %. В нечетном направлении того же участка значения этих относительных показателей были равны 15,11; 5,23 и 0,04 % соответственно.

На участке Карталы — Магнитогорск нечетного направления относительное время проскальзывания колесных пар локомотива составило 6,29 %, относительный путь, пройденный колесными парами локомотива за счет проскаль-

зывания, — 1,75 %, относительное время подачи песка — 0,05 %, а в нечетном направлении того же участка — соответственно 4,69; 1,04 и 0,05 %.

В ходе подконтрольной эксплуатации на Южно-Уральской железной дороге была проведена опытная поездка с троганием перед подъемом и на расчетном подъеме в четном направлении перегона Золотая Сопка — Троицк поезда массой 6684 т (296 осей, 71 вагон). Масса опытного поезда на 184 т больше нормативной массы 6500 т, установленной на этом участке для трехсекционных электровозов ВЛ10 [6]. Тяговой единицей опытного поезда был двухсекционный электровоз 23В120. Реализованная сила тяги электровоза при трогании на ст. Золотая Сопка составила от 220 до 350 кН на секцию при заданной силе тяги 350 кН. Проскальзывание колесных пар автоматически снижало реализованную силу тяги. Максимальное скольжение колесных пар достигало 8 км/ч. При следовании локомотива по опытному участку производились замеры



скорости на поверхности катания колесных пар секции электровоза, первой по ходу движения (рис. 4). Также был проведен эксперимент на 112 км пк 8 перегона Золотая Сопка — Троицк без предварительной профилактической подсыпки песка перед остановкой. Во время начала

движения на подъем с момента полной остановки поезда в кривой (с максимальными продольными усилиями в составе, с включенными тормозами, с электровозом 23В120 и вспомогательным локомотивом 1,5ВЛ10ТК) максимальная заданная сила тяги в бустерном режиме была

равна 380 кН и реализована до момента первых срывов сцепления колес с рельсами. Из-за проскальзывания колесных пар на месте тяговое усилие ограничивалось на уровне 300 кН. Трогание с места и последующий разгон осуществлялись после подключения тягового усилия вспомогательного электровоза и развития скорости 2 км/ч. Дальнейшее движение и разгон поезда с реализацией тягового усилия одним двухсекционным электровозом 23В120 происходили с положительным ускорением и достижением скорости движения перед входным светофором ст. Троицк, равной 32 км/ч.

В целом при подконтрольной эксплуатации двухсистемный электровоз 23В120 показал удовлетворительную работоспособность на участках постоянного и переменного тока. В ходе испытаний не выявлено сбоев в работе оборудования, отказов технических систем локомотива, влияющих на безопасность движения. Опытными поездками подтверждены тяговые и сцепные свойства электровоза при вождении грузовых поездов установленной массы. Электровозом 23В120 проведены грузовые поезда массой, рассчитанной на трехсекционные локомотивы серий ВЛ10 и ВЛ80С. Эксперименты на подъеме перед ст. Золотая Сопка в сторону ст. Троицк в четном направлении показали, что электровоз 23В120 с поездом массой 6684 т смог без подталкивающего локомотива в хвосте тронуться с места, разогнаться и выйти из подъема со скоростью более 50 км/ч. Реализованные тяговые усилия при трогании с места на расчетном подъеме на 112 км 8 пк перегона Золотая Сопка — Троицк в четном направлении подтвердили хорошие тяговые и сцепные свойства электровоза 23В120 и возможность его безостановочного движения с поездом массой 6500 т. Сцепные свойства электровоза с распределением тягового усилия по осям позволили осуществить силу тяги с малой интенсивностью подачи песка. По завершении испытаний на выбранном участке запас песка составил 66 %, т.е. 0,9 м<sup>3</sup> из 1,38 м<sup>3</sup> на секцию, что свидетельствует о его экономичном расходе. Таким образом, экспериментальные поездки показали возможность реализовать высокие сцепные свойства двухсистемного электровоза 23В120 в эксплуатации с грузовыми поездами.

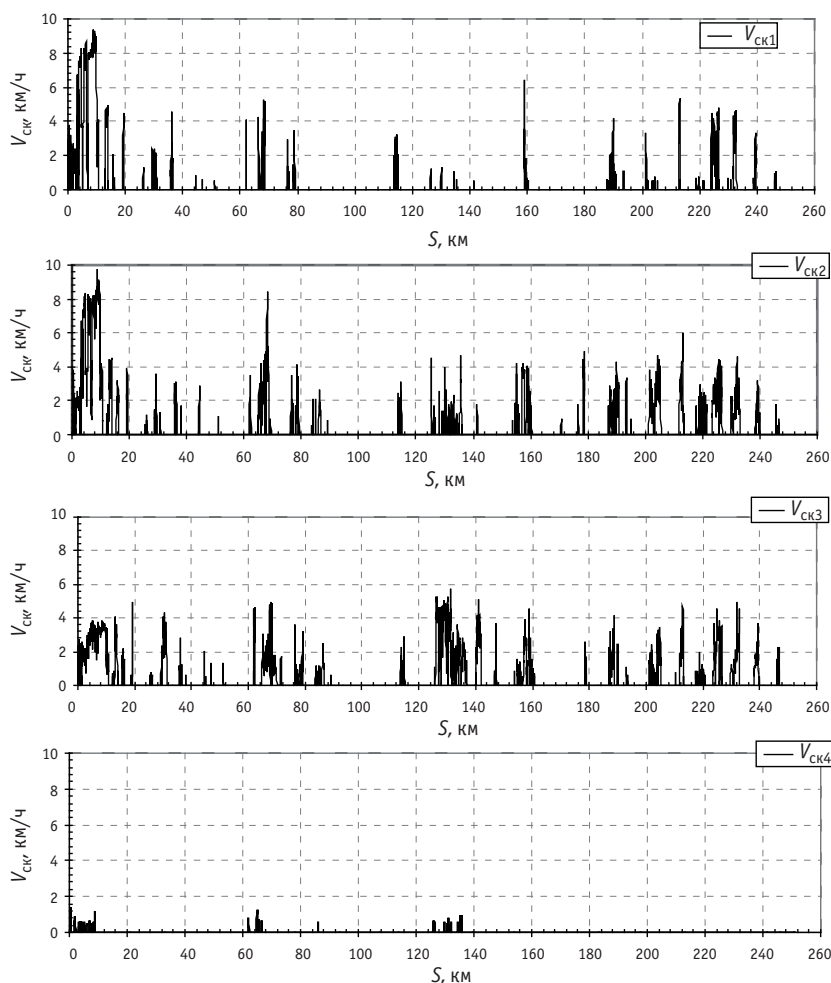


Рис. 3. Скорости скольжения колесных пар первой по ходу движения секции электровоза 23В120 на участке Челябинск — Карталы:

$V_{ск1}$ ,  $V_{ск2}$ ,  $V_{ск3}$  и  $V_{ск4}$  — соответственно скорость скольжения первой, второй, третьей и четвертой колесной пары испытуемой секции электровоза

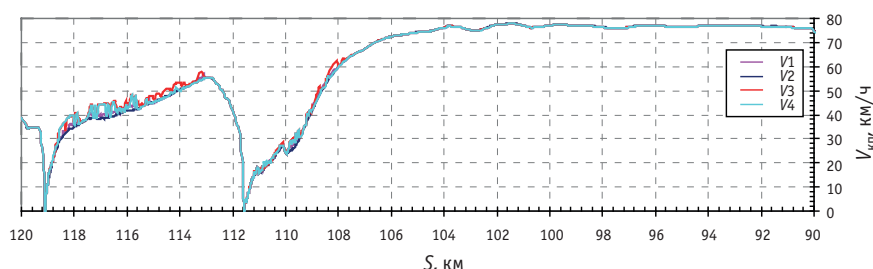


Рис. 4. Скорость на поверхности катания колесных пар первой по ходу движения секции электровоза 23В120

## Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р // Собрание законодательства Российской Федерации. 21.07.2008. № 29. Ч. II. Ст. 3537.
2. «Уральские локомотивы» [Сайт]. URL: <http://ulkm.ru/produkcija/> (дата обращения: 11.04.2018).
3. Бакланов А. А., Есин Н. В., Шилияков А. П. Возможности применения двухсистемных электровозов на железных дорогах Урало-Сибирского региона // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : матер. науч.-практ. конф. / ОмГУПС. Омск, 2016. С. 22–28.
4. Опытные рейсы электровоза 2ЭВ120–001 // Локомотив. 2016. № 7 (715). С. 39. ISSN 0869–8147.
5. Исследование тяговых возможностей двухсистемного электровоза 2ЭВ120 для эксплуатации на полигоне Кузбасс — Центр / В. Ю. Пермикин, Э. В. Васильев, А. В. Малахов и др. // Транспорт Урала. 2017. № 3 (54). С. 41–48. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-41-48. ISSN 1815–9400.
6. Тимухина Е. Н., Пермикин В. Ю., Касеева 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. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 [Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation of 17.06.2008 No. 877-r // Collection of Legislative Acts of the Russian Federation. 21.07.2008. No. 29. Part. II. Paper 3537.
2. «Ural Locomotives» [«Ural'skie lokomotivy»] [Site]. URL: <http://ulkm.ru/produkcija/> (access date: 11.04.2018).
3. Baklanov A. A., Esin N. V., Shilyakov A. P. Possibilities of using two-system electric locomotives on the railways of the Ural-Siberian region [Vozmozhnosti primeneniya dvukhsistemnykh elektrovovozov na zheleznykh dorogakh Uralo-Sibirskogo regiona] // Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction : materials of science and practical conference / OSTU. Omsk, 2016. Pp. 22–28.
4. Experimental routes of electric locomotive 2EV120–001 [Opytnye reysy elektrovvoza 2EV120–001] // Locomotive. 2016. No. 7 (715). Pp. 39. ISSN 0869–8147.
5. The research of traction capabilities of a two-system electric locomotive 2EV120 for operation at the Kuzbass-Center testing polygon [Issledovanie tyagovykh vozmozhnostey dvukhsistemnogo elektrovvoza 2EV120 dlya ekspluatatsii na poligone Kuzbass — Tsent] / V. Yu. Permikin, E. V. Vasilyev, A. V. Malakhov, et al. // Transport of the Urals. 2017. No. 3 (54). Pp. 41–48. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-41-48. ISSN 1815–9400.
6. Timukhina E. N., Permikin V. Yu., Kasheeva N. V. The identification method of limited railway stations for passing of heavy trains on the rough road [Metod vyyavleniya limitiruyushhih zheleznodorozhnykh stantsiy dlya propuska tyazhelovesnykh poezdov na poligone dorogi] // Transport of the Urals. 2017. No. 1 (52). Pp. 40–44. DOI : 10.20291/1815-9400-2017-1-40-44. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,58 авторских листа

УДК 658.5.011

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

## КЛАССИФИКАЦИЯ РИСКОВ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ ВАГОНОВ НА МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫХ СТЫКОВЫХ ПУНКТАХ

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

## Classification of risks in maintenance of cars at interstate division points

### Аннотация

В статье рассмотрены основные виды рисков и их влияние на эксплуатацию и инфраструктуру железнодорожного транспорта. Предложена классификация технических рисков при обслуживании грузовых вагонов на межгосударственных стыковых пунктах.

**Ключевые слова:** опасность, риск, виды рисков, железнодорожный транспорт, техническое обслуживание, вагон, межгосударственный стыковой пункт, технический риск, классификация рисков.

### Summary

The paper considers the main types of risks and their impact on train operation and infrastructure of the railway transport. A classification of technical risks in maintenance of freight cars at interstate division points is offered.

**Keywords:** hazard, risk, type of risk, railway transport, maintenance, car, interstate division point, technical risk, classification of risks.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-58-62

**Ж**елезнодорожный транспорт подвержен воздействию целого комплекса внешних и внутренних факторов, в том числе таких, которые могут стать причиной опасных событий, способных нанести вред объектам инфраструктуры и подвижному составу [1].

Для изучения процесса возникновения опасности и формирования риска используется общая схема, представленная на рис. 1 [2].

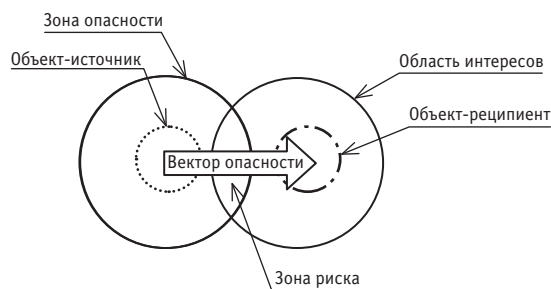


Рис. 1. Схема возникновения опасности и формирования риска

Применительно к железнодорожному транспорту эту схему можно интерпретировать следующим образом:

объектами-источниками могут быть экологически вредные выбросы при эксплуатации подвижного состава, перевозящего опасные грузы, падение узла или детали на путь при движении на перегоне, техническая неисправность и др.;

объектами-реципиентами выступают окружающая среда, человек как социальный объект, компания — собственник подвижного состава, понесшая финансовые убытки в связи с внеплановым ремонтом детали или узла вагона, и т.д.;

соответственно зонами опасности могут быть процесс перевозок и окружающая среда;

областью интересов выступает безопасность функционирования систем железнодорожного транспорта и инфраструктуры;

зоной риска может быть такая вероятность отказа вагона, в результате которой будет нарушен график движения поезда.

Таким образом, главными задачами при управлении рисками на железнодорожном транспорте являются:

- выявление их допустимого уровня;
- поддержание безопасности, надежности и функциональности системы технического обслуживания вагонов в пределах нормы;
- снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций;
- предотвращение производственного травматизма и гибели людей;
- предупреждение возможных потерь и ущерба имуществу ОАО «РЖД»;
- защита окружающей среды от воздействия неблагоприятных факторов [2].

Рассмотрим виды рисков, характерные для железнодорожного транспорта в целом и для вагонного хозяйства в частности.

**Экономические** — это риски, обусловленные экономическими тенденциями и способные существенно ослабить позиции железнодорожной отрасли. К ним, например, относятся финансовые потери практически всех участников, инвестирующих в перевозку грузов. Наиболее часто такие финансовые потери связаны с технологическими простоями вагонов на станциях технического обслуживания и ремонта по причине несвоевременной платы заказчика (собственника вагона) за обслуживание и/или ремонт детали либо узла вагона.

К **социологическим** относятся риски, связанные с человеческим фактором. Например, отток высококвалифицированных кадров из железнодорожной отрасли, снижение профессионального уровня специалистов, занимающихся техническим обслуживанием и ремонтом вагонов.

**Природно-климатические** — это риски, обусловленные воздействием на железнодорожную инфраструктуру обстоятельств непреодолимой силы. Например, обильный снегопад может стать причиной возникновения незапланированных технологических «окон» для расчистки путей и привести к простоям вагонов.

К **информационным** относятся риски, содержащие угрозу для информационной безопасности и, как следствие, для функционирования структур и предприятий ОАО «РЖД».

**Технические** — риски, возникновение которых сопровождается некачественным техническим обслуживанием объектов инфраструктуры и подвижного состава, отказом в работе средств технической диагностики и т.п. Например, из-за того что на подходе к станции не работает комплекс технических средств диагностирования, могут быть не выявлены перегрев буксового узла, разность диаметров колес на одной оси, ненормированная толщина гребня и т.д.

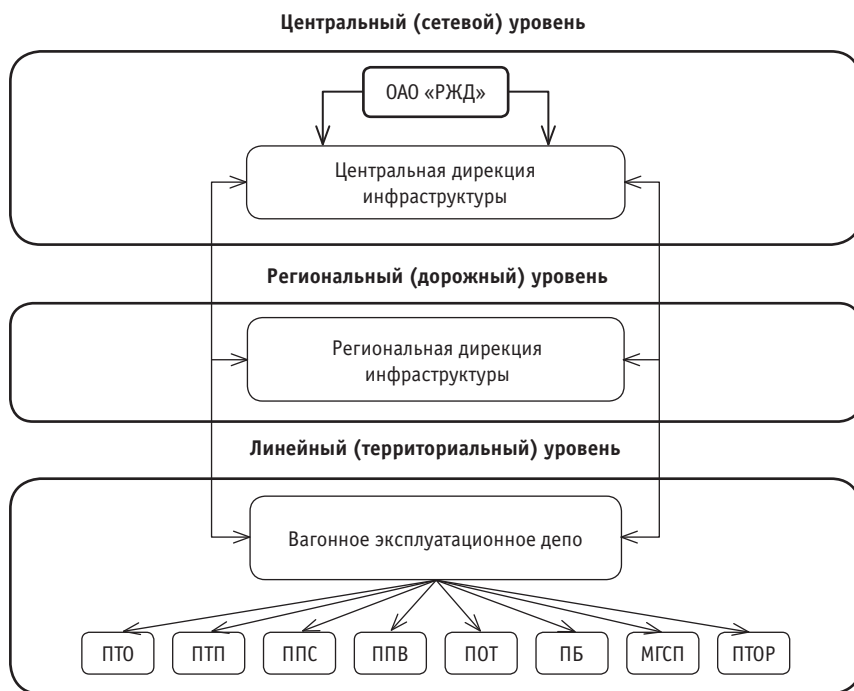
В связи с реорганизацией системы управления ОАО «РЖД» на сети железных дорог сформированы бизнес-блоки, отвечающие за качество функционирования инфраструктуры и подвижного состава общего пользования. В частности, контролем, предупреждением и устранением опасных событий в процессе движения грузовых вагонов занимается служба вагонного хозяйства, входящая в состав бизнес-блока «Железнодорожные перевозки и инфраструктура» (рис. 2).

Как видно из рис. 2, служба вагонного хозяйства имеет трехуровневую струк-

туру. Каждый уровень отвечает за своевременное и качественное выполнение задач, связанных с предотвращением событий, несущих угрозу или риск нарушения функциональной эффективности грузоперевозок. Для более оперативного и действенного управления рисками мы предлагаем в соответствии с этой структурой разбить основные виды рисков на три уровня — центральный, региональный и линейный (табл. 1).

Технические риски являются основным видом рисков при ремонте и обслуживании грузовых вагонов. Рассмотрим более подробно технические риски на межгосударственных стыковых пунктах (МГПС), т.е., согласно предлагаемой классификации, риски линейного уровня.

В пунктах технического обслуживания межгосударственных передаточных станций осуществляется контроль технического состояния и безотцепочного ремонта вагонов в поездах, передаваемых за государственную границу и прибывающих из-за границы.



**Рис. 2. Структура вагонного хозяйства, входящего в бизнес-блок «Железнодорожные перевозки и инфраструктура»:**  
 ПТО — пункт технического обслуживания вагонов; ПТП — пункт технической передачи вагонов;  
 ППС — промывочно-пропарочная станция; ППВ — пункт подготовки вагонов;  
 ПОТ — пункт опробования тормозов; ПБ — пост безопасности;  
 МГСП — межгосударственный стыковой пункт; ПТПОР — пункт текущего отцепочного ремонта

Таблица 1

Виды рисков в вагонном хозяйстве [2–6]

Обозначение рисков	Примеры рисков
<i>Экономические</i>	
$R_{Эц}$	Снижение объемов отечественного производства грузовых вагонов вследствие недофинансирования Реорганизация системы государственного инвестирования в развитие грузовых вагонов в связи с ужесточением требований к качеству транспортных услуг
$R_{Эр}$	Снижение объема грузовых перевозок в регионах со сложными климатическими условиями (например, в Сибири и на Дальнем Востоке) из-за недостаточно развитой железнодорожной инфраструктуры
$R_{Эл}$	Снижение уровня технического обслуживания и текущего отцепочного ремонта вследствие недофинансирования межгосударственных стыковых пунктов (МГСП)
<i>Социологические</i>	
$R_{Сц}$	Неустойчивость спроса на грузовые перевозки из-за изменения динамики демографической ситуации Отток высококвалифицированных кадров в иные сферы деятельности
$R_{Ср}$	Дефицит трудовых ресурсов в регионах со сложными климатическими условиями (например, в Сибири и на Дальнем Востоке)
$R_{Сл}$	Влияние человеческого фактора при проведении организационно-управленческих и ремонтно-технических операций на МГСП
<i>Природно-климатические</i>	
$R_{ПКц}$	Нарушение графика движения поездов из-за влияния обстоятельств непреодолимой силы
$R_{ПКр}$	Возникновение технологических «окон» в результате стихийного климатического воздействия на процесс перевозок
$R_{ПКл}$	Влияние сезонного фактора на браковку буксовых узлов по показаниям средств теплового контроля типа КТСМ
<i>Информационные</i>	
$R_{Иц}$	Снижение уровня внедрения прорывных научно-технических проектов из-за недостаточного информационно-технического развития железнодорожной отрасли Угроза несанкционированной передачи информации с электронно-вычислительных и интернет-ресурсов
$R_{Ир}$	Снижение уровня обработки информации, поступающей с линейных предприятий, из-за сбоев в работе автоматизированных систем управления перевозочным процессом и неполного перехода на электронный документооборот
$R_{Ил}$	Снижение качества технического обслуживания и ремонта вагонов на МГСП из-за нарушения функционирования автоматизированной системы управления
<i>Технические</i>	
$R_{Тц}$	Снижение уровня технико-экономических показателей функционирования вагонного хозяйства Снижение безопасности движения поездов из-за некачественного ремонта и/или технического обслуживания вагонов Возникновение техногенных аварийных ситуаций на сети железных дорог из-за нарушения производственного, ремонтного или обслуживающего процессов на других видах транспорта (морском, авиационном, автомобильном и т.д.) Снижение качества обслуживания подвижного состава по причине проектно-конструкторских недоработок
$R_{Тр}$	Моральный и физический износ железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава Возникновение аварийных ситуаций из-за нарушения внутренних производственных факторов
$R_{Тл}$	Недостаточный уровень развития технического оборудования, инфраструктуры пограничных переходов на межгосударственных стыковых пунктах

К техническим рискам на этих пунктах можно отнести провоз контрафактных узлов и деталей, которые были установлены на единицу подвижного состава при ремонте и не выявлены в процессе последнего технического обслуживания грузового вагона на ближайшем МГСП [6]. Особым видом риска при техническом обслуживании на МГСП является таможенный осмотр, ко-

торый производится специализированной группой лиц совместно с осмотрщиками-ремонтниками вагонов причастной станции, находящейся на стыке границ с сопредельными государствами.

Критерии, по которым можно классифицировать риски при техническом обслуживании вагонов на МГСП, представлены на рис. 3, описание каждого из критериев дано в табл. 2.



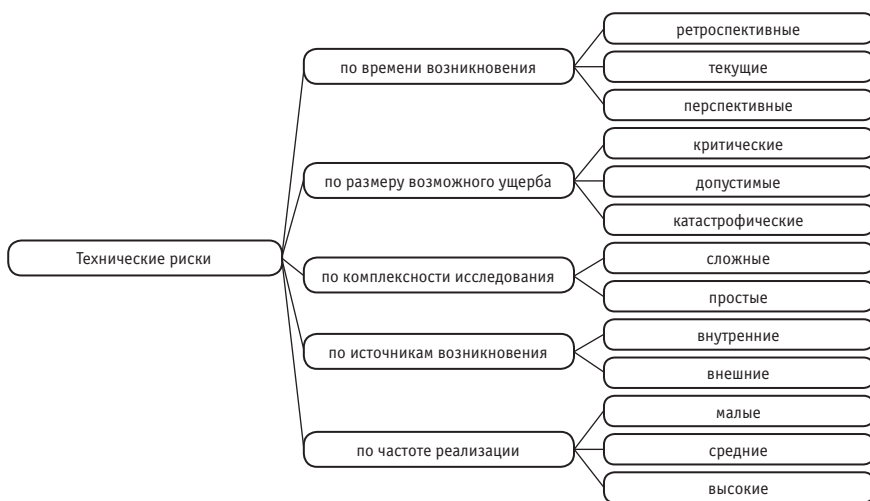


Рис. 3. Классификация технических рисков на межгосударственном стыковом пункте

Таким образом, выявлены основные виды рисков, характерные для железнодорожного транспорта в целом и для вагонного хозяйства в частности, и предложена классификация технических рисков, возникающих в процессе обслуживания грузовых вагонов на межгосударственном стыковом пункте. С помощью рассмотренных критериев можно отследить опасное событие на раннем этапе его развития, а значит, более оперативно и эффективно управлять рисками.

Направление дальнейших исследований связано с разработкой математической модели по управлению рисками, влияющими на техническое обслуживание грузовых вагонов на межгосударственном стыковом пункте.

Таблица 2

## Критерии технических рисков на межгосударственных стыковых пунктах

Критерии	Примеры
<i>По времени возникновения</i>	
Ретроспективные	События, произошедшие до прибытия вагонов на станцию технического обслуживания, выявление отказов производится на промежуточных, маленьких станциях или на постах безопасности (технические средства диагностирования — КТСМ, КТИ, АСООД, ПАК и т.д.)
Текущие	События, возникновение которых выявлено в процессе технического обслуживания вагонов
Перспективные	События, возникновение которых прогнозируется исходя из ранее сформированной статистики отказов вагонов (по пробегу, календарному сроку эксплуатации)
<i>По размеру возможного ущерба</i>	
Допустимые	События, при которых величина возможного ущерба находится в пределах нормы (износы мелких деталей вагона, возможность замены на запасные в процессе технического обслуживания на станциях)
Критические	События, выходящие за пределы нормы, указанной в конструкторской и нормативно-технической документации
Катастрофические	События (аварии, катастрофы), несущие колоссальный урон, который отражается в том числе на смежных сферах деятельности и на окружающей среде
<i>По сложности исследования</i>	
Простые	События, возможность которых сотрудники станции способны отследить самостоятельно в процессе обслуживания, не прибегая к дополнительным сложным средствам измерения и диагностирования
Сложные	События, которые можно отследить при обращении к дополнительным информационным источникам, требующим тщательного исследования
<i>По источникам возникновения</i>	
Внутренние	События, находящиеся в пределах функционирования станции обслуживания
Внешние	События, происходящие за пределами МГСП. К примеру, информационные риски, связанные с утверждением новых законодательных проектов, влияющих на техническое обслуживание вагонов
<i>По частоте реализации</i>	
Малые	События, связанные с нововведениями, при которых статистика сбоев и отказов технических средств или новых конструкций вагонов не сформирована, а также события, связанные с сезонностью и климатическими условиями места расположения обслуживающей станции
Средние	События, имеющие в статистике среднюю частоту возникновения, методы борьбы с которыми используются в режиме реального времени
Высокие	События, частота возникновения которых наиболее высока, что чаще всего связано с воздействием внешних факторов, таких как природно-климатические условия

## Литература

1. ГОСТ Р 54505–2017. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. М. : Стандартинформ, 2012. 38 с.
2. Чура Н. Н. Техногенный риск : учеб. пособие / Под ред. В. А. Девисилова. М. : КНОРУС, 2014. 280 с.
3. Лапшин В. Ф., Орлов М. В. Основы технического обслуживания вагонов : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2006. 375 с.
4. Зубков В. В. Совершенствование системы на регионе железной дороги : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2016. 190 с.
5. Сирина Н. Ф., Цыганов В. В. Механизмы функционирования вагонного хозяйства : моногр. М. : УМЦ ЖДТ, 2010. 188 с.
6. Камаретдинова Г. А. Понятие риска и его классификации на межгосударственном пункте технической передачи // Проблемы эффективного использования научного потенциала общества : сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2017. С. 50–52.

## References

1. GOST R 54505–2017. Functional safety. Risk management on railway transport [GOST R 54505–2017. Bezopasnost' funktsional'naya. Upravlenie riskami na zheleznodorozhnom transporte]. Moscow : Standardinform, 2012. 38 p.
2. Chura N. N. Technogenic risk [Tekhnogenny risk] : textbook / Ed. by V. A. Devisilov. Moscow : KNORUS, 2014. 280 p.
3. Lapshin V. F., Orlov M. V. Basics of car maintenance [Osnovy tekhnicheskogo obsluzhivaniya vagonov] : textbook. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2006. 375 p.
4. Zubkov V. V. System development on a railway division [Sovershenstvovanie sistemy na regione zheleznoy dorogi] : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2016. 190 p.
5. Sirina N. F., Tsyganov V. V. Car services function mechanisms [Mekhanizmy funktsionirovaniya vagonnogo khozyaystva] : monograph. Moscow : UMTs ZhDT, 2010. 188 p.
6. Kamaretdinova G. A. The concept of risk and it's classification at interstate point of technical transfer [Ponyatie riska i ego klassifikatsii na mezhgosudarstvennom punkte tekhnicheskoy peredachi] // Problems of effective use of society scientific potential : collection of papers of International scientific and practical conference. Ufa, 2017. Pp. 50–52.

*Объем статьи 0,47 авторских листа*

УДК 629.4.023:14.001.573

**Дмитрий Яковлевич Носырев, доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,**

**Илья Вадимович Чепурченко, соискатель степени кандидата технических наук, Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,**

**Светлана Владимировна Коркина, кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Вагоны» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КУЗОВ ПОЛУВАГОНА ПРИ ВЫГРУЗКЕ НА РОТОРНОМ ВАГОНОПРОКИДЫВАТЕЛЕ

**Dmitriy Yakovlevich Nosyrev, DSc in Engineering, Professor, Locomotives Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,**

**Ilya Vadimovich Chepurchenko, PhD candidate in Engineering, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,**

**Svetlana Vladimirovna Korkina, PhD in Engineering, Associate Professor, Acting Head of Railway Cars Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia**

## Determination of inertial dynamic loads acting on open box car body during unloading in a rotary car dumper

### Аннотация

Повреждаемость вагонов в местах массовой выгрузки — одна из важнейших проблем современного вагонного парка. Наиболее распространенной причиной повреждаемости конструкции вагона является применение грейферной выгрузки как средства механизации. К числу альтернативных способов разгрузки сыпучих (навалочных) грузов относится использование вагоноопрокидывателя, за счет которого можно значительно снизить повреждаемость полувагонов.

В статье рассмотрены расчетные схемы, в которых учитываются ударные силы, действующие на кузов полувагона при разгрузке насыпного груза, и инерционные нагрузки от вибраторов, кроме того, приведены уточненные в соответствии с этими схемами дифференциальные уравнения движения динамической системы «вагоноопрокидыватель — полувагон — насыпной груз». Решение предлагаемых дифференциальных уравнений даст возможность определить ускорения, действующие на систему в целом и на полувагон в частности, что позволит при проектировании и эксплуатации учитывать концентрацию напряжений в кузовах для предупреждения остаточных деформаций во время разгрузки.

**Ключевые слова:** кузов полувагона, вагоноопрокидыватель, насыпной груз, динамические силы и ускорения, сохранность вагона.

### Summary

Damage of cars in places of mass unloading is one of the most important problems of modern car fleet. The most common cause of car body damage is the use of grab unloading as a means of mechanization. Among the alternative ways of unloading bulk cargo is the use of a car dumper, which can significantly reduce the damage of open box cars.

The paper considers calculation schemes that take into account the impact forces acting on the body of the open box car during unloading of bulk cargo and inertial loads from vibrators. In addition, in accordance with these schemes the authors presented the refined differential motion equations of the «car dumper — open box car — bulk cargo» dynamic system. The solution of the proposed differential equations will enable to determine the accelerations acting on the whole system and on the open box car in particular, which will allow taking into account the concentration of stresses in the bodies to prevent residual deformations during unloading.

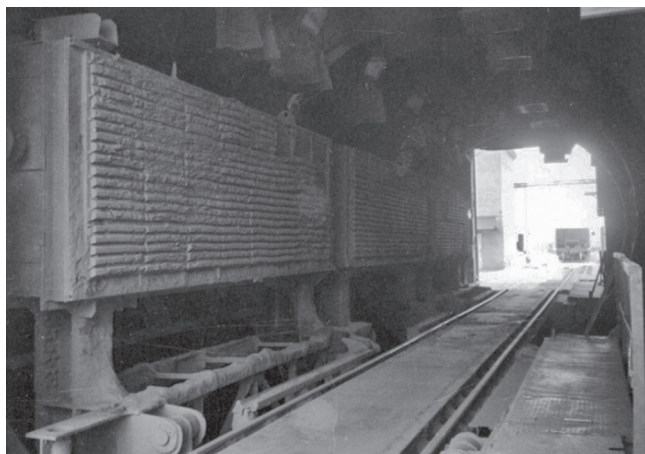
**Keywords:** open box car body, car dumper, bulk cargo, dynamic forces and accelerations, car safety.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-63-67

**П**роблема сохранности вагонного парка имеет важное значение для операторов подвижного состава. Основная причина повреждения конструкции полувагона вызвана несоблюдением требований нормативных документов [1] при погрузочно-разгрузочных работах. Разгрузка полувагонов способом опрокидывания была введена на промышленных предприятиях в прошлом веке при индустриализации и в настоящее время успешно осуществляется с помощью специальных приспособлений — стационарных вагоноопрокидывателей.

При разгрузке из полувагонов насыпных грузов способом опрокидывания основные виды повреждений несущей конструкции при повышенных нагрузках, действующих на кузов, — это изломы обшивки, обрывы и выгиб стоек кузова, прогибы верхней обвязки в местах контакта с упорами, деформация торцевых стоек, выпадение пружин рессорного подвешивания тележек, центрирующих балочек и маятниковых подвесок автосцепок, чек тормозных колодок. В отличие от других способов, при разгрузке опрокидыванием уровень сохранности и надежности полувагонов зависит от исправного армирования привалочной плиты и упоров вагоноопрокидывателя, а также от соблюдения технических требований, предъявляемых к сохранности подвижного состава [1, 2].

а



б



**Рис. 1. Техническое состояние вагонопрокидывателя, влияющее на сохранность вагонного парка:**

а — местное отсутствие армирования привалочной плиты по середине; б — отсутствие армирования контактных поверхностей верхних упоров

Обследование технического состояния вагонопрокидывателей с точки зрения несовершенства их конструкций для обеспечения сохранности кузовов полувагонов показало, что в различных портах используется резиновое армирование привалочных плит, которое монтируется по блочному принципу, т.е. отдельными участками определенных размеров, и приводит к их выпадению при разгрузке (рис. 1). Например, отсутствие в некоторых зонах целых участков размером  $0,5 \times 0,5$  м вызывает деформацию обшивки и стоек кузова. Кроме того, высоты резинового армирования привалочной плиты ( $h = 1900$  мм) недостаточно для прилегания всей поверхности боковой стены полувагонов различных моделей ( $h = 2060$  мм), что также приводит к очевидным повреждениям верхней части кузовов. Верхние упоры вагонопрокидывателя не имеют резинового армирования совсем, что, в свою очередь, при опрокидывании кузова может привести к повреждениям верхнего обвязочного пояса полувагона.

Все типы вагонопрокидывателей работают по принципу вращения вагона вокруг своего центра тяжести, поэтому нагрузки, действующие на кузов, в некотором приближении могут быть приняты идентичными. Это следующие виды нагрузок:

ударная нагрузка на боковую стену полувагона при прилегании к привалочной плите, соответствующая углу поворота ротора на  $9-16^\circ$ . Величина этой силы зависит от многих факторов, в первую очередь от кинематических и геометрических;

нагрузка, приходящаяся на верхний обвязочный пояс кузова полувагона при контакте с верхними упорами. Эта нагрузка характеризуется также скоростью вращения ротора, массой платформы вагонопрокидывателя, исправным состоянием упоров и другими техническими факторами;

ударные нагрузки от перемещения масс слоев груза, имеющих свойства смерзаться или слеживаться. В этом случае должны быть предусмотрены конструкционные элементы, предотвращающие повреждение кузовов (так называемые щиты). Но, с другой стороны, такие элементы увеличивают массу вагонопрокидывателя, иначе возможны повреждения верхнего обвязочного пояса и обшивки кузова полувагона — вмятины, изгиб, местные прогибы;

нагрузки, распределенные по верхнему обвязочному поясу полувагона при монолитном состоянии груза. В данном случае достаточно слабый по жесткости профиль пояса испытывает суммарную нагрузку от веса груза, тары полувагона и платформы с люлькой вагонопрокидывателя. Причем эти нагрузки довольно существенные;

нагрузки, возникающие при выгрузке на верхний обвязочный пояс от упоров вагонопрокидывателя вследствие перераспределения центра тяжести груза в полувагоне, поскольку груз часто высыпается (выпадает) неравномерно;

нагрузки на торцевые секции кузовов (с заглушенными торцевыми дверями или торцевыми стенами) в результате неравномерного прилегания кузова до верхних упоров вагонопрокидывателя. В этом случае часто появляются распрямления комплектов рессорных подвешиваний тележек, что приводит к возникновению остаточных деформаций изгиба элементов конструкции кузова полувагона;

силы тяжести на свободные элементы конструкции полувагона, а точнее, пружины, клиновые гасители колебаний, чеки тормозных колодок, детали ударно-центрирующих устройств автосцепного оборудования, петель открытия торцевых дверей, крышек люков при ослаблении запорных устройств и т.д. Эти усилия корректируются при включении в работу виброустройств, которые создают и передают вынужденные колебания через верхние упоры на верхний обвязочный пояс кузова полувагона.

Перечисленные нагрузки, которые появляются в многообразных сочетаниях при опрокидывании полувагона, часто приводят к различным повреждениям элементов и узлов конструкции кузова.

В работе [3] описан процесс опрокидывания кузова полувагона, однако нагрузки и реакции, действующие на вагон, не рассмотрены. Для исследования напряженно-деформированного состояния элементов кузова составлены уточненные расчетные схемы, на которых показаны действующие на полувагон силы и дополнительные реакции во время выгрузки (рис. 2 и 3).

В стационарных роторных вагоноопрокидывателях высыпание (истечение) груза начинается происходить после того, как угол поворота ротора  $\varphi_x$  становится равным  $\varphi_d$  (углу естественного откоса груза) или больше его. Истечение груза происходит неравномерно, но значительно ускоряется по мере возрастания угла поворота. Обычно в эксплуатации угол опрокидывания для высыпания угля из полувагона не превышает  $135\text{--}140^\circ$ . Однако на практике встречаются случаи слежавшегося и смерзшегося груза, его частичного налипания или примерзания к стенам вагона. Максимальный угол поворота вагоноопрокидывателя широкой колеи составляет  $180^\circ$ .

В момент начала опрокидывания (рис. 2а) на кузов действуют сила распора груза  $F$ , а также силы тяжести груза  $G_2$  и кузова полувагона  $G_4$ . В дальнейшем, когда система начинает вращение, люлька с кузовом полувагона смещается на расстояние  $K$ , преодолевая угол поворота, изменяющийся в пределах от 0 до некоторого значения  $\varphi_1$ , при котором вагон перемещается к боковой стене ротора опрокидывателя (рис. 2б). Движение люльки сопровождается ускорением, которое вызывает удар боковой стены полувагона о привалочную плиту, что может привести к повреждениям в виде остаточных деформаций.

При достижении угла естественного откоса груза начинается процесс выгрузки, который сопровождается нагружением привалочной плиты боковой стеной кузова. Угол  $\varphi_x$  будет изменяться в пределах от угла естественного откоса гру-

за в движении  $\varphi_d$  до  $\varphi_2$ , соответствующего началу разгрузки (рис. 3а), в этот момент площадь поперечного сечения материала в вагоне можно представить состоящей из прямоугольника и треугольника.

Во время поворота вагона в роторе, когда система преодолевает угол в  $56^\circ$ , происходит ударное воздействие при соприкосновении верхней обвязки полувагона о передние и задние упоры вагоноопрокидывателя. Полувагон остается в этом положении до полного поворота ротора.

На заключительной фазе разгрузки угол поворота  $\varphi_x$  изменяется от  $\varphi_2$  до конечного угла поворота  $\varphi$  — груз принимает форму  $\Delta$  (призмы) (рис. 3б). Конструкция полувагона воспринимает значительные нагрузки от веса  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$  по верхней обвязке в результате реакций  $R_{nn1}$  и  $R_{nn2}$ , которые меняют значения в зависимости от угла поворота.

Анализ рассмотренных положений полувагона и вагоноопрокидывателя позволяет сделать вывод, что в методике расчета кузова полувагона по [3] не учитываются: неравномерное прилегание боковой стены верхней обвязки кузова полувагона к привалочной плите из-за выпрямления рессорных комплектов в динамике; усилие, действующее от собственного веса люльки на верхнюю обвязку и значительно влияющее на прочность кузова; суммарные нагрузки, прикладываемые к верхней обвязке при условии смерзшегося (монокристаллического) груза, способного зависать в кузове полувагона.

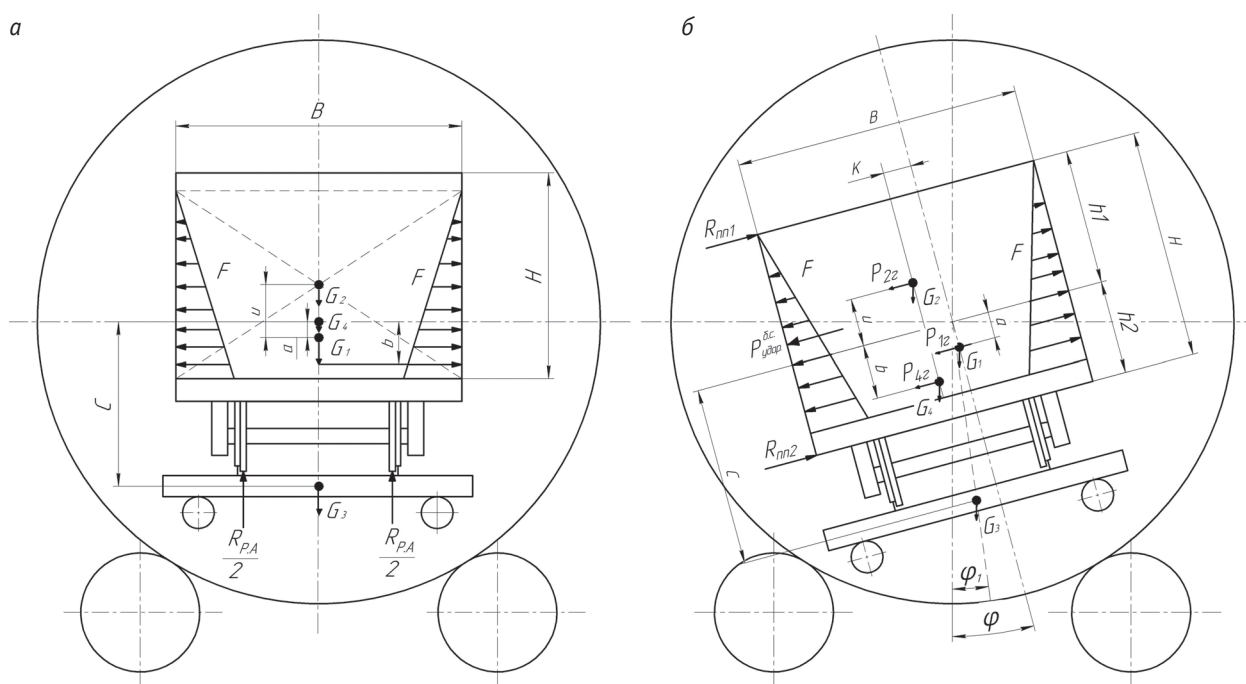


Рис. 2. Начало опрокидывания кузова полувагона:

а — начальное положение полувагона в роторе ( $0^\circ$ ); б — положение, соответствующее соприкосновению кузова с привалочной плитой (угол поворота  $9\text{--}16^\circ$ );  $R_{PA}$  — реакция от рельсов, расположенных на люльке в начальном положении;  $R_{nn}$  — реакция привалочной плиты от воздействия ударной нагрузки боковой стены полувагона ( $R_{nn1}$  и  $R_{nn2}$  изменяются из-за неравномерной привалки всей площади боковой стены, сопровождающейся распрямлением рессорных комплектов тележки);  $G_1$  — центр тяжести ротора вагоноопрокидывателя;  $G_2$  — центр тяжести груза;  $G_3$  — центр тяжести люльки вагоноопрокидывателя;  $G_4$  — центр тяжести полувагона;  $F$  — сила распора от действия груза на боковую стену полувагона;  $\varphi$  — угол поворота системы;  $H$  — высота стены полувагона;  $B$  — ширина кузова полувагона;  $K$  — смещение люльки с кузовом полувагона относительно ротора вагоноопрокидывателя;  $P_{1r}$ ,  $P_{2r}$ ,  $P_{4r}$  — соответственно горизонтальные составляющие  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_4$ , влияющие на величину ударного воздействия боковой стены  $P_{уд.с}$



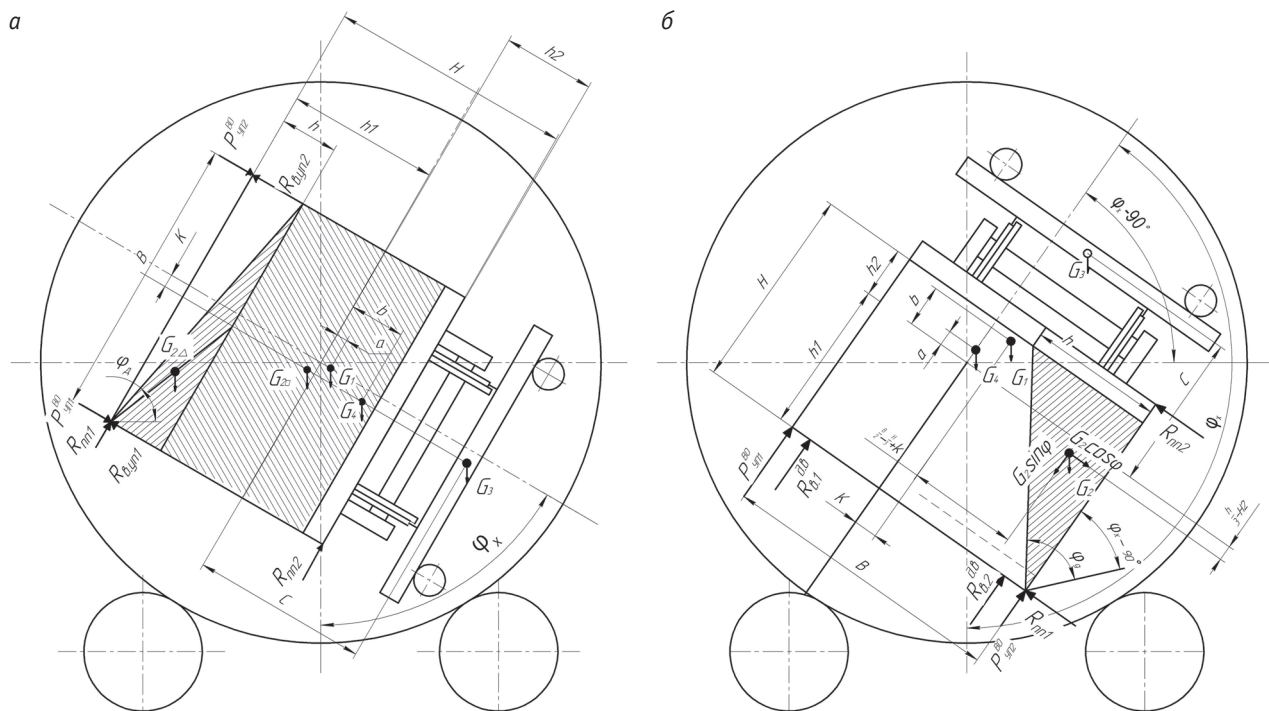


Рис. 3. Промежуточная и завершающая стадии опрокидывания:

а — начало высыпания груза из полувагона и соприкосновение кузова с верхними упорами;  
б — конец разгрузки груза из полувагона;  $R_{в.уп}$  — реакция верхних упоров ( $R_{в.уп1}$  и  $R_{в.уп2}$  изменяются в зависимости от положения центра тяжести системы);  $\varphi_x$  — угол, изменяющийся во время вращения системы;  $P_{уп1(2)}^{во}$  — ударные нагрузки на верхнюю обвязку от верхних упоров;  
 $G_{2\Delta}$  — вес ссыпаемой части (призмы) груза;  $P_{в1(2)}^{д.в}$  — вибрационная нагрузка от действия вибраторов (при угле 170–175°)

Чтобы определить ускорения, действующие на элементы кузова полувагона при выгрузке насыпных (навалочных) грузов с помощью вагоноопрокидывателя, составим, согласно [4], дифференциальные уравнения движения динамических составляющих «вагоноопрокидыватель — полувагон — насыпной груз» с использованием принципа Лагранжа II рода для неконсервативных систем:

$$\begin{cases} I_x^{вп}(\ddot{\theta}_{вп} + \ddot{\theta}_{пв} + \ddot{\theta}_{нг}) + P_{вп} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot R_{вп} + \\ + N_{вп} \cdot F \cdot \dot{\theta}(t) \cdot R_{вп} = M_i(t); \\ m_{пв(нг)} \cdot \ddot{Z} + 4c_z \cdot Z + 8 \cdot \beta \cdot \dot{Z} + N \cdot F \cdot \dot{Z}(t) = F_i(t); \\ m_{пв(нг)} \cdot \ddot{y} + 4 \cdot c_y \cdot y + 8 \cdot \gamma \cdot \dot{y} = F_j(t); \\ I_x^{пв}(\ddot{\theta}_{пв} + \ddot{\theta}_{нг}) + P_{пв} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot r_{пв} + \\ + N_{пв} \cdot f_{пв} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot r_{пв} = M_j(t); \\ I_x^{нг} \cdot \ddot{\theta}_{нг} + P_{нг} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot r_{нг} + N_{нг} \cdot f_{нг} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot r_{нг} = M_k(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $I_x^{вп}$ ,  $I_x^{пв}$ ,  $I_x^{нг}$  — соответственно моменты инерции вагоноопрокидывателя, полувагона, насыпного груза относительно оси  $x$ ;

$P_{вп}$ ,  $P_{пв}$ ,  $P_{нг}$  — вес вагоноопрокидывателя, полувагона, насыпного груза;

$N_{вп}$ ,  $N_{пв}$ ,  $N_{нг}$  — прижимная сила вагоноопрокидывателя, полувагона, насыпного груза;

$F$  — коэффициент трения между узлами вагоноопрокидывателя;

$f_{пв}$  — коэффициент трения между элементами полувагона и насыпного груза;

$f_{нг}$  — внутреннее трение между частицами груза;

$c_z(y)$  — жесткость рессорных комплектов экипажей;

$R_{вп}$ ,  $r_{пв}$ ,  $r_{нг}$  — радиусы вращения соответственно вагоноопрокидывателя, полувагона и насыпного груза;

$\beta$ ,  $\gamma$  — эквивалентные коэффициенты трения клиновых гасителей колебаний в вертикальном и горизонтальном направлениях;

$\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\ddot{\theta}$  — соответственно угловое перемещение, скорость и ускорение относительно оси  $x$ ;

$\dot{\theta}(t)$ ,  $\dot{Z}(t)$  — корректировка по  $t$  для соблюдения размерности единиц измерения в уравнениях, т.е. единиц моментов и сил;

$y$ ,  $\dot{y}$ ,  $\ddot{y}$ ,  $z$ ,  $\dot{z}$ ,  $\ddot{z}$  — соответственно линейные перемещения, скорости и ускорения полувагона и насыпного груза при вращении вагоноопрокидывателя;

$m_{пв(нг)}$  — изменение массы при высыпании (истечении) порции груза;

$M_{i(t)}$ ,  $M_{j(t)}$ ,  $M_{k(t)}$ ,  $F_{i(t)}$ ,  $F_{j(t)}$  — вращающие возмущающие силы;

$F_{i(j)}$  — обобщенная сила при угле 170–175° (на конечной стадии разгрузки).

Обобщенная сила  $F_{i(j)}$  корректируется центробежной силой при включении вибраторов:

$$F_{1i(t)} + F_{2j(t)} = A_1 \cos(\omega_1 t) e + \frac{mv^2}{r_{дб}} \cos \omega_2 t, \quad (2)$$

где  $A_1$  — вес вала ротора вагонопрокидывателя;

$r_{дб}$  — радиус дисбаланса вибратора;

$e$  — эксцентриситет.

Для решения предложенной системы дифференциальных уравнений необходимо привести их к нормальной форме Коши и последующему интегрированию по методу Рунге — Кутты [5]. В результате определим ускорения для кузова полувагона, насыпного груза и вагонопрокидывателя при разгрузке (рис. 4–6).

Согласно полученным результатам можно сделать вывод, что ускорение кузова полувагона возникает при угле поворота около  $60^\circ$  (т.е. при установившемся истечении груза из кузова). Максимальные значения ускорений для насыпного груза (см. рис. 5) наблюдаются при угле поворота  $114^\circ$  и составляют около  $12,5 \text{ м/с}^2$ . Это происходит почти на конечной стадии опрокидывания, когда лишь незначительная часть груза остается в кузове. Далее ускорение снижается и после  $120^\circ$  равняется нулю, так как на этом этапе груз в кузове отсутствует.

Таким образом, использование результатов исследований на стадии проектирования [6] полувагонов позволяет учитывать динамические факторы, обусловленные нахождением кузова в вагонопрокидывателе при выгрузке, и выявлять зоны характерных повреждений, существенно влияющих на показатели прочности и эксплуатационную надежность.

## Литература

- ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. М. : Стандартинформ, 2011. 20 с.
- Сендеров Г. К., Лосев П. Р., Другаль С. А. Сохранность вагонов при погрузочно-разгрузочных и маневровых работах. М. : Транспорт, 1984. 158 с.
- Горфин О. С., Михайлов А. В. Машины и оборудование по переработке торфа. Ч. 1. Производство торфяных брикетов. Тверь : Изд-во ТГТУ, 2013. 247 с.
- Вершинский С. В., Данилов В. Н., Хусидов В. Д. Динамика вагона : учеб. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
- Петров Г. И., Чепурченко И. В., Паначев О. И. Адаптация математической модели полувагона к условиям разгрузки кузова способом опрокидывания // Транспортное дело России. 2017. № 1 (128). С. 138–143. ISSN 2072–8689.
- Чепурченко И. В., Носырев Д. Я., Коркина С. В. Использование теории оптимального проектирования для усовершенствования конструкции кузова глуходонного полувагона // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 3 (69). С. 28–32. ISSN 1997–0722.

Объем статьи 0,64 авторских листа

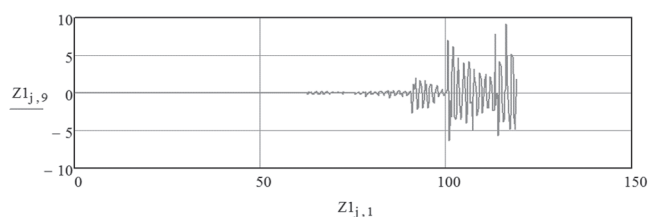


Рис. 4. Характер ускорения кузова вагона при опрокидывании

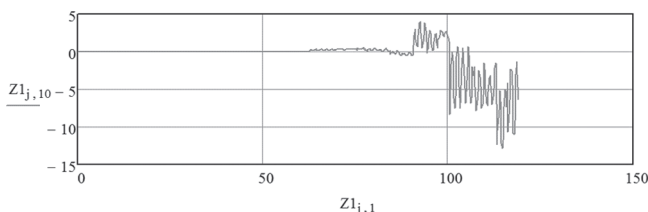


Рис. 5. Характер ускорения насыпного груза при опрокидывании

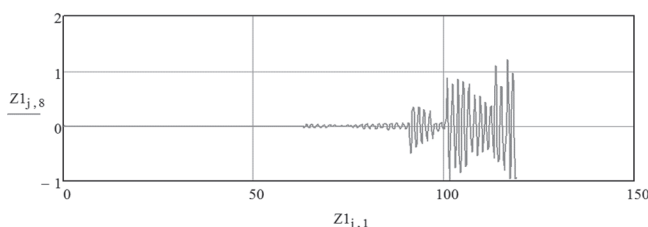


Рис. 6. Характер ускорения вагонопрокидывателя при опрокидывании

## References

- GOST 22235–2010. Freight cars for 1520 mm gauge main line railways. General requirements for safety in loading-unloading and shunting operations [Vagony gruzovye magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshhie trebovaniya po obespecheniyu sokhrannosti pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovyykh rabot]. Moscow : Standardinform, 2011. 20 p.
- Senderov G. K., Losev P. R., Drugal' S. A. Safety of cars in loading-unloading and shunting operations [Sokhrannost' vagonov pri pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovyykh rabotakh]. Moscow : Transport, 1984. 158 p.
- Gorfin O. S., Mikhaylov A. V. Peat processing machinery and equipment. Part 1. Peat briquette production [Mashiny i oborudovanie po pererabotke torfa. Ch. 1. Proizvodstvo torfyanykh briketov]. Tver : Publishing House of TSTU, 2013. 247 p.
- Vershinskiy S. V., Danilov V. N., Khusidov V. D. Dynamics of car [Dinamika vagona] : textbook. Moscow : Transport, 1991. 360 p.
- Petrov G. I., Chepurchenko I. V., Panachev O. I. Adaptation of open box car mathematical model to conditions of unloading by tipping [Adaptatsiya matematicheskoy modeli poluvagona k usloviyam razgruzki kuzova sposobom opokidyvaniya] // Transport business of Russia. 2017. No. 1 (128). Pp. 138–143. ISSN 2072–8689.
- Chepurchenko I. V., Nosyrev D. Ya., Korkina S. V. The use of the theory of optimal design to optimization of body design of solid-bottom gondola cars [Ispol'zovanie teorii optimal'nogo proektirovaniya dlya usovershenstvovaniya konstruktssii kuzova glukhodonnogo poluvagona] // Bulletin of transport of the Volga region. 2018. No. 3 (69). Pp. 28–32. ISSN 1997–0722.

УДК. 621.592

Анатолий Федорович Дубровский, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия,

Сергей Анатольевич Дубровский, преподаватель Южно-Уральского университета дополнительного образования (ЮУрУДО), Челябинск, Россия,

Сергей Викторович Алюков, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление инновациями в бизнесе» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия,

Кирилл Валерьевич Прокопьев, доцент кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия,

Олег Рифкатович Якупов, главный конструктор ОАО «АЗ УРАЛ», директор инженерно-конструкторского центра, Миасс, Россия,

Александр Сергеевич Алюков, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ АМОТИЗАТОРОВ В ПОДВЕСКАХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Anatoliy Fedorovich Dubrovskiy, DSc in Engineering, Professor, Automobile Transport Department, South Ural State University (National Research University) (SUSU), Chelyabinsk, Russia,

Sergey Anatolyevich Dubrovskiy, Lecturer, South Ural University of Further Education (SUUFE), Chelyabinsk, Russia,

Sergey Viktorovich Alyukov, DSc in Engineering, Professor, Management of Innovation in Business Department, South Ural State University (National Research University) (SUSU), Chelyabinsk, Russia,

Kirill Valeryevich Prokopyev, Associate Professor, Automobile Transport Department, South Ural State University (National Research University) (SUSU), Chelyabinsk, Russia,

Oleg Rifkatovich Yakupov, Chief Designer, JSC «AZ URAL», Director of Design Engineering Centre, Miass, Russia,

Alexander Sergeyevich Alyukov, postgraduate student, Automobile Transport Department, South Ural State University (National Research University) (SUSU), Chelyabinsk, Russia

## On the efficiency of the use of adaptive shock absorbers in suspensions of vehicles

### Аннотация

Разработка любого транспортного средства всегда проводится при условии строгого выполнения определенных, предварительно задаваемых эксплуатационных характеристик. Особое место среди них занимают так называемые ходовые эксплуатационные характеристики, не затрагивающие оценку тягово-динамических параметров транспортного средства, его топливную экономичность и т.п. В настоящее время группа сотрудников автотракторного факультета Южно-Уральского государственного университета под руководством профессора А. Ф. Дубровского завершила большой цикл фундаментальных научно-исследовательских работ по созданию адаптивных подвесок (систем поддрессирования) транспортных средств нового принципа действия, позволяющих регулировать рабочие характеристики подвески во время движения автомобиля в зависимости от дорожных условий либо в автоматическом режиме, либо в режиме ручного управления. В частности, разработаны, исследованы, спроектированы, изготовлены и испытаны следующие основные узлы адаптивных подвесок: адаптивные, блокируемые амортизаторы и упругие элементы с нелинейной характеристикой, которые по совокупности функциональных свойств и эксплуатационных характеристик качественно превосходят существующие зарубежные аналоги. Для демонстрации этих преимуществ создан полномасштабный стенд ходовой части правой передней четверти автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC, проведены сравнительные имитационные испытания движения автомобиля по неровностям со штатной подвеской и подвеской, оборудованной упругими элементами и адаптивными амортизаторами новых конструкций. В статье анализируется перспективный для использования в подвеске транспортного средства адаптивный амортизатор со сверхшироким диапазоном регулирования рабочих характеристик.

**Ключевые слова:** транспортное средство, рабочая характеристика, амортизатор, адаптивная подвеска, система поддрессирования.

### Summary

The development of any vehicle is always carried out under the condition of strict enforcement of certain, pre-set performance characteristics. A special place among them is occupied by the so-called running performance, which does not affect the assessment of the traction-dynamic parameters of the vehicle, its fuel economy, etc. The direction of our activity is the development of adaptive suspensions of vehicles of a new principle of action. Currently, a group of leading researchers of the Automobile and Tractor Faculty of the South Ural State University under the leadership of professor A. F. Dubrovskiy has completed a large cycle of fundamental research work on the creation of adaptive suspensions (suspension systems) of vehicles of a new principle of operation, allowing to adjust the performance of the suspension while the vehicle is moving, depending on road conditions, either in automatic mode or in manual control mode. We have developed, researched, designed, manufactured and tested the following main components of adaptive vehicle suspensions: adaptive, lockable shock absorbers and elastic elements with non-linear characteristics, which, in combination with their functional properties and performance characteristics, significantly exceed existing foreign analogues, not to mention domestic designs. To demonstrate these advantages, a full-scale stand of the chassis of the «right front quarter» of the VW PASSAT CC was created and comparative simulation tests of «moving the car over bumps» with a regular suspension and with a suspension equipped with elastic elements and adaptive shock absorbers of our structures were carried out. This paper analyzes the characteristics of the perspective adaptive shock absorber, in terms of use in the vehicle's suspension, with an ultra-wide range of performance adjustment.

**Keywords:** vehicle, work characteristic, shock absorber, adaptive suspension, suspension system.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-68-73

e-mail: duanf@mail.ru, duanf@mail.ru, alysergey@gmail.com, automain@mail.ru, yakupov@mail.uralaz.ru, alyukovalexandr@gmail.com

Дата поступления: 20.11.2018

## ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что при разработке конструкции системы поддрессирования транспортного средства (ТС), в том числе автомобиля, всегда приходится решать проблему согласования двух групп противоречивых требований:

обеспечение заданного уровня плавности хода (комфортности), быстроходности, минимизации динамических (вибрационных) нагрузок на перевозимый груз, узлы, звенья, пассажиров и водителей ТС;

обеспечение управляемости, безопасности, устойчивости, стабилизации движения ТС и стабилизации положения его кузова.

От того, насколько удачно и оптимально решена эта проблема, в основном и зависит качество эксплуатационных характеристик проектируемого автомобиля, его коммерческая привлекательность и конкурентоспособность.

Также общеизвестно, что наиболее эффективно согласовать эти противоречивые требования можно лишь при выполнении следующих двух условий, касающихся системы поддрессирования ТС, которая должна содержать:

упругий элемент с нелинейной характеристикой;

адаптивный амортизатор, позволяющий при движении ТС регулировать его рабочие характеристики в зависимости от дорожной ситуации.

Таким образом, использование в подвеске автомобиля упругого элемента с нелинейной характеристикой и адаптивного амортизатора — это единственный путь кардинального, наиболее эффективного улучшения основных эксплуатационных характеристик ТС, фундаментального повышения уровня его конкурентоспособности и коммерческой привлекательности. Другой альтернативы решения данной проблемы просто нет [1, 2].

## СУЩЕСТВУЮЩИЕ АНАЛОГИ АДАПТИВНЫХ АМОРТИЗАТОРОВ

В настоящее время можно выделить следующие наиболее интересные конструктивные подходы к реализации концепции адаптивного амортизатора.

1. Гидропневматическая подвеска, наиболее типичный представитель которой — подвеска Hydractive [3]. Основные достоинства гидропневматической подвески — довольно высокая плавность хода, возможность регулировки положения кузова относительно дорожного покрытия, эффективное гашение колебаний. С другой стороны, сдерживающими факторами широкого применения этого типа подвески являются конструктивная сложность, высокая стоимость, нестабильность характеристик, в ряде случаев — невысокая надежность [3, 4].

2. Адаптивная подвеска, построенная на использовании системы адаптивного управления ходовой части DCC [5]. Адаптивный амортизатор, составляющий основу этой системы, в конструктивном отношении достаточно прост, надежен в работе, но в функциональном отношении ограничен — позволяет регулировать демпфирующие свойства (рабочую характеристику) ступенчато, трехрежимно. Кроме того, формы рабочих характеристик на фазе растяжения и фазе сжатия — взаимозависимы [6–9].

3. Магнитореологический амортизатор системы Е. П. Гусева [10]. Он отличается сложностью конструкции, использова-

нием специальных дорогостоящих сортов масел, достаточно сложного электро- и электронного оборудования [4].

В целом следует отметить, что ни одна из рассмотренных конструкций адаптивных амортизаторов по сравнению с нашими решениями [1, 6–9, 11–17]) не позволяет:

обеспечить сверхширокий диапазон (гипердиапазон) регулирования диссипативных, рабочих характеристик;

реализовать чрезвычайно востребованный на практике блокировочный режим, когда амортизатор превращается в единое жесткое звено;

полностью устранить явление пробоя амортизатора.

## СУЩЕСТВУЮЩИЕ АНАЛОГИ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С НЕЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Анализ конструктивных концепций создания упругих элементов ТС с нелинейной характеристикой дает возможность выделить четыре основных варианта:

упругие элементы пружинного типа с бочкообразной пружиной;

упругие элементы пружинного типа с пружиной переменного шага;

упругие элементы пружинного типа с переменным диаметром прутка пружины;

упругие элементы рессорного типа с поддрессорником.

Не вдаваясь в детальную оценку рабочих характеристик перечисленных типов упругих элементов, отметим лишь наиболее существенные их недостатки [1, 3, 5–10, 14–18].

1. Все четыре типа конструкций не позволяют в наиболее широкой рабочей зоне (зоне комфорта), составляющей 80–85 % рабочего хода подвески, снизить в 2 и более раз (по сравнению со штатной подвеской) жесткость подвески при сохранении общей величины ее рабочего хода.

2. Точно так же ни одна из конструкций не способствует увеличению жесткости подвески более чем на порядок (по сравнению со штатной подвеской) в зоне повышенных деформаций, составляющей 12–18 % рабочего хода подвески, при сохранении общей величины ее рабочего хода.

3. Аналогично ни одна из конструкций не позволяет увеличить жесткость подвески более чем на 2 порядка (по сравнению со штатной подвеской) в зоне высоких деформаций, составляющей 2–3 % рабочего хода подвески, при сохранении общей величины ее рабочего хода.

4. Наконец, ни одна из конструкций не дает возможности непосредственно и автоматически контролировать и ограничивать максимальные напряжения, возникающие в материале упругого элемента при его работе.

Заметим, что свойство 1 позволяет значительно снизить уровень динамических нагрузок на узлы и звенья транспортного средства, на экипаж, пассажиров и перевозимый груз, повысить комфортабельность ТС в целом. Свойства 2 и 3 дают возможность высокоэффективно стабилизировать положение корпуса транспортного средства при его наезде на дорожную неровность, резком торможении или интенсивном разгоне. Свойство 4 способствует повышению долговечности и надежности элементов подвески, а следовательно, и ТС в целом.



## ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ АДАПТИВНЫХ ПОДВЕСОК ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В настоящее время группой ведущих сотрудников автотракторного факультета Южно-Уральского государственного университета под руководством профессора А. Ф. Дубровского завершен большой цикл фундаментальных научно-исследовательских работ по устранению отмеченных выше недостатков конструкций адаптивных амортизаторов и упругих элементов ТС с нелинейной характеристикой. Исследования позволили создать адаптивные подвески конструкции Дубровского, включающие адаптивные амортизаторы и упругие элементы ТС нового принципа действия. По совокупности функциональных свойств и рабочих характеристик разработанные конструкции значительно превосходили существующие аналоги [1, 4, 6–9, 11–18].

Для демонстрации этих преимуществ создан полномасштабный стенд ходовой части правой передней четверти автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC и проведены сравнительные имитационные испытания движения автомобиля по неровностям со штатной подвеской и подвеской, оборудованной упругими элементами и адаптивными амортизаторами разработанных нами конструкций.

Функциональные особенности и характеристики предлагаемых конструкций рассмотрены в работах [1, 3–14, 18]. В настоящей статье дано лишь описание стенда и приведены результаты сравнительных имитационных и экспериментальных исследований динамических характеристик автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC [11–13, 18].

## ПОЛНОМАСШТАБНЫЙ СТЕНД ПРАВОЙ ПЕРЕДНЕЙ ЧЕТВЕРТИ АВТОМОБИЛЯ VW PASSAT CC

Стенд (рис. 1) включает основание 2, на котором закреплены две симметрично расположенные вертикальные направляющие 1 подвигного груза 3 — имитатора правой передней четверти кузова автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC. На подвижном грузе закреплены нижняя опора 4 (сайлент-блок) правого переднего рычага 5 подвески и верхняя опора 6 амортизаторной стойки 8 правого переднего колеса 9. На амортизаторной стойке смонтирован упругий элемент (пружина) 7 правого переднего колеса. В состав стенда также входят приводной регулируемый электродвигатель 10, редуктор привода опоры 12 вибратора, датчик 11 уровня правого переднего колеса, датчик 13 измерения усилия, действующего со стороны колеса 9 на опору 12 вибратора, датчик 14 измерения деформации колеса, монитор персонального компьютера 15, регистрирующий измеряемые параметры, и блок 16 управления степенью диссипации адаптивного амортизатора и частотой колебаний опоры вибратора.

Датчик 14 фактически измеряет расстояние от центра колеса 9 до опоры 12 вибратора, т.е. динамический радиус колеса. При отрыве колеса от опоры этот датчик также измеряет суммарное расстояние от центра колеса до опоры вибратора. Однако в этом случае измеряемая величина уже равна сумме статического радиуса колеса и величины отскока колеса — расстояния между поверхностью колеса и опорой.

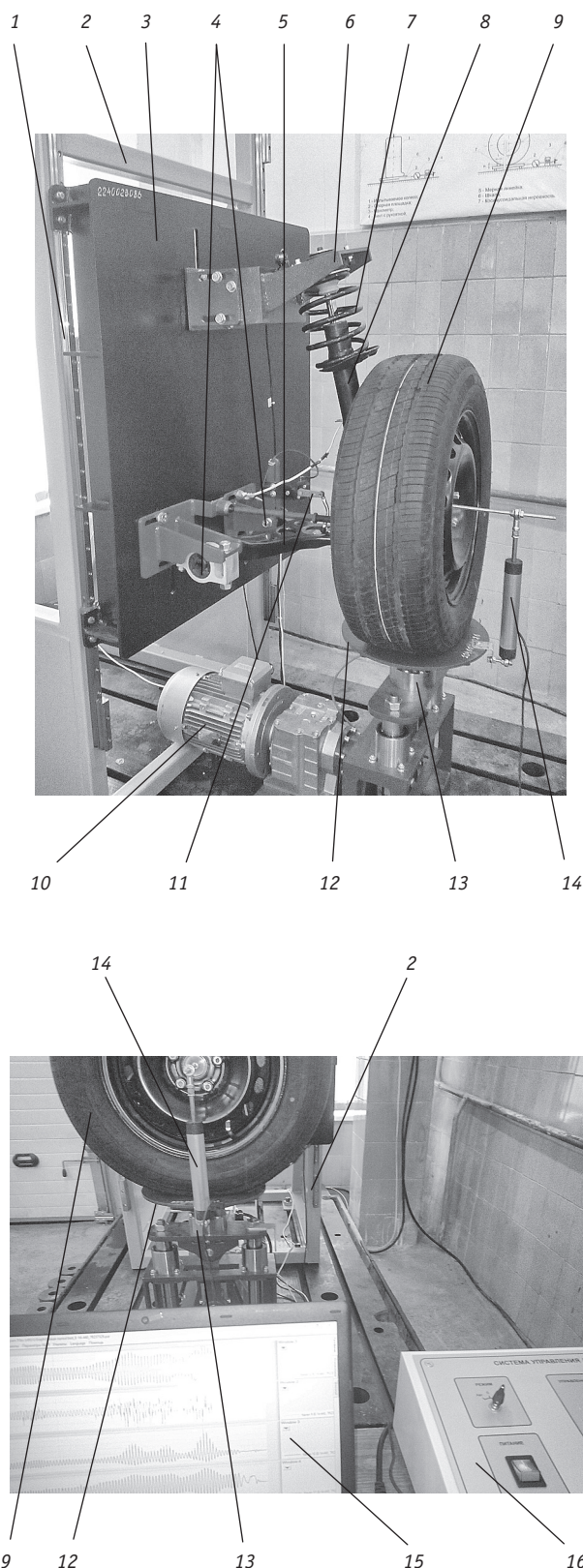


Рис. 1. Стенд передней подвески  
автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC

Таким образом, имитация движения автомобиля по неровностям, т.е. имитация вертикального колебательного движения колеса, осуществляется путем реализации вертикального возвратно-поступательного движения опоры 12. Причем скорость движения по неровностям моделируется за счет подбора соответствующей частоты колебаний опоры 12 и может плавно изменяться регулированием частоты вращения приводного электродвигателя 10.

Высота неровностей, т.е. амплитуда колебаний опоры 12, может бесступенчато регулироваться. Однако в наших экспериментах высота неровностей была принята неизменной и составляла 50 мм.

Все измерения фиксировались на ПК 15, а частота колебаний опоры и степень диссипации адаптивного амортизатора регулировались с помощью управляющего комплекса 16.

#### ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ОТРЫВА КОЛЕСА ОТ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА ПРИ ДВИЖЕНИИ АВТОМОБИЛЯ ПО НЕРОВНОСТЯМ

На рис. 2 приведен фрагмент осциллограммы испытаний автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC со штатной передней подвеской, где зафиксирован процесс отрыва колеса 9 от опоры 12. Здесь кривая *A* отображает величину усилия *F*, действующего со стороны колеса 9 на опору 12 вибратора, при этом  $F_s$  — усилие, действующее на опору в статическом состоянии колеса (когда автомобиль неподвижен). Кривая *B* отображает величину вертикального ускорения *a* подвижного груза 3 — имитатора правой передней четверти кузова автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC. Кривая *C* отображает расстояние *R* от центра колеса до опоры 12 вибратора. При этом  $R_s$  характеризует это расстояние при статическом состоянии автомобиля, когда автомобиль неподвижен, а  $R_0$  численно равно статическому радиусу колеса. Кривая *D* отображает величину вертикального перемещения (колебаний) *S* подвижного груза 3 (кузова автомобиля),  $S_s$  определяет вертикальное положение кузова в статическом состоянии автомобиля, т.е. когда он неподвижен. Ось абсцисс на графиках — это ось времени *t* протекания процесса.

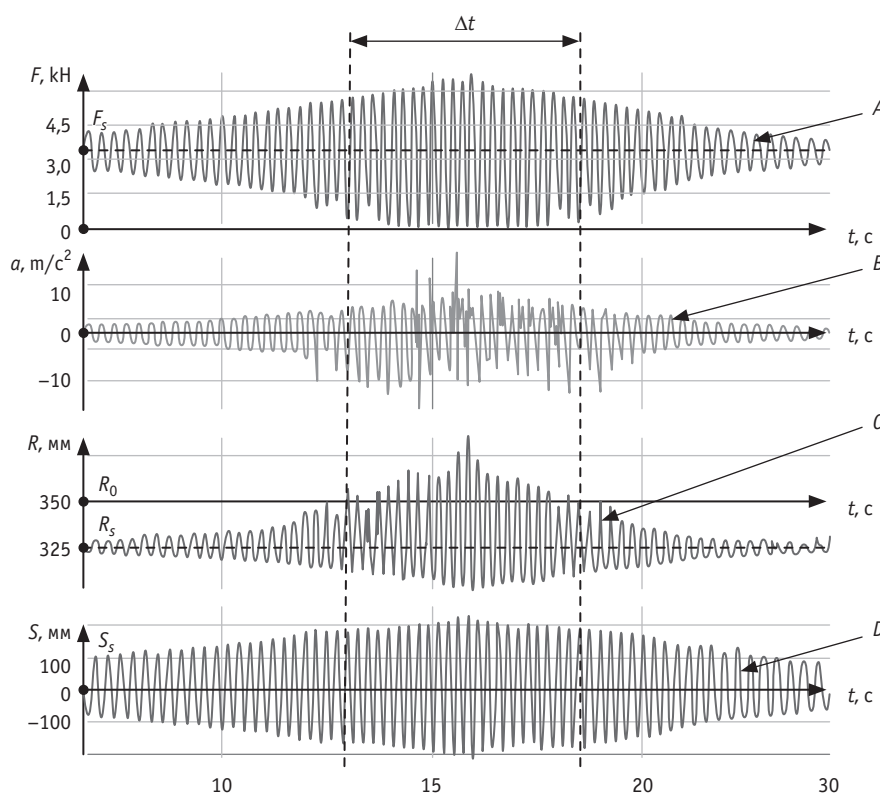


Рис. 2. Фрагмент осциллограммы испытаний передней подвески автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC штатной конструкции

Заметим, что при выполнении условия

$$R > R_0, \quad (1)$$

т.е. на участке  $\Delta t$  осциллограммы, имеет место отрыв колеса 9 от опоры 12.

Движение автомобиля по неровностям приводит к вертикальным колебаниям колеса 9 и подвижного груза (корпуса автомобиля) 3. При некоторых скоростных режимах движения автомобиля по неровностям (т.е. при некоторых частотах колебаний опоры 12 вибратора) и соответствующих настройках амортизатора происходит отрыв колеса 9 от опоры 12. Отрывы имеют место на участке  $\Delta t$  осциллограммы. При этом, как правило, значительно увеличиваются амплитуда  $S(t)$  вертикальных колебаний кузова и амплитуда  $a(t)$  вертикальных ускорений кузова, что четко зафиксировано на участке  $\Delta t$  осциллограммы. В совокупности эти обстоятельства значительно ухудшают управляемость, безопасность движения автомобиля, резко увеличивают динамическую нагруженность

пассажиров и перевозимого груза, одновременно существенно снижая комфортность, быстроходность автомобиля в целом и эффективность стабилизации положения его кузова.

Подчеркнем, что именно на участке  $\Delta t$  осциллограммы выполняется условие (1), т.е. расстояние *R* от центра колеса периодически превышает величину статического радиуса  $R_0$  колеса, при этом одновременно усилие *F* со стороны колеса на опору 12 периодически снижается до нуля, т.е. колесо 9 периодически отрывается от опоры 12.

Следует также отметить, что такой режим отрыва колеса зафиксирован при реализации штатного, заводского «алгоритма настройки» амортизатора.

Перечисленные негативные явления устраняются во всем диапазоне частот колебаний опоры вибратора (во всем скоростном диапазоне режима движения автомобиля по неровностям) за счет использования либо упругих элементов, либо адаптивных амортизаторов нашей конструкции. Еще более эффективным

будет одновременное введение в схему подвески разработанных нами конструкций упругих элементов и адаптивных амортизаторов.

Для примера на рис. 3 приведен фрагмент осциллограммы испытаний автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC с подвеской, снабженной адаптивным амортизатором предлагаемой конструкции.

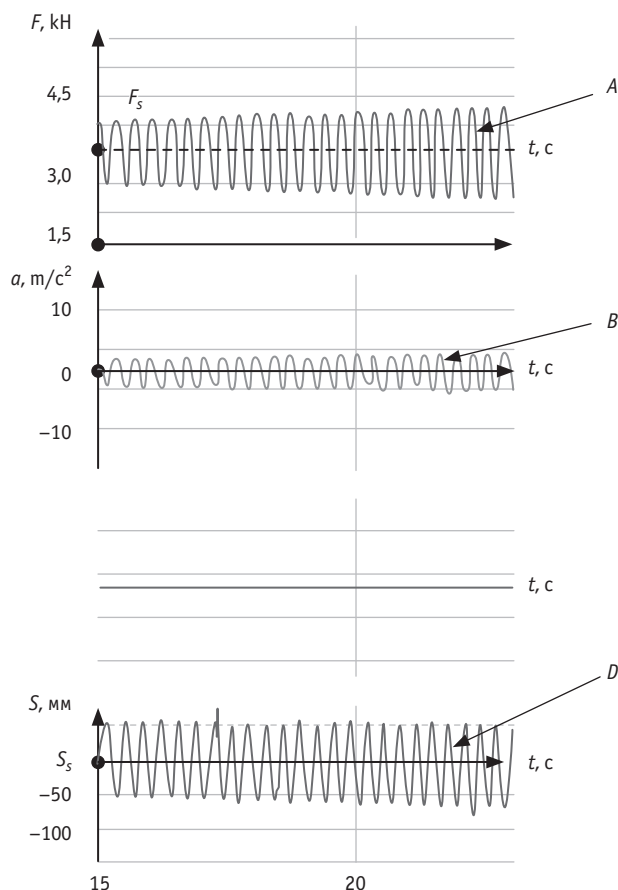


Рис. 3. Фрагмент осциллограммы испытаний передней подвески автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC с адаптивным амортизатором и упругими элементами предлагаемых конструкций

Здесь при испытаниях датчик, фиксирующий величину расстояния  $R$  от центра колеса до опоры 12 вибратора (см. рис. 1), был отключен (кривая отсутствует). Масштаб в осциллограммах рис. 2 и 3 сохранен.

Уже при непосредственном сопоставлении осциллограмм, представленных на рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что использование в передней подвеске автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC адаптивного амортизатора и упругого элемента наших конструкций позволяет во всем скоростном диапазоне режима движения по неровностям:

исключить явление отрыва колеса от опоры (от дорожного полотна) и соответственно повысить безопасность движения автомобиля и улучшить его управляемость;

более чем в 2 раза снизить вертикальные ускорения кузова, а следовательно, и динамические нагрузки на водителя и пассажиров (см. кривые  $B$  на рис. 2 и 3),

более чем в 2 раза снизить амплитуду колебаний кузова (см. кривые  $D$  на рис. 2 и 3).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сравнительные экспериментальные имитационные испытания подвески автомобиля VOLKSWAGEN PASSAT CC при движении по неровностям показали, что при некоторых скоростных режимах неизбежно возникает отрыв колеса от опорной поверхности (от поверхности дорожного полотна), и, как следствие, существенно ухудшаются эксплуатационные характеристики автомобиля. В частности, нарушается контакт колеса с поверхностью дорожного полотна, значительно увеличиваются амплитуда вертикальных колебаний кузова и амплитуда вертикальных ускорений кузова. Это, в свою очередь, ухудшает управляемость, безопасность движения автомобиля, резко увеличивает динамическую нагруженность пассажиров и перевозимого груза, одновременно снижая комфортабельность, быстроходность автомобиля в целом и эффективность стабилизации положения его кузова.

Вместе с тем отмеченные негативные явления эффективно устраняются во всем скоростном диапазоне режима движения автомобиля по неровностям за счет использования адаптивных амортизаторов и упругих элементов предлагаемых нами конструкций. Подобный эффект наблюдается и в конструкциях других транспортных средств.

## Литература

1. Adaptive suspension of vehicles with ultra-wide range of control performance / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov : proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2015). London, United Kingdom, 2015. Vol. II. Pp. 1076–1083.
2. Соломатин Н. С., Черепанов Л. А., Окунев А. П. Особенности моделирования системы поддрессирования силового агрегата переднеприводного легкового автомобиля методом конечных элементов // Проведение научных исследований в области машиностроения : матер. Всерос. науч.-техн. конф. Тольятти : ТГУ, 2009. Т. 2. С. 219–221.
3. Гидропневматическая подвеска [Электронный ресурс]. URL: <http://systemsauto.ru/pendant/hydroactive.html> (дата обращения: 14.10.2018).

## References

1. Adaptive suspension of vehicles with ultra-wide range of control performance / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov : proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2015). London, United Kingdom, 2015. Vol. II. Pp. 1076–1083.
2. Solomatin N. S., Cherepanov L. A., Okunev A. P. Peculiarities of modeling power unit cushioning system of front-wheel drive car by finite element method [Osobennosti modelirovaniya sistemy podressirovaniya silovogo agregata perednepriwodnogo legkovogo avtomobilya metodom konechnykh elementov] // Carrying out scientific research in engineering : proceedings of All-Russian scientific and technical conference. Tolyatti : TSU, 2009. Vol. 2. Pp. 219–221.
3. Hydropneumatic suspension [Gidropnevmaticheskaya podveska]. [Electronic resource]. URL: <http://systemsauto.ru/pendant/hydroactive.html> (access date: 14.10.2018).



4. An adaptive suspension of vehicles with new principle of action / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, Yu. Rozhdestvenskiy, et al. // SAE Technical Papers. September. 2014.
5. Программа самообучения 406. Система адаптивного управления ходовой части DCC. Конструкция и принцип действия [Электронный ресурс]. URL: [http://vwts.ru/pps/pps\\_406\\_adapt\\_podveska\\_dcc\\_rus.pdf](http://vwts.ru/pps/pps_406_adapt_podveska_dcc_rus.pdf) (дата обращения: 14.10.2018).
6. Adaptive suspension of vehicles with wide range of control / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, A. Keller, et al. // SAE Technical Papers. October. 2016.
7. Дубровский А. Ф., Абрамов М. И., Сакулин Ю. А. Выбор параметров подвески грузовых автомобилей «Урал» для повышения скорости движения по изношенным грунтовым дорогам // Вестник ОГУ. Технические науки. 2014. № 10 (171). С. 66–75. ISSN 1814–6465.
8. New approach to adaptive suspension of vehicles / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov : proceedings of World Conference on Engineering and Applied Sciences (WCEAS 2015). KL, Malaysia, 2015.
9. Basic characteristics of adaptive suspensions of vehicles with new principle of operation / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov // SAE International Journal of Commercial Vehicles. 2017. Vol. 10. Issue 1. Pp. 193–203.
10. Магнитореологический амортизатор / Е. П. Гусев, А. М. Плотников, С. Ю. Воеводов : пат. 2232316 Рос. Федерация. № 2002104590/11 ; заявл. 20.02.02 ; опубл. 10.07.04, Бюл. № 19.
11. Адаптивный амортизатор подвески транспортного средства / А. Ф. Дубровский, С. А. Дубровский, О. А. Дубровская : пат. 2474739 Рос. Федерация. № 2011142343/11 ; заявл. 19.10.11 ; опубл. 10.02.13, Бюл. № 4.
12. Адаптивный амортизатор / А. Ф. Дубровский, С. А. Дубровский, О. А. Дубровская : пат. 2500936 Рос. Федерация. № 2012131391/11 ; заявл. 20.07.12 ; опубл. 10.12.13, Бюл. № 34.
13. Адаптивный амортизатор подвески транспортного средства / А. Ф. Дубровский, С. А. Дубровский, О. А. Дубровская : пат. 2479766 Рос. Федерация. № 2011137582/11 ; заявл. 12.09.11 ; опубл. 20.04.13, Бюл. № 11.
14. Properties of new adaptive suspension of vehicles / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov : proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2017). London, United Kingdom, 2017. Vol. II. Pp. 900–905.
15. Adaptive suspension of vehicles and its characteristics / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov : proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2017). San Francisco, USA, 2017. Vol. II.
16. Basic characteristics of adaptive suspensions / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov // SAE World Congress Experience. Michigan, United States, 2017.
17. Adaptive suspension of vehicles with wide range of control / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov // SAE International Journal of Commercial Vehicles. 2017.
18. Торсионный стержнево-трубчатый упругий элемент подвески транспортного средства / А. Ф. Дубровский, С. А. Дубровский, О. А. Дубровская, Г. Г. Дубровский : пат. 2522773 Рос. Федерация. № 2012152220/11 ; заявл. 04.12.12 ; опубл. 20.07.14, Бюл. № 20.
4. An adaptive suspension of vehicles with new principle of action / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, Yu. Rozhdestvenskiy, et al. // SAE Technical Papers. September. 2014.
5. Self-study program 406. DCC adaptive chassis control system. Design and operating principle [Programma samoobucheniya 406. Sistema adaptivnogo upravleniya khodovoy chasti DCC. Konstruktsiya i printsip deystviya]. [Electronic resource]. URL: [http://vwts.ru/pps/pps\\_406\\_adapt\\_podveska\\_dcc\\_rus.pdf](http://vwts.ru/pps/pps_406_adapt_podveska_dcc_rus.pdf) (access date: 14.10.2018).
6. Adaptive suspension of vehicles with wide range of control / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, A. Keller, et al. // SAE Technical Papers. October. 2016.
7. Dubrovsky A. F., Abramov M. I., Sakulin Yu. A. Selection of «Ural» trucks suspension parameters to increase the speed of travelling on deteriorated soil roads [Vybor parametrov podveski gruzovykh avtomobiley «Ural» dlya povysheniya skorosti dvizheniya po iznoshennym gruntovym dorogam] // Vestnik of the Orenburg State University. Technical sciences. 2014. No. 10 (171). Pp. 66–75. ISSN 1814–6465.
8. New approach to adaptive suspension of vehicles / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov : proceedings of World Conference on Engineering and Applied Sciences (WCEAS 2015). KL, Malaysia, 2015.
9. Basic characteristics of adaptive suspensions of vehicles with new principle of operation / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov // SAE International Journal of Commercial Vehicles. 2017. Vol. 10. Issue 1. Pp. 193–203.
10. Magnetorheological shock absorber [Magnitореологический амортизатор] / Е. П. Гусев, А. М. Плотников, С. Ю. Воеводов : пат. 2232316 Russian Federation. No. 2002104590/11 ; filed 20.02.02 ; publ. 10.07.04, Bulletin No. 19.
11. Vehicle suspension adaptive shock absorber [Adaptivnyy amortizator podveski transportnogo sredstva] / A. F. Dubrovskiy, S. A. Dubrovskiy, O. A. Dubrovskaya : пат. 2474739 Russian Federation. No. 2011142343/11 ; filed 19.10.11 ; publ. 10.02.13, Bulletin No. 4.
12. Adaptive shock absorber [Adaptivnyy amortizator] / A. F. Dubrovskiy, S. A. Dubrovskiy, O. A. Dubrovskaya : пат. 2500936 Russian Federation. No. 2012131391/11 ; filed 20.07.12 ; publ. 10.12.13, Bulletin No. 34.
13. Vehicle suspension adaptive shock absorber [Adaptivnyy amortizator podveski transportnogo sredstva] / A. F. Dubrovskiy, S. A. Dubrovskiy, O. A. Dubrovskaya : пат. 2479766 Russian Federation. No. 2011137582/11 ; filed 12.09.11 ; publ. 20.04.13, Bulletin No. 11.
14. Properties of new adaptive suspension of vehicles / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov : proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2017). London, United Kingdom, 2017. Vol. II. Pp. 900–905.
15. Adaptive suspension of vehicles and its characteristics / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov : proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2017). San Francisco, USA, 2017. Vol. II.
16. Basic characteristics of adaptive suspensions / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov // SAE World Congress Experience. Michigan, United States, 2017.
17. Adaptive suspension of vehicles with wide range of control / A. Dubrovskiy, S. Aliukov, S. Dubrovskiy, A. Alyukov // SAE International Journal of Commercial Vehicles. 2017.
18. Torsional rod-tube resilient element of vehicle suspension [Torsionnyy stержnevo-trubchatyy uprugiy element podveski transportnogo sredstva] / A. F. Dubrovskiy, S. A. Dubrovskiy, O. A. Dubrovskaya, G. G. Dubrovskiy : пат. 2522773 Russian Federation. No. 2012152220/11 ; filed 04.12.12 ; publ. 20.07.14, Bulletin No. 20.

Объем статьи 0,85 авторских листа

УДК 330.42

**Олег Федорович Данилов, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин Строительного института Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия,**

**Андрей Николаевич Паршуков, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин Строительного института Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия**

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОИМОСТИ МЕСТА НА ПЛАТНОЙ ПАРКОВКЕ

**Oleg Fedorovich Danilov, DSc in Engineering, Professor, Road Transport, Construction and Road Machines Department, Building Institute, Tyumen Industrial University, (TIU), Tyumen, Russia,**

**Andrey Nikolayevich Parshukov, PhD in Engineering, Associate Professor, Road Transport, Construction and Road Machines Department, Building Institute, Tyumen Industrial University, (TIU), Tyumen, Russia**

## Method of determining the cost of a parking space for paid parking

### Аннотация

В статье предложена оригинальная методика расчета оптимального динамического тарифа за место на платных парковках. Тариф определяется из условия обеспечения 15 % свободных мест на парковке даже в часы пик и заполняемости не менее 60 % в остальное время и, таким образом, зависит от спроса на парковочную услугу. Оптимальная стоимость парковочного места рассчитывается на основе разработанной математической модели. Параметры модели для каждой парковки могут быть определены в результате эксперимента. Предлагаемая методика позволяет корректировать стоимость парковочного места в зависимости от изменения спроса на него. Модель может быть использована при реализации стратегии городской мобильности, предусматривающей постепенное целенаправленное сокращение числа парковочных мест.

**Ключевые слова:** услуга платной парковки, динамический тариф на платной парковке, математическая модель платной парковки, оптимальная заполняемость парковочных мест, стратегия городской мобильности.

### Summary

The paper proposes an original method of calculating the optimal dynamic tariff for parking in paid parking lots. The rate is determined by the provision of 15 % of free parking spaces, even in the «peak hours», and occupancy of at least 60 % in the rest of the time. Thus, the rate depends on the demand for parking services. The optimal cost of parking space is determined on the basis of the developed mathematical model of paid parking. Model parameters for each parking lot can be determined as a result of the experiment. This technique allows you to adjust the cost of parking space depending on the change in demand for it. The model can be useful in the implementation of the urban mobility strategy, which implies a gradual targeted reduction in the number of parking spaces.

**Keywords:** paid parking, dynamic fare paid parking, a mathematical model of paid parking, the optimum occupancy rate of parking spaces, the strategy of urban mobility.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-74-76

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

О парковочной политике в России заговорили сравнительно недавно. Это объясняется тем, что рост автомобилизации в нашей стране начался значительно позже, чем в Европе, США или Японии. Именно поэтому проблемы, которые в Европе, например, возникли еще в 1960–1970-х гг., российские города ощутили лишь в последние 15–20 лет [1]. И первыми с перегруженностью улично-дорожной сети (УДС) автомобильным транспортом и с хаотичными парковками, парализующими городские магистрали, столкнулись наши крупнейшие мегаполисы, такие как Москва и Санкт-Петербург. Прежде чем в столице решились на пилотный проект по введению платных парковок на УДС, город несколько лет подряд лидировал в мировых рейтингах по длине и продолжительности дорожных заторов [2].

В основе парковочной политики лежит ограничение спроса на парковочные места в центральной части города. Практика, принятая в Западной Европе, доказывает неизбежность применения подобных мер (см., например, [3, 4]). Причем размер платы за пользование парковками общего пользования (парковочными местами) должен быть направлен на достижение следующих целей [5, 6]:

обеспечение доступности парковочных мест (принцип комфорта), т.е. не менее 15 % всех мест на парковке должно быть свободно даже в часы пик;

снижение уровня загрузки улично-дорожной сети.

Однако в проекте методических рекомендаций, опубликованных Минтрансом России 3 августа 2018 г. [7], размер платы за услугу платной парковки не учитывает возможную динамику спроса<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Очевидно, спрос на парковку будет меняться вслед за изменением цены за место на этой и окружающих парковках.



В настоящей статье рассматривается методика определения стоимости парковочного места, в основу которой положена математическая модель парковки. Предлагаемая методика обеспечивает выполнение принципа комфортности, так как стоимость парковочного места определяется рыночным спросом.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОИМОСТИ МЕСТА НА ПЛАТНОЙ ПАРКОВКЕ

### Терминология

Прежде чем перейти к математическому моделированию, сформируем терминологию задачи.

Событие — приезд машины на платную стоянку. Поскольку это событие имеет случайный характер, оно может быть описано вероятностью  $P$ . Характеристики парковки:

$n$  — число мест;

$T_\lambda$  и  $T_\mu$  — среднее время появления и нахождения машины на парковке соответственно;

$\lambda$  и  $\mu$  — соответственно интенсивность входящего и исходящего потока машин,

$$\lambda = \frac{1}{T_\lambda}; \mu = \frac{1}{T_\mu};$$

$P_i$  — вероятность того, что на парковке занято ровно  $i$  мест.  
Нормировочное условие:

$$P_0 + P_1 + \dots + P_n = 1.$$

Граф состояний системы представлен на рис. 1 (для случая  $n = 2$ ).

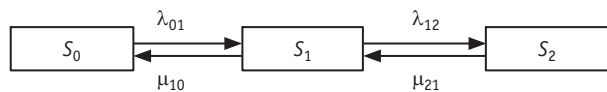


Рис. 1. Граф состояний системы

Отметим, что математическое описание платной парковки соответствует модели «гибель — размножение» в теории массового обслуживания (см., например, [8, 9]). Далее приведем основные формулы (заимствованные из [9]), описывающие работу платной парковки.

### Математическая модель

Вероятности  $P_i$  находим по следующим формулам:

$$P_1 = \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \cdot P_0 \text{ — вероятность того, что занято одно место;}$$

$$P_2 = \frac{\lambda_{12}}{\mu_{21}} \cdot P_1 = \frac{\lambda_{12} \cdot \lambda_{01}}{\mu_{21} \cdot \mu_{10}} \cdot P_0 \text{ — вероятность того, что занято}$$

два места,  
и т.д.

Поскольку в данном случае

$$\lambda_{01} = \lambda_{12} = \dots = \lambda_{n-1 n} = \lambda; \mu_{10} = \mu_{21} = \dots = \mu_{n n-1} = \mu,$$

то формулы расчета вероятностей принимают следующий вид:

$$P_1 = \frac{\lambda}{\mu} \cdot P_0, P_2 = \frac{\lambda}{\mu} \cdot P_1 = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \cdot P_0, \dots, P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0. \quad (1)$$

Подставляя все эти вероятности в условие нормировки, получаем

$$\left(1 + \frac{\lambda}{\mu} + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n\right) \cdot P_0 = 1.$$

Из последнего условия находим выражение для вероятности  $P_0$ :

$$P_0 = \frac{1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{n+1}}{1 - \frac{\lambda}{\mu}},$$

где  $P_0$  — вероятность того, что парковка простаивает.

Вероятность того, что машина, приехавшая на парковку, получит отказ (событие  $P_n$ ):

$$P_{\text{отк}} = P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0.$$

Эффективность работы парковки можно оценить по среднему количеству машин, находящихся в течение измеряемого периода времени.

Абсолютная пропускная способность  $A$  рассчитывается по формуле [9]

$$A = \lambda \cdot P_{\text{обсл}} = \lambda \cdot (1 - P_n).$$

Среднее количество мест, занятых машинами  $\bar{n}$  (см. [9]):

$$\bar{n} = \frac{A}{\mu};$$

коэффициент использования мест:

$$k = \frac{\bar{n}}{n}.$$

Чтобы использовать модель, необходимо провести эксперимент (для каждой парковки отдельно), в котором восстанавливается график интенсивностей  $\lambda(X)$  и  $\mu(X)$  в зависимости от стоимости одного парковочного места  $X$ . Очевидно, что с ростом цены  $X$  (при прочих равных условиях) спрос на парковку [а следовательно, и функции  $\lambda(X)$  и  $\mu(X)$ ] будет монотонно падать, в пределе стремясь к нулю (рис. 2).

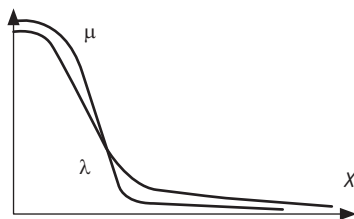


Рис. 2. График изменения интенсивностей  $\lambda$  и  $\mu$  от стоимости  $X$

Один из ключевых вопросов, относящихся к поиску баланса предложения и спроса на парковку, — оптимальная заполняемость парковочных мест. Согласно мировой практике администрирования организованных парковочных пространств, оптимальная заполняемость должна составлять от 60 % во внепиковые и до 85 % в пиковые часы [5, 6]. Подобная стратегия означает процесс корректировки цен на парковку в зависимости от показателя заполняемости.

Таким образом, целевую функцию определим как ограничение на варьируемый параметр  $X$  в виде неравенства

$$0,60 \leq k(X) \leq 0,85. \quad (2)$$

Формулы (1)–(2) представляют собой математическую модель отдельного парковочного пространства. Графики интенсивностей  $\lambda$  и  $\mu$  устанавливаются экспериментально. Назначая уровень заполненности парковки (в среднем в течение дня или в пиковые часы), мы можем определить по имеющимся графикам стоимость парковочного места  $X$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предложенный метод был апробирован в эксперименте, проведенном на платной плоскостной парковке закрытого типа, расположенной в Тюмени на ул. Первомайской, 20 (зона № 901).

## Литература

1. Михайлов А. С. Управление рынком перемещений городского населения : моногр. — Алма-Ата : НИЦ Гылым, 2003. 237 с.
2. Департамент транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры города Москвы [Сайт]. URL: [https://www.mos.ru/upload/documents/files/8117/20170412\\_Godovoiochet.pdf](https://www.mos.ru/upload/documents/files/8117/20170412_Godovoiochet.pdf) (дата обращения: 01.11.2018).
3. London Parking [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ncp.co.uk/parking-solutions/cities/london> (дата обращения: 15.04.2018).
4. En strategisk inriktning för storstadsgator i världsklass Framkomlighetsstrategi för Stockholm 2030 [Электронный ресурс]. URL: <http://international.stockholm.se/visit-stockholm/traffic-and-public-transport/> (дата обращения: 17.06.2018).
5. Vickrey W. The economizing of curb parking space // Traffic Engineering. 1954. November. Pp. 62–67.
6. Shoup D. Cruising for parking // Transport Policy. 2006. Vol. 13 (6). Pp. 479–486.
7. Методические рекомендации по определению размера платы за пользование платными парковками / Минтранс России [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/54593.html/> (дата обращения: 03.08.2018).
8. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. / 12-е изд. М. : Юрайт, 2014. 479 с.
9. Павский В. А. Теория массового обслуживания : учеб. пособие / Кемеровский технол. ин-т пищевой пром-сти. Кемерово, 2008. 116 с.

Эта парковочная зона имеет 182 места, работает с 8.00 до 20.00. Эксперимент проводился дважды: 20 апреля 2018 г. с 8.00 до 20.00 (при этом стоимость парковочного места составляла 30 руб.<sup>2</sup>) и 18 мая 2018 г. с 8.00 до 20.00 (стоимость парковочного места составляла 35 руб.<sup>3</sup>).

Измерения проводились путем фиксации фактов заезда на парковку и выезда с парковки транспортных средств. Полученные данные обработаны статистическими методами и сведены в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты эксперимента

Дата проведения эксперимента	Стоимость парковочного места, руб./ч	$T_{\lambda, ч}$	$\lambda, 1/ч$	$T_{\mu, ч}$	$\mu, 1/ч$
20.04.2018	30	2,4	0,42	0,4	2,5
18.05.2018	35	1,8	0,55	0,36	2,8

После линейной аппроксимации кривых  $\lambda(X)$  и  $\mu(X)$  по измеренным двум точкам была получена оптимальная стоимость парковочного места  $X = 64,7$  руб./ч.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена разработанная методика определения стоимости места на платной парковке в зависимости от изменения спроса на него. Математическая модель, положенная в основу методики, может быть использована при реализации стратегии городской мобильности, предусматривающей постепенное целенаправленное сокращение числа парковочных мест.

<sup>2</sup>На основании постановления Администрации г. Тюмени № 103-пк от 25.04.2016 г.

<sup>3</sup>На основании постановления Администрации г. Тюмени № 223-пк от 23.04.2018 г. с 23.04.2018 г. стоимость парковочного места была изменена и стала составлять 35 руб.

## References

1. Mikhaylov A. S. Management of urban displacement market [Upravlenie rynkom peremeshheniy gorodskogo naseleniya]: monograph. Almaty, 2003. 237 p.
2. Department for Transport and Road Infrastructure Development [Departament transporta i razvitiya dorozhno-transportnoy infrastruktury goroda Moskvy]. [Site]. URL: [https://www.mos.ru/upload/documents/files/8117/20170412\\_Godovoiochet.pdf](https://www.mos.ru/upload/documents/files/8117/20170412_Godovoiochet.pdf) (access date: 01.11.2018).
3. London Parking [Electronic resource]. URL: <http://www.ncp.co.uk/parking-solutions/cities/london> (access date: 15.04.2018).
4. En strategisk inriktning för storstadsgator i världsklass Framkomlighetsstrategi för Stockholm 2030 [Electronic resource]. URL: <http://international.stockholm.se/visit-stockholm/traffic-and-public-transport/> (access date: 17.06.2018).
5. Vickrey W. The economizing of curb parking space // Traffic Engineering. 1954. November. Pp. 62–67.
6. Shoup D. Cruising for parking // Transport Policy. 2006. Vol. 13 (6). Pp. 479–486.
7. Guidelines for determining the amount of fee for the use of paid parking [Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu razmera platy za pol'zovanie platnymi parkovkami] / The Russian Federation Ministry of Transportation [Electronic resource]. URL: <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/54593.html/> (access date: 03.08.2018).
8. Gmurman V. E. Probability theory and mathematical statistics [Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika]: textbook / 12<sup>th</sup> ed. Moscow : Uralt Publishing House, 2014. 479 p.
9. Pavskiy V. A. Queueing theory [Teoriya massovogo obsluzhivaniya]: textbook. Kemerovo, 2008. 116 p.

УДК 629.4.077–592.522.4/5

**Александр Петрович Буйносов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**

**Денис Владимирович Волков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**

**Евгений Валерьевич Федоров, старший преподаватель кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ И ПЛОТНОСТИ ТОРМОЗНОЙ СЕТИ ПОЕЗДА

**Alexander Petrovich Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**

**Denis Vladimirovich Volkov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**

**Evgeniy Valeryevich Fedorov, Senior Lecturer, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

## Automatic control of train braking system integrity and density

### Аннотация

Автоматические тормоза подвижного состава — основное средство, обеспечивающее безопасность движения поездов. Неисправность автотормозов либо потеря тормозной эффективности могут привести к серьезной аварии или крушению поезда, поэтому контроль технического состояния тормозного оборудования имеет особенно важное значение. В статье рассмотрены разработанный авторами способ автоматического контроля целостности и плотности тормозной сети поезда, использование которого позволит предотвратить случаи отправления поезда на перегон с перекрытыми концевыми кранами.

**Ключевые слова:** поезд, подвижной состав, тормоз, сеть, целостность, плотность, контроль, автоматизация.

### Summary

Rolling stock automatic air brakes are the main instrument of ensuring the safe railway operation. Failure of automatic air brakes or loss of their braking efficiency can lead to a serious accident or train crash, so the control of brake equipment technical conditions is particularly important. The paper considers a method of automatic control of train braking system integrity and density developed by the authors. The use of this method will prevent the cases of train departure with overlapped angle cocks.

**Keywords:** train, rolling stock, brake, braking system, integrity, density, control, automation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-77-80

**П**невматические сети поезда выступают в качестве источника сжатого воздуха для управления тормозными процессами и силового воздействия на механическую часть тормозного оборудования железнодорожного подвижного состава [1].

Проверка технического состояния тормозного оборудования перед выездом из депо предусматривает проверку плотности тормозной и питательной сети [2]. Проверка фактической производительности компрессорного агрегата по времени наполнения главных резервуаров осуществляется при выпуске локомотива после проведения ремонта или технического обслуживания [2].

В перечень работ, выполняемых локомотивной бригадой при приемке локомотива, входит проверка плотности тормозной и питательной сети. Правила технического обслуживания подвижного состава требуют проверять плотность тормозной и питательной сети при поездном положении крана машиниста и вспомогательного тормоза, закрытом комбинированном кране и неработающих компрессорных агрегатах. Понижение величины давления, контролируемое по показаниям манометра, должно быть в тормозной магистрали с зарядного давления не более 0,02 МПа в течение 1 мин или 0,05 МПа в течение 2,5 мин. В питательной сети понижение величины давления с 0,8 МПа допускается темпом не более 0,02 МПа в течение 2,5 мин. Перед проверкой этих параметров локомотив необходимо надежно закрепить от ухода [2].

При выполнении операции полного опробования автотормозов машинист локомотива и осмотрщик вагонов должны проверить плотность тормозной магистрали поезда после ее наполнения сжатым воздухом до величины зарядного

давления [3]. Для проверки плотности тормозной сети в пассажирском поезде перекрывают комбинированный кран или кран двойной тяги и по прошествии 20 с после закрытия крана контролируют по показаниям манометра снижение давления в тормозной магистрали: понижение давления в течение 1 мин должно быть не более 0,02 МПа.

Для проверки плотности тормозной магистрали в грузовом поезде после полного наполнения сжатым воздухом до установленной величины давления ждут выключения компрессорного агрегата регулятором давления и дальнейшего снижения этого давления на 0,04–0,05 МПа, затем контролируют время дальнейшего его понижения на 0,05 МПа при поездном положении крана машиниста. Для грузовых поездов с локомотивами, находящимися в голове состава, значения наименьшего допустимого времени при проверке плотности тормозной магистрали в зависимости от серии локомотива, количества вагонов и общего объема главных резервуаров приведены в табл. 1 [2].

Характерным для табл. 1 является применение нормативов при интервальном распределении числа осей с шагом 50 ед. (рис. 1), рекомендации бригаде по ручному учету влияния зарядного давления, а также проверке отклонения показателей плотности в заряженном состоянии и после ступени торможения.

В некоторых случаях, например после стоянки поезда более 30 мин, машинист обязан повторно проверить плотность тормозной магистрали, которая не должна отличаться от плотности, представленной в «Справке об обеспечении поезда тормозами и исправном их действии», более чем на 20 % в большую или меньшую сторону [2].

Согласно действующим правилам [2], машинист локомотива должен выполнить множество арифметических действий с визуальным наблюдением и измерением требуемых параметров даже при одной операции проверки плотности пневматических сетей [4]. Например, подождать, когда давление в глав-

ных резервуарах локомотива снизится на требуемую величину с момента выключения компрессорного агрегата, визуально проконтролировать время дальнейшего понижения давления на указанную в правилах величину, вспомнить объем главных резервуаров локомотива, количество вагонов и обратиться к нормативам табл. 1 для сравнения, а также при необходимости рассчитать поправку на отклонение величины зарядного давления. Таким образом, приведенные факты свидетельствуют о недостаточном уровне внедрения средств машинной самодиагностики [5].

Требования правил [2] в отношении проверки плотности должны исходить из представления поезда как основной продукции парка отправления, где производится полное опробование автотормозов, проверка плотности выполняется для всех пневматических сетей поезда.

Контроль состояния пневматической сети поезда оказывает существенное влияние на действие автоматических тормозов, которые представляют собой универсальное средство, обеспечивающее безопасность движения. И наиболее эффективный способ такого контроля — мониторинг расхода сжатого воздуха в тормозной системе поезда (рис. 2) [6].

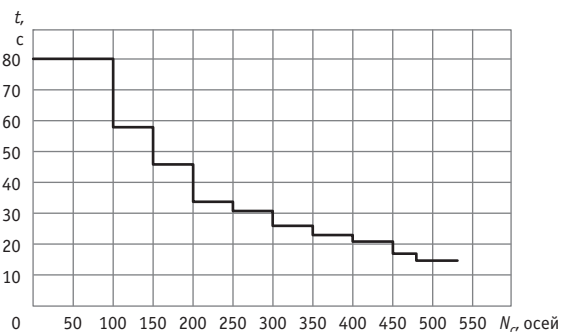
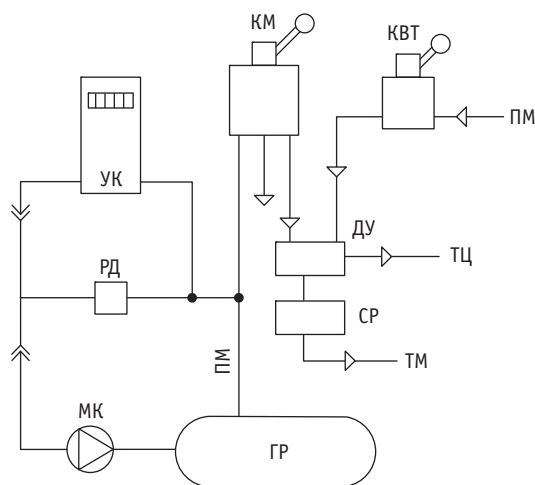


Рис. 1. Зависимость времени понижения давления в главных резервуарах локомотива на 0,05 МПа от длины поезда ( $V = 1440$  л)

Таблица 1

Время понижения давления на 0,05 МПа  
в главных резервуарах локомотива при проверке плотности тормозной магистрали поезда

Общий объем главных резервуаров локомотива $V$ , л	Время при длине состава (в осях), с									
	до 100	101–150	151–200	201–250	251–300	301–350	351–400	401–450	451–480	481–530
1000	58	40	29	25	23	20	17	15	13	11
1200	69	46	34	29	25	22	20	18	15	13
1500	80	58	46	34	31	26	23	21	17	15
1800	98	69	52	46	38	33	29	26	22	20
2000	104	75	58	52	40	36	32	29	24	22
2500	129	93	71	64	51	45	40	36	30	28
3000	207	138	102	87	75	66	60	51	45	33



**Рис. 2. Комплекс устройств контроля тормозной сети:**

КМ — кран машиниста; КВТ — кран вспомогательного тормоза;  
 УК — блок контроля; РД — регулятор давления;  
 МК — мотор-компрессорный агрегат; ГР — главный резервуар;  
 СР — сигнализатор разрыва; ДУ — блокировка тормозов  
 с дистанционным управлением; ТМ — тормозная магистраль;  
 ПМ — питательная магистраль; ТЦ — линия тормозных цилиндров

Расход сжатого воздуха измеряют с помощью контрольной емкости, роль которой играет объем главных резервуаров (ГР) локомотива. Величина расхода определяется за время понижения давления в ГР от момента выключения и до момента включения компрессора [6].

Расчетная формула для расхода  $q_y$  имеет вид

$$q_y = \Delta p \frac{V}{t_y} \text{ или } q_y = \frac{Q_y}{t_y}, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  — установленный перепад давления по регулятору давления, МПа;

$V$  — объем главных резервуаров, л;

$Q_y$  — количество воздуха, израсходованного на утечки за полный цикл понижения давления, л;

$t_y$  — время снижения величины давления в главных резервуарах локомотива на величину установленного перепада, с.

Однако ни величина расхода  $q_y$ , ни время  $t_y$  цикла понижения давления не могут служить критерием выполнения установленного норматива плотности. Конкретный результат можно получить, если использовать норматив  $q_0$  величины расхода сжатого воздуха на один условный вагон ( $q_0 = 0,33$  л/с) [7].

Тогда число вагонов с нормированной плотностью

$$N = q/q_0. \quad (2)$$

Показатель плотности для поезда в виде числа условных вагонов определяется по выражению

$$N_{\Pi} = N_{\text{л}} + N_{\text{в}}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{л}}$  и  $N_{\text{в}}$  — показатели плотности локомотива и состава вагонов соответственно.

Если предварительно был определен показатель  $N_{\text{л}}$ , то в парке отправления можно дать оценку качества подготовки пневматической сети состава вагонов  $N_{\text{в}} = N_{\Pi} - N_{\text{л}}$ . Показатель  $N_{\text{в}}$  не должен превышать фактическое число вагонов в поезде. Если ввести в расчет время полного цикла компрессорной установки, то фактическая производительность компрессора (с учетом питания утечек)

$$N_{\text{к}} = \frac{q}{q_0} \left( \frac{1}{t_{\text{к}}} + \frac{1}{t_{\text{у}}} \right), \quad (4)$$

где  $t_{\text{к}}$  — время работы компрессорного агрегата за цикл нагнетания.

Для повышения точности расчеты должны производиться с учетом фактического объема питательных сетей  $V_{\text{ф}}$ , который определяется введением дополнительного расхода известной величины из тормозной магистрали по методике [8]. Таким способом решаются задачи по определению фактического объема питательной сети, производительности компрессора и реализации раздельного контроля состояния пневматической сети локомотива, поезда и вагонов [7, 9].

Для поезда общий расход зависит от суммарного расхода пневматических сетей локомотива и состава вагонов, а также от соотношения этих расходов, что не позволяет контролировать целостность тормозной магистрали отдельно. При помощи рассмотренного метода контроля можно определить плотность тормозной сети поезда и сравнить результат проверки с нормативом допустимого расхода. В развитие этого метода предлагаем использовать способ определения количества тормозных комплектов, подключенных к тормозной магистрали, что позволит при нарушении ее целостности выявить место перекрывания конечных кранов.

Сущность способа состоит в следующем. Чтобы найти число тормозных единиц или длину тормозной магистрали поезда, необходимо располагать показателем величины расхода сжатого воздуха на один вагон. Таким единственным приемлемым показателем является величина дополнительной разрядки, выполняемой каждым воздухораспределителем в составе при торможении. Величина дополнительной разрядки тормозной магистрали составляет  $0,5$  кгс/см<sup>2</sup> [10, 11]. Тогда в качестве основного показателя результата контроля используется количество сжатого воздуха, идущего на восстановление исходного состояния тормозов после дополнительной разрядки.

Предварительно находят расход сжатого воздуха на утечки в тормозной магистрали поезда по формуле (1), затем сразу после отключения компрессорного агрегата вызывают срабатывание воздухораспределителей состава на дополнительную разрядку тормозной магистрали. После чего определяют величину расхода сжатого воздуха  $q_{\text{др}}$  при одновременном питании тормозной сети в процессе дополнительной разрядки по формуле



$$q_{др} = \frac{\Delta p V}{t_{др}}, \quad (5)$$

где  $t_{др}$  — время понижения величины давления в главных резервуарах локомотива на величину перепада  $\Delta p$  при срабатывании воздухораспределителей на дополнительную разрядку, с.

К утечке сжатого воздуха из тормозной магистрали добавляется количество сжатого воздуха  $Q_{др}$ , идущего на компенсацию дополнительной разрядки, поэтому уравнение баланса сжатого воздуха за цикл контроля:

$$q_y \cdot t_{др} + Q_{др} = \Delta p V. \quad (6)$$

Или после преобразований:

$$Q_{др} = \Delta p V \left( 1 - \frac{t_{др}}{t_y} \right). \quad (7)$$

В результате количество тормозных единиц  $N$  (локомотивов и вагонов) при известной величине дополнительной разрядки  $0,5 \text{ кгс/см}^2$  и объеме тормозной сети одного вагона, включенных в тормозную магистраль, можно найти из выражения

$$N = 2 \frac{\Delta p V}{v} \left( 1 - \frac{t_{др}}{t_y} \right), \quad (8)$$

где  $v$  — объем тормозной сети одного условного вагона.

Реализация способа возможна с применением устройства для контроля тормозной сети подвижного состава [9].

В целом технология выглядит следующим образом. Перед отправлением поезда в процессе полного опробования авто-тормозов проверяется состояние пневматических сетей локомотива и поезда, а затем с применением дополнительной разрядки тормозной магистрали по формуле (7) определяется число включенных тормозных единиц — показатель, который вводится в память устройства. Этот показатель представляет собой контрольную величину и необязательно должен совпадать с реальной длиной поезда. При остановке поезда в пути следования автоматически включается режим контроля состояния пневматических сетей, и в случае отклонения показателя плотности включается проверка показателя  $N$ , по результатам которой судят о целостности тормозной магистрали поезда. В конечном счете предлагаемый способ позволяет предотвратить случаи отправления поезда на перегон с открытыми концевыми кранами.

## Литература

1. Буйнов А. П., Федоров Е. В. Совершенствование метода расчета длины тормозного пути железнодорожного подвижного состава // Известия Транссиба. 2018. № 1 (33). С. 13–22. ISSN 2220–4245.
2. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества, протокол от 6–7 мая 2014 г. № 60 [Электронный ресурс]. URL: <http://s.siteapi.org/501094b067eba74.ru/docs/ouwlclflvhs04sgs8cskogos0kk0wc8> (дата обращения: 27.05.2017).
3. Глушко М. И., Федоров Е. В. Проверка действия тормозов // Транспорт Урала. 2011. № 1 (28). С. 55–58. ISSN 1815–9400.
4. Глушко М. И., Федоров Е. В. Роль человеческого фактора в условиях нарушения безопасности движения // Инновационный транспорт. 2014. № 2 (12). С. 31–34. ISSN 2311–164X.
5. Наговицын В. С., Буйнов А. П. Алгоритм поиска критических узлов железнодорожного подвижного состава // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3 (21). С. 17–21. ISSN 2071–3827.
6. Глушко М. И. Развитие тормозных средств подвижного состава : моногр. М. : УМЦ ЖДТ, 2009. 208 с.
7. Глушко М. И., Федоров Е. В. Контроль перекрытия концевых кранов в поезде // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 1. С. 151–154. ISSN 2079–5920.
8. Глушко М. И., Федоров Е. В. Определение фактического объема пневматической сети локомотива // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 103–105. ISSN 2079–5920.
9. Устройство для контроля тормозной сети подвижного состава / М. И. Глушко, В. Е. Лыхин : пат. 2249515 Рос. Федерация. № 2003103745/11 ; заявл. 07.02.03 ; опубл. 10.04.05, Бюл. № 10.
10. Буйнов А. П., Федоров Е. В. Метод определения производительности компрессоров локомотива // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 9. С. 39–41. ISSN 2079–5920.
11. Буйнов А. П., Федоров Е. В. Определение тормозной эффективности железнодорожного подвижного состава в пути следования // Транспорт: наука, техника, управление. 2018. № 8. С. 7–11. ISSN 0239–1914.

## References

1. Buinov A. P., Fedorov E. V. Improvement of the method of calculating the length of the braking path of railway rolling stock [Sovershenstvovanie metoda rascheta dliny tormoznogo puti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava] // Journal of Transsib Railway Studies. 2018. No. 1 (33). Pp. 13–22. ISSN 2220–4245.
2. Regulations on maintenance of brake equipment and railway rolling stock brake control [Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava] : approved by the Railway Transport Council of States Parties to the Commonwealth, record No. 60 of 6–7 May 2014 [Electronic resource]. URL: <http://s.siteapi.org/501094b067eba74.ru/docs/ouwlclflvhs04sgs8cskogos0kk0wc8> (access date: 27.05.2017).
3. Glushko M. I., Fedorov E. V. Brakes' check [Proverka deystviya tormozov] // Transport of the Urals. 2011. No. 1 (28). Pp. 55–58. ISSN 1815–9400.
4. Glushko M. I., Fedorov E. V. The role of human factor in the context of traffic safety violations [Rol' chelovecheskogo faktora v usloviyakh narusheniya bezopasnosti dvizheniya] // Innotrans. 2014. No. 2 (12). Pp. 31–34. ISSN 2311–164X.
5. Nagovitsyn V. S., Buinov A. P. Algorithm of search of critical knots of the rolling stock [Algoritim poiska kriticheskikh uzlov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava] // Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East. 2014. No. 3 (21). Pp. 17–21. ISSN 2071–3827.
6. Glushko M. I. Development of rolling stock braking systems [Razvitie tormoznykh sredstv podvizhnogo sostava] : monograph. Moscow : UM Ts ZhDT, 2009. 208 p.
7. Glushko M. I., Fedorov E. V. Control of break pipe overlapping in the train [Kontrol' perekrytiya kontsevykh kranov v poezde] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2013. No. 1. Pp. 151–154. ISSN 2079–5920.
8. Glushko M. I., Fedorov E. V. Determination of the actual volume of the pneumatic system of the locomotive [Opredelenie fakticheskogo ob'ema pnevmaticheskoy seti lokomotiva] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2015. No. 2. Pp. 103–105. ISSN 2079–5920.
9. Device for rolling stock braking system control [Ustroystvo dlya kontrolya tormoznoy seti podvizhnogo sostava] / M. I. Glushko, V. E. Lykhin : pat. 2249515 Russian Federation. No. 2003103745/11 ; filed 07.02.03 ; publ. 10.04.05, Bulletin No. 10.
10. Buinov A. P., Fedorov E. V. Method of determining the performance of compressors locomotive [Metod opredeleniya proizvoditel'nosti kompressorov lokomotiva] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2018. No. 9. Pp. 39–41. ISSN 2079–5920.
11. Buinov A. P., Fedorov E. V. Determination of braking capacity of railway rolling stock in route [Opredelenie tormoznoy effektivnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava v puti sledovaniya] // Transport: science, equipment, management. 2018. No. 8. Pp. 7–11. ISSN 0239–1914.

УДК 621.331:621.311

Станислав Геннадьевич Истомин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Александр Андреевич Штраухман, студент 5-го курса кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИГОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭД4М

Stanislav Gennadyevich Istomin, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Alexander Andreyevich Shtraukhman, 5<sup>th</sup> year student, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

### Analysis of the application of regression models for the estimation of the energy efficiency of the auxiliary equipment of the suburban electric trips of the direct current of the ED4M

#### Аннотация

В статье на основе дополнительной обработки данных современных регистраторов параметров движения электропоездов постоянного тока ЭД4М получены результаты о фактическом расходе электроэнергии на собственные нужды и определена доля этих затрат от расхода на тягу поездов, что в условиях моторвагонного депо представляется труднореализуемой задачей. Выполнена оценка факторов, влияющих на расход электроэнергии на собственные нужды электропоездов постоянного тока ЭД4М. Установлено, что изменение расхода электроэнергии на собственные нужды существенно зависит от температуры окружающего воздуха. Сформированы статистические модели, учитывающие этот фактор, и выполнена оценка их качества. Сделан вывод, что использование полученных уравнений регрессии не позволит качественно оценить энергетическую эффективность вспомогательного оборудования (без учета систем отопления) электропоезда постоянного тока ЭД4М. Соответственно для решения задачи потребуется применение других методов оценки, в частности, в дальнейших исследованиях предлагается использовать искусственные нейронные сети.

**Ключевые слова:** электроподвижной состав, расход электроэнергии на собственные нужды, масса состава, время нагона, участковая и техническая скорость, температура атмосферного воздуха, уравнение регрессии.

#### Summary

The paper obtained additional data on actual energy consumption for own needs by means of additional data processing of modern recorders of the parameters of the movement of electric trains of direct current ED4M and determined the share of these costs from train consumption, which is hardly feasible in a motorworthy depot. The estimation of the influencing factors on the electric power consumption for auxiliary needs of electric trains of a direct current of the ED4M was made. As a result, it was established that ambient air temperature significantly affects the changes in the power consumption for own needs. Statistical models taking into account this factor were formed, and their quality was assessed. It has been established that the use of the obtained regression equations will not allow a qualitative assessment of the energy efficiency of auxiliary equipment (excluding heating systems) of the ED4M DC electric train.

In this regard, for such a task requires the use of other methods for assessing energy efficiency, in particular, it is proposed in further studies to use artificial neural networks.

**Keywords:** electric rolling stock, power consumption for own needs, mass of the train, time of surge, service and operating speed, air temperature, regression equation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-81-85

**Ж**елезнодорожный транспорт является ключевой отраслью Российской Федерации, на его долю приходится около 4,4 % от всей вырабатываемой электроэнергии, 85 % которой расходуется на тягу поездов. Именно поэтому приоритетная задача энергетической стратегии холдинга ОАО «РЖД» на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. — значительное повышение показателей энергетической эффективности тяги поездов [1].

Необходимо отметить, что основной объем перевозок в электротяге на железных дорогах России приходится на грузовое движение и достигает 95 % от общей работы. Причем расход электроэнергии на выполнение такого объема составляет 89 % от общего уровня энергозатрат. Вместе с тем это отнюдь не означает, что проблема энергосбережения в пригородном движении неактуальна. Если учитывать, что деятельность дочерних компаний ОАО «РЖД», занимающихся пригородными пассажирскими перевозками, либо убыточна, либо находится на грани безубыточности, а оплата энергетических ресурсов — первостепенная статья их расходов, то вопрос рационального использования энергетических ресурсов в пригородном движении требует своего решения [2].

В настоящее время найти такое решение можно, в частности, за счет разработки и внедрения автоматизированной системы контроля

Таблица 1

Протяженность участков обслуживания  
локомотивных бригад моторвагонного депо ТЧ-31 Омск

№ п/п	Участок обслуживания	Длина участка обслуживания, км
1	Омск-Пассажирский — Татарская	169
2	Омск-Пассажирский — Калачинская	79
3	Омск-Пассажирский — Иртышское	170
4	Омск-Пассажирский — Искилькуль	138
5	Омск-Пассажирский — Называевская	149
6	Омск-Пассажирский — Московка	8
7	Московка — Любинская	65
8	Московка — Лузино	32
9	Татарская — Барабинск	156

и управления потреблением электроэнергии вспомогательным оборудованием моторвагонного подвижного состава (МВПС) постоянного тока железных дорог на основе исследования факторов, определяющих энергосберегающие режимы его работы.

Рассмотрим один из вариантов организации такого контроля на примере пригородных электропоездов постоянного тока ЭД4М моторвагонного депо ТЧ-31 Омск Западно-Сибирской дирекции моторвагонного подвижного состава.

Моторвагонное депо ТЧ-31 Омск осуществляет перевозки пассажиров по четырем направлениям, на которых сформировано 9 участков обслуживания локомотивных бригад (табл. 1, рис. 1).

В настоящее время оценка потерь электроэнергии на собственные нужды МВПС представляет собой весьма трудоемкую задачу. Это связано с тем, что в отчетных данных, поступающих от моторвагонных депо в систему Централизованной обработки маршрутов машинистов (ЦОММ) и в раздел «Локомотивные парки» информационного хранилища ОАО «РЖД», сведения о расходе электроэнергии на собственные нужды МВПС не приводятся. Поэтому одним из наиболее простых методов такой оценки может быть анализ параметров вспомогательного электрооборудования, заявленных в руководствах по эксплуатации МВПС.

Как показали наши исследования, доля потерь электроэнергии на собственные нужды (без учета расхода электроэнергии на отопление вагонов) пригородных электропоездов постоянного тока ЭД4М составляет 4–5 % от расхода на тягу. Аналогичные результаты ранее были получены для грузовых электропоездов постоянного тока серии 2ЭС6 [3, 4] и пассажирских электропоездов постоянного тока серии ЭП2К [5]. Согласно данным, приведенным в работе [6], мощность нетяговых потребителей на современном МВПС (электропоезды ЭГ2 Тв, ЭТ4 А, ЭС2) может составлять от 8 до 10 % мощности, потребляемой из контактной сети.

Однако подобный метод оценки не позволяет достоверно определить значение и характер потребления электроэнергии вспомогательным оборудованием МВПС, так как в этом случае не учитываются реальные режимы работы оборудования в зависимости от типа профиля пути (равнинный или холмистый).

Более трудоемким, но при этом более объективным при оценке расхода электроэнергии на собственные нужды МВПС является вероятностно-статистический метод, в основу которого положен математический аппарат теории вероятности и математической статистики.

Для исследования потерь электроэнергии на собственные нужды электропоездов постоянного тока ЭД4М мы использовали информацию, которая содержится на картриджах систем регистрации параметров движения и автоведения (РПДА-Э) (рис. 2) производства компании «АВП-Технология» [7]. Ранее аналогичным образом был оценен расход собственных нужд для грузовых электропоездов постоянного тока серии 2ЭС6 [8] и пассажирских электропоездов постоянного тока серии ЭП2К [9].

После расшифровки и обработки информации с картриджей РПДА-Э электропоездов постоянного тока ЭД4М было установлено, что доля расхода электроэнергии на собственные нужды (без учета расхода электроэнергии на отопление вагонов) от общего расхода электроэнергии на участке Иртышское — Омск в нечетном направлении составляет в среднем 3,41 % (рис. 3а), а в четном — 3,43 % (рис. 3б).



Рис. 1. Структура участков обслуживания локомотивных бригад моторвагонного депо ТЧ-31 Омск

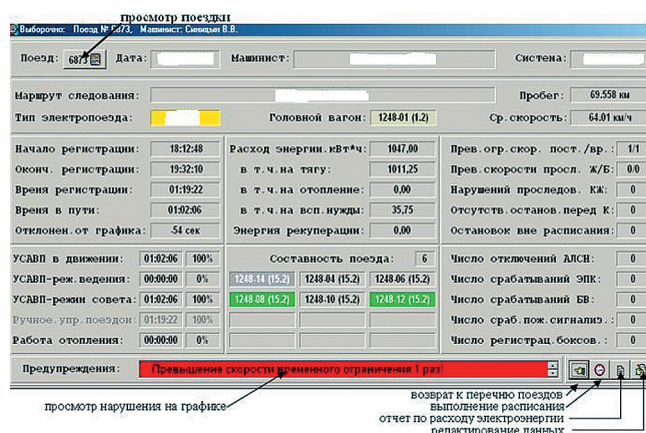
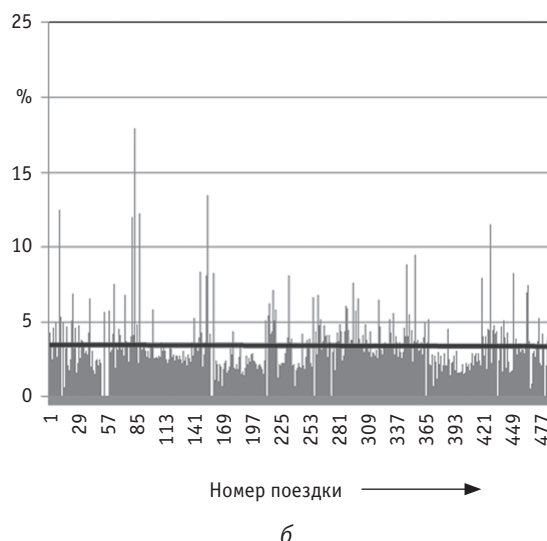
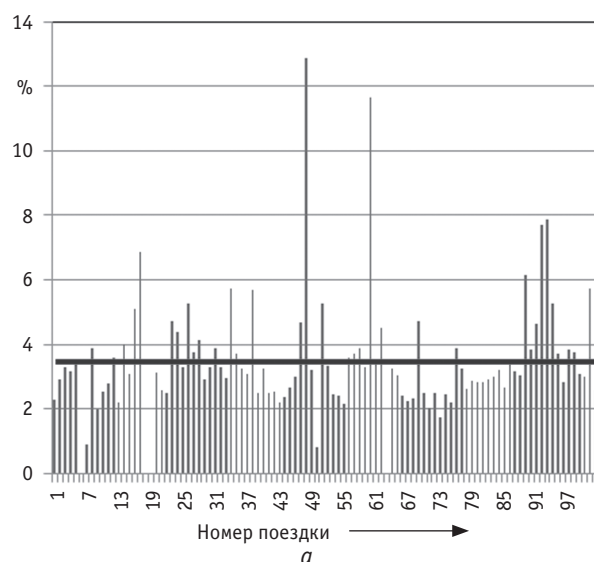


Рис. 2. Информация о результатах поездки с РПДА-Э пригородного электропоезда постоянного тока ЭД4М





**Рис. 3. Доля расхода электроэнергии на собственные нужды электропоездов ЭД4М от общего расхода электроэнергии на тягу на участке Иртышское — Омск в нечетном (а) и четном (б) направлениях**

Данные по остальным участкам обслуживания локомотивных бригад моторвагонного депо ТЧ-31 Омск приведены в табл. 2.

Наблюдаемый разброс значений (см. табл. 2) свидетельствует об имеющемся потенциале для снижения расхода электроэнергии на собственные нужды, реализовать который можно путем организации контроля за потреблением электроэнергии вспомогательным оборудованием электропоездов ЭД4М на основе учета факторов, влияющих на их энергоэффективную работу.

*Таблица 2*

Результаты оценки доли расхода электроэнергии на собственные нужды электропоездов ЭД4М (без учета расхода на отопление)

Участок обслуживания локомотивных бригад	Направление	Доля расхода на собственные нужды, %
Иртышское — Омск	Нечетное	3,41
Омск — Иртышское	Четное	3,43
Исилькуль — Омск	Нечетное	6,36
Омск — Исилькуль	Четное	5,79
Называевская — Омск	Нечетное	4,68
Омск — Называевская	Четное	4,1
Татарская — Омск	Нечетное	3,51
Омск — Татарская	Четное	3,6

Для выявления влияющих факторов на расход электроэнергии на собственные нужды электропоездов постоянного тока ЭД4М и формирования статистических моделей для оценки их энергетической эффективности был использован корреляционно-регрессионный метод математической статистики. Основные расчеты выполнены в программе Microsoft Excel с применением пакета «Анализ данных» на основе информации

РПДА-Э из выборки поездок с электропоездами ЭД4М в четном и нечетном направлении за календарный год.

Исследование проведено в несколько этапов. На первом этапе выбраны следующие факторы: время нагона  $t_n$ , участковая скорость электропоезда  $V_y$ , техническая скорость электропоезда  $V_T$ , температура атмосферного воздуха  $t$  и масса состава  $m_c$ .

На втором этапе для выбранных факторов сформирован вариант статистической модели, чтобы оценить ее адекватность и статистическую значимость коэффициентов [10]:

$$W_{c.n} = B_0 + B_1 \cdot t_n + B_2 \cdot V_y + B_3 \cdot V_T + B_4 \cdot t + B_5 \cdot m_c.$$

На третьем этапе определены коэффициенты  $B$  сформированной статистической модели, стандартная ошибка,  $t$ -статистика,  $p$ -значение, нижняя и верхняя граница доверительного интервала (табл. 3) и выполнена проверка адекватности данных моделей путем оценки уровня значимости  $\alpha$  (Microsoft Excel именуется этот показатель как  $p$ ).  $P$ -значение — это вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы, т.е. гипотезы о том, что все коэффициенты регрессии равны нулю. Если  $p$ -значение меньше 0,05, то гипотеза о незначимости регрессии отвергается и считается, что регрессия значима. В нашем случае для выбранной статистической модели  $p$ -значение не превышает уровня значимости 0,05 [11].

На четвертом этапе выполнена оценка статистической значимости коэффициентов регрессии для выбранной модели. Итоговые результаты оценки на примере участка Татарская — Омск приведены в табл. 3.

Рассмотрим механизм оценки статистической значимости коэффициентов регрессии на примере табл. 3. В зависимую переменную «расход электроэнергии на собственные нужды электропоезда ЭД4М» большой вклад вносит в четном и нечетном направлении температура ( $p = 3,1 \cdot 10^{-23}$  и  $p = 9,54 \cdot 10^{-18}$ ),

а меньший вклад в четном и в нечетном направлении — время нагона и техническая скорость ( $p = 0,99$  и  $p = 0,47$ ). Отрицательный знак коэффициента при переменной «температура» означает, что с увеличением температуры уровень расхода падает. Коэффициент уравнения регрессии  $B_4$  для четного и нечетного направления статистически значим при уровне значимости  $p = 0,05$ ; коэффициенты уравнения регрессии  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  и  $B_5$  статистически незначимы, так как  $p > 0,05$  [12].

Таким образом, было установлено, что статистически значимым фактором, оказывающим влияние на расход электроэнергии на собственные нужды электропоездов ЭД4М в четном и нечетном направлении, является температура окружающего воздуха.

На пятом этапе на основе полученных результатов сформированы статистические модели, учитывающие статистически значимые факторы для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования электропоездов постоянного тока ЭД4М (табл. 4).

Для оценки качества прогнозирования использовался коэффициент детерминации  $R^2$  [11]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{a}_i - \bar{a})^2}{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2},$$

где  $\sum_{i=1}^n (\hat{a}_i - \bar{a})^2$  — остаточная дисперсия регрессии;

$\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2$  — общая сумма квадратов.

Коэффициент детерминации  $R^2$  позволяет численно оценить, насколько изменчивость прогнозируемой величины объясняется включенными в модель факторами.

Следует отметить, что для анализа различных уравнений регрессии регрессионные коэффициенты определялись по

Результаты оценки статистической значимости коэффициентов регрессии для выбранной статистической модели (участок Татарская — Омск)

Факторы	Направление	Коэффициент регрессии $B$	Стандартная ошибка	$t$ -статистика	$p$ -значение	Нижняя граница доверительного интервала	Верхняя граница доверительного интервала
Свободный член регрессии	Четное	47,2	15,7	3,00	0,003	16,3	78,2
	Нечетное	62,8	14,0	4,48	$1,13 \cdot 10^{-05}$	35,2	90,5
Время нагона, мин	Четное	-0,031	3,00	-0,010	0,99	-5,95	5,88
	Нечетное	3,93	4,19	0,936	0,35	-4,33	12,2
Участковая скорость, км/ч	Четное	-0,29	0,549	-0,534	0,59	-1,37	0,79
	Нечетное	-0,569	0,736	-0,772	0,440	-2,02	0,88
Техническая скорость, км/ч	Четное	0,35	0,438	0,786	0,43	-0,52	1,21
	Нечетное	0,457	0,628	0,729	0,466	-0,778	1,69
Температура, °C	Четное	-1,35	0,121	-11,1	$3,1 \cdot 10^{-23}$	-1,59	-1,11
	Нечетное	-0,935	0,10	-9,27	$9,54 \cdot 10^{-18}$	-1,13	-0,73
Масса состава, т	Четное	0,015	0,015	0,980	0,328	-0,015	0,046
	Нечетное	-0,013	0,015	-0,84	0,402	-0,042	0,017

Таблица 4

Коэффициенты детерминации  $R^2$  для различных статистических моделей

Участок обслуживания	Направление	Вид статистической модели	Объем выборки	Коэффициент детерминации $R^2$
Иртышское — Омск	Четное	$W_{с.н} = 31,7 - 0,38 \cdot t$	102	0,093
Омск — Иртышское	Нечетное	$W_{с.н} = 29,8 - 0,4 \cdot t$	494	0,079
Исилькуль — Омск	Четное	$W_{с.н} = 52,7 - 1,03 \cdot t$	196	0,177
Омск — Исилькуль	Нечетное	$W_{с.н} = 54,7 - 1,14 \cdot t$	195	0,216
Называевская — Омск	Четное	$W_{с.н} = 44,7 - 0,49 \cdot t$	329	0,066
Омск — Называевская	Нечетное	$W_{с.н} = 46,1 - 0,49 \cdot t$	186	0,030
Татарская — Омск	Четное	$W_{с.н} = 55,2 - 0,94 \cdot t$	255	0,270
Омск — Татарская	Нечетное	$W_{с.н} = 59,2 - 1,37 \cdot t$	231	0,381

всем значениям выборки из генеральной совокупности статистических данных.

По результатам исследования (см. табл. 4) сделано следующее заключение: значения  $R^2$  во всех случаях не превышают 0,5, что свидетельствует о слабой связи между  $W_{с.н}$  и выбранными факторами, т.е. использование полученных уравнений регрессии не позволит выполнить

качественную оценку энергетической эффективности вспомогательного оборудования (без учета систем отопления) электропоезда постоянного тока ЭД4М.

Следовательно, для решения этой задачи требуются другие методы, в частности, в дальнейших исследованиях предлагается использовать искусственные нейронные сети.



## Литература

1. Гапанович В. А., Епифанцев С. Н., Овсейчук В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог. М. : Эко-Пресс, 2012. 196 с.
2. Истомин С. Г., Штраухман А. А. Анализ эффективности эксплуатации электропоездов постоянного тока моторвагонного депо ТЧ-31 Омск // 115 лет железнодорожному образованию в Забайкалье : Образование. Наука. Производство : матер. Всерос. науч.-практ. конф. / ЗабИЖТ ИрГУПС. Чита, 2017. С. 56–62.
3. Истомин С. Г., Юрасов О. Д., Рахманов Д. А. Анализ параметров и режимов работы вспомогательного оборудования грузовых электропоездов постоянного тока железных дорог // Молодежь и XXI век — 2018 : матер. VIII Междунар. молодеж. науч. конф. : в 5 т. Т. 5. Курск : ЗАО «Университетская книга», 2018. С. 135–139.
4. Истомин С. Г., Бондаревский Д. И. К вопросу оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования электропоездов серии ЭС6 // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : матер. науч. конф. / ОмГУПС. Омск, 2017. С. 151–156.
5. Истомин С. Г., Юрасов О. Д., Рахманов Д. А. Анализ параметров и режимов работы вспомогательного оборудования пассажирских электропоездов постоянного тока железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : матер. 9-й Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. Т. 2. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. С. 282–285.
6. Александров А. В. Целесообразность применения бортовой сети постоянного тока на современном моторвагонном подвижном составе // Известия ПГУПС. 2015. № 2 (43). С. 15–20. ISSN 1815–588X.
7. Автоматизированное рабочее место регистратора параметров движения и автоведения пригородного электропоезда АРМ РПДА-Э : АЮВР.00106–01 34 01-ЛУ. Руководство по эксплуатации / ООО «АВР-Технология». М., 2008. 56 с.
8. Истомин С. Г., Бондаревский Д. И. Применение регрессионных моделей для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования электропоездов серии ЭС6 // Известия Транссиба. 2018. № 1 (33). С. 22–30. ISSN 2220–4245.
9. Сидорова Е. А., Истомин С. Г., Гателюк О. В. Применение корреляционно-регрессионного анализа для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования пассажирских электропоездов постоянного тока серии ЭП2К // Вестник РГУПС. 2018. № 3 (71). С. 59–68. ISSN 0201–727X.
10. Истомин С. Г. Повышение эффективности эксплуатации электропоездов в границах зон учета железной дороги : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2017. 170 с.
11. Бараз В. Р., Пегашкин В. Ф. Использование MS Excel для анализа статистических данных : учеб. пособие. Нижний Тагил, 2014. 181 с.
12. Халафян А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. М. : ООО «Бином-Пресс», 2007. 512 с.

## References

1. Gapanovich V. A., Epifantsev S. N., Ovseychuk V. A. Energy strategy and electrification of Russian railways [Energeticheskaya strategiya i elektrifikatsiya rossiyskikh zheleznnykh dorog]. Moscow : Eco-Press, 2012. 196 p.
2. Istomin S. G., Shtraukhman A. A. Efficiency analysis of DC electric multiple units at Omsk TCh-31 motive-coach depot [Analiz effektivnosti eksploatatsii elektropoezdov postoyannogo toka motorvagonnogo depo TCh-31 Omsk] // 115 years of railway education in Transbaikalia: Education. Science. Production : proceedings of All-Russia scientific and practical conference. Chita, 2017. Pp. 56–62.
3. Istomin S. G., Yurasov O. D., Rakhmanov D. A. Analysis of parameters and operation modes of railway DC freight electric locomotives auxiliary equipment [Analiz parametrov i rezhimov raboty vspomogatel'nogo oborudovaniya gruzovykh elektrovov postoyannogo toka zheleznnykh dorog] // Youth and XXI century — 2018 : proceedings of VIII International youth scientific conference : in 5 volumes. Vol. 5. Kursk : CJSC University book, 2018. Pp. 135–139.
4. Istomin S. G., Bondarevskiy D. I. On the assessment of 2ES6 electric locomotives auxiliary equipment energy efficiency [K voprosu otsenki energeticheskoy effektivnosti vspomogatel'nogo oborudovaniya elektrovovov serii 2ES6] // Innovative projects and technologies in education, industry and transport : proceedings of scientific conference / OSTU. Omsk, 2017. Pp. 151–156.
5. Istomin S. G., Yurasov O. D., Rakhmanov D. A. Analysis of parameters and operation modes of railway DC passenger electric locomotives auxiliary equipment [Analiz parametrov i rezhimov raboty vspomogatel'nogo oborudovaniya passazhirskikh elektrovovov postoyannogo toka zheleznnykh dorog] // Transport infrastructure of the Siberian Region : proceedings of 9<sup>th</sup> International scientific and practical conference : in 2 volumes. Vol. 2. Irkutsk : Publishing House of ISTU, 2018. Pp. 282–285.
6. Aleksandrov A. V. Feasibility of on-board DC circuit application for modern multiple unit rolling stock [Tselesoobraznost' primeneniya bortovoy seti postoyannogo toka na sovremennom motorvagonnom podvizhnom sostave] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2015. No. 2 (43). Pp. 15–20. ISSN 1815–588X.
7. Workstation of commuter electric multiple unit movement parameters recorder and automatic operation. ARM RPDA-E : AYUVP.00106–01 34 01-LU. Application guide [Avtomatizirovannoe rabochee mesto registratora parametrov dvizheniya i avtovedeniya prigorodnogo elektropoezda ARM RPDA-E : AYUVP.00106–01 34 01-LU / LLC «AVP-Technology». Moscow, 2008. 56 p.
8. Istomin S. G., Bondarevskiy D. I. Application of regression models for estimating the energy efficiency of auxiliary equipment of electric locomotives of the 2ES6 series [Primenenie regressiionnykh modeley dlya otsenki energeticheskoy effektivnosti vspomogatel'nogo oborudovaniya elektrovovov serii 2ES6] // Journal of Transsib Railway Studies. 2018. No. 1 (33). Pp. 22–30. ISSN 2220–4245.
9. Sidorova E. A., Istomin S. G., Gateluk O. V. Application of correlation-regression analysis for estimation of energy efficiency of auxiliary equipment of passenger electronics of the constant current of series EP2K [Primenenie korrelyatsionno-regressiionnogo analiza dlya otsenki energeticheskoy effektivnosti vspomogatel'nogo oborudovaniya passazhirskikh elektrovovov postoyannogo toka serii EP2K] // Vestnik RGUPS. 2018. No. 3 (71). Pp. 59–68. ISSN 0201–727X.
10. Istomin S. G. Increase of electric motive power operating efficiency within boundaries of railway accounting areas [Povyshenie effektivnosti eksploatatsii elektropodvizhnogo sostava v granitsakh zon ucheta zheleznoy dorogi] : PhD in Engineering Thesis. Omsk, 2017. 170 p.
11. Baraz V. R., Pegashkin V. F. The use of MS Excel for statistical data analysis [Ispol'zovanie MS Excel dlya analiza statisticheskikh dannykh] : textbook. Nizhny Tagil, 2014. 181 p.
12. Khalafyan A. A. STATISTICA 6. Statistical analysis of data [STATISTICA 6. Statisticheskii analiz dannykh]. Moscow : LLC «Binom-press», 2007. 512 p.

УДК 621.332 (076.5)

Алексей Анатольевич Ковалев, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Никита Васильевич Крапивин, аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ НАТЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКЕ

Alexey Anatolyevich Kovalev, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikita Vasilyevich Krapivin, postgraduate student, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### A study of contact wire tensioning devices operation

#### Аннотация

Сегодня при строительстве электрифицированных железных дорог применяются современные технологии и материалы, позволяющие повысить надежность устройств контактной сети. Устройства компенсации натяжения в контактной подвеске производятся как в России, так и за рубежом. Для оценки возможности применения устройства компенсации натяжения DFCB сотрудники УрГУПС совместно со специалистами ООО «МК-Транспортные технологии» и ОАО «РЖД» провели испытания на участке Свердловской железной дороги. Результаты испытаний подтвердили, что DFCB может использоваться в различных климатических условиях, в том числе при плавке гололеда на контактной подвеске.

**Ключевые слова:** контактная сеть, устройство компенсации натяжения, гололед, несущий трос, контактный провод.

#### Summary

Nowadays modern technologies and materials improving the reliability of catenary facilities are used in construction of electrified railways. Contact wire tensioning devices are produced both in Russia and abroad. To assess the possibility of DFCB tensioning device application the USURT employees together with specialists of LLC «MK-Transportation technologies» and JSC Russian Railways carried out tests on a section of the Sverdlovsk Railway. The test results confirmed that DFCB can be used in different climatic conditions including ice melting on catenary.

**Keywords:** catenary, tensioning device, ice, carrying wire, contact wire.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-86-90

**В** связи с возможной реализацией проекта высокоскоростной магистрали между Екатеринбургом и Челябинском возникает необходимость повышения надежности и качества токосъема. С этой целью рассматриваются перспективы использования наиболее современных устройств компенсации натяжения контактной подвески.

В частности, по заказу производственного предприятия «МК-Транспортные технологии» в Уральском государственном университете путей сообщения (УрГУПС) проводятся исследования и испытания компенсатора контактной подвески со встроенным тормозом типа DFCB производства Yangzhou Dongfang Support Hangers Co., Ltd. (КНР).

Географически Китайская Народная Республика расположена южнее Российской Федерации и существенно отличается по климату. Поэтому, независимо от того что компенсатор DFCB широко используется на китайских железных дорогах, необходимо изучить возможности его применения в российских условиях, в том числе на высокоскоростной магистрали Екатеринбург — Челябинск. Так как Екатеринбург находится в III климатическом районе, то, согласно действующим нормативным документам, требуется осуществлять мероприятия по предупреждению гололедаобразования в контактной сети. Для того чтобы исключить срабатывание стопорного механизма в компенсаторе DFCB при плавке гололеда и принять решение о пригодности этого оборудования к эксплуатации на контактной сети, нами были проведены испытания.

Они проходили в четыре этапа:

этап I — установка компенсирующего устройства со встроенным тормозом DFCB на учебном полигоне Свердловской железной дороги;

этап II — проведение испытаний на срабатывание стопорного механизма при обрыве контактного провода;

этап III — проверка работоспособности компенсирующего устройства со встроенным тормозом DFCB в условиях эксплуатации на участке Свердловской железной дороги;

этап IV — проверка работоспособности компенсирующего устройства со встроенным тормозом DFCB при осуществлении мероприятий по плавке гололеда.

Компенсатор натяжения — важный элемент контактной сети, от конструктивного выполнения и уровня технического обслуживания которого во многом зависит обеспечение заданного натяжения проводов контактных подвесок и качество токосъема.

Сегодня на российских железных дорогах в большинстве случаев используются блочно-полиспастные компенсаторы, имеющие такие недостатки, как большая масса чугунных грузов, наличие роликов с подшипниками, которые при резкой смене температур могут заклинивать. Кроме того, эти устройства нельзя применять, например, в тоннелях [1].

Принцип действия компенсатора DFCB (рис. 1) заключается в следующем: когда длина несущего троса и/или контактного провода меняется под воздействием температуры окружающей среды либо протекания тока, блок, соединенный несущим тросом и/или контактным проводом, перемещается синхронно с маховиком, сообщая гирлянде грузов поступательное движение. Таким образом компенсируются возникающие изменения натяжения провода и обеспечивается его неизменность [2].

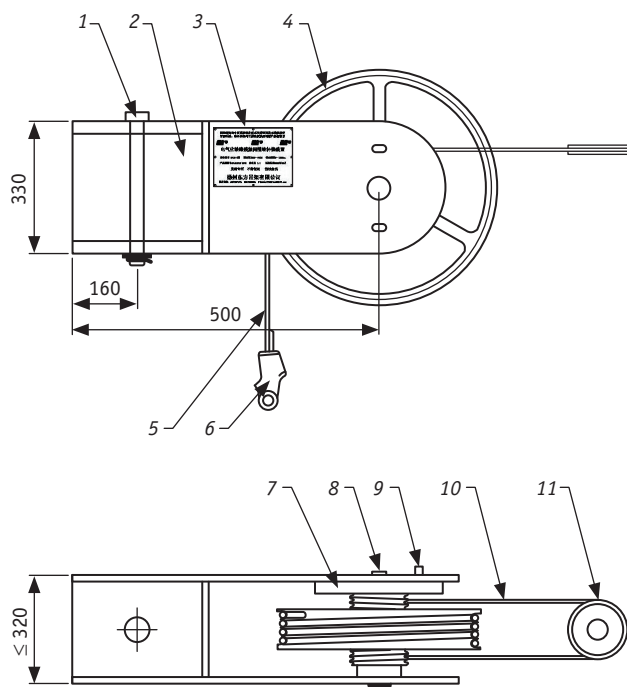


Рис. 1. Схема компенсатора DFCB:

1 — соединительный штифт; 2 — несущая конструкция; 3 — основные технические характеристики устройства; 4 — колесо; 5 — трос; 6 — клиновидный зажим с двумя проемами; 7 — тормоз; 8 — главная ось; 9 — блокирующий штифт; 10 — трос; 11 — балансирующий блок (может быть заменен балансирующей платформой)

Когда встроенный тормоз компенсирующего устройства DFCB находится в рабочем состоянии, маховик и тело колеса жестко соединены общей осью, ось медленно вращается в прямом или обратном направлении. При разрыве несущего

или контактного троса, в результате исчезновения нагрузки на несущий и контактный тросы с одной стороны под воздействием тяжести гирлянды грузов, происходит моментальное ускорение вращения оси. Под воздействием центробежной силы храповик моментально соединяется с внутренними зубьями храпового колеса, и происходит моментальное торможение.

Более полное представление о технических характеристиках компенсатора DFCB в сравнении с другими видами компенсирующих устройств дает табл. 1.

В связи с широкой географией и протяженностью российских железных дорог устройство компенсации со встроенным тормозом DFCB должно обеспечивать необходимое натяжение контактной подвески в любых климатических районах. Поскольку на некоторых участках проводятся предупреждающие мероприятия по плавке гололеда, возникает необходимость испытать работу устройства компенсации DFCB в этих условиях [1, 3].

Плавка гололеда заключается в протекании токов короткого замыкания по контактной подвеске и нагреве проводов. Этот процесс сопровождается опусканием грузов компенсатора. При прекращении процедуры плавки гололеда провода быстро остывают, и грузы компенсатора резко начинают движение вверх опоры, что может спровоцировать ошибочное срабатывание стопорного механизма. Чтобы оценить возможность ошибочного срабатывания стопорного механизма, проведен эксперимент по плавке гололеда на контактной сети.

Исходные данные эксперимента:

на момент испытания температура контактной подвески составляла минус 9 °С;

длина зоны плавки гололеда — 27 км;

схема плавки гололеда — петлевая;

напряжение на шинах подстанции — 10, на посту секционирования — 10,2 кВ;

напряжение холостого хода тягового трансформатора на посту секционирования — 3500 В;

уставка быстродействующего выключателя — 4000 А;

уставка быстродействующего выключателя в первоначальный момент включения на короткое замыкание — 6000 А;

ток короткого замыкания в первоначальный момент включения — 3500 А.

Модель установленного на опору контактной сети компенсирующего устройства со встроенным тормозом DFCB показана на рис. 2.

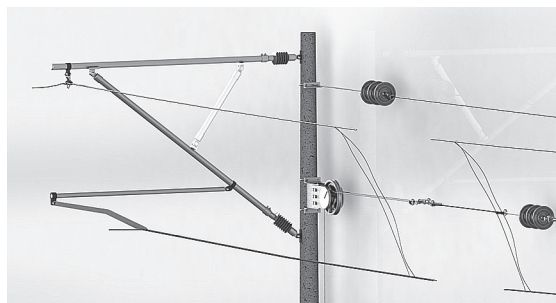


Рис. 2. Модель компенсирующего устройства со встроенным тормозом DFCB на опоре контактной сети

Таблица 1

Сравнительные характеристики компенсирующих устройств

Технические характеристики	Компенсатор со встроенным тормозом DFCB	Компенсатор барабанного типа с храповым колесом (КБХК)	Блочно-полиспастный компенсатор (БПК)
Технология изготовления	Обе стороны колеса — гладкие без тормозных зубцов, что упрощает технологию производства и повышает качество устройства	На обеих сторонах храпового колеса (в радиальной и боковой плоскости) находятся тормозные зубцы, что усложняет технологию производства. Возможен скол или излом зубцов. Труднее обеспечивается стабильное качество, увеличивается себестоимость	Технология производства проще, чем у компенсирующего устройства барабанного типа. Колесо, выполненное из чугуна, имеет сравнительно большой вес и габариты (последние примерно в 1,5 раза больше, чем у других типов компенсирующих устройств)
Функция торможения	Используется эксцентрический тормоз, эффективность торможения 100 % Тормозной путь провода менее 70 мм, тормозной путь гирлянды менее 200 мм Поскольку механизм не нуждается в сборке и наладке на участке, эффективность торможения в тестовых и рабочих условиях не различается	Ввиду сложности монтажа результат испытаний не соответствует эффекту в рабочих условиях. Эффективность торможения посредственная, вероятность успешного торможения в рабочих условиях невысокая	Из-за изъянов конструкции функция торможения отсутствует. При разрыве троса возникает задержка эксплуатации в связи с экстренным ремонтом
Функция блокировки	Обладает функцией двухсторонней блокировки, что значительно облегчает подвеску груза	Отсутствует	Отсутствует
Пределы натяжения	≥15~60 кН	≤15~40,7 кН	≥60 кН
Боковое стачивание	Из-за монолитной конструкции боковое стачивание отсутствует	Из-за разборной конструкции колесо будет изменяться, следуя за маятниковыми движениями несущей конструкции и рычага, что приведет к стачиванию троса и колеса и, как следствие, скажется на коэффициенте трения. В тоннелях (особенно) это может привести к заеданию механизма	Как и у КБХК
Монтажное исполнение	Полностью подходит для монтажа как с грузами вынесенной, так и внутренней подвески, отклонение груза отсутствует	При внутреннем расположении груза часто возникает заедание	Непригоден для опор с внутренним расположением груза
Стабильность конструкции	Монолитная конструкция, компактная несущая конструкция, стабильность высокая	Немонолитная конструкция, длинная консоль несущей конструкции механизма создает сравнительно большой изгибающий момент опоры, стабильность низкая	Как и у КБХК
Монтаж и регулировка	Упрощает процедуру монтажа и наладки, тем самым снижает более чем 50 %-ую трудоемкость и повышает качество монтажа	Сложная процедура монтажа и наладки, повышенная сложность работы	Как и у КБХК
Функция смены направления	Имеется функция автоматической смены направления вращения, которая в значительной степени минимизирует боковое стачивание троса	Имеется, но не снижает боковое стачивание троса	Как и у КБХК
Проблема птичьих гнезд	Отсутствует	Возможно образование птичьих гнезд на раме механизма. Проблема с безопасностью	Отсутствует
Воздействие разрыва троса	Сила удара после разрыва небольшая, воздействие на опору пренебрежимо мало	Сильный удар после разрыва, значительное воздействие на опору	Как и у КБХК
Соотношение цены и качества	Высокое	Низкое	Самое низкое

Исследование работы компенсирующего устройства со встроенным тормозом DFCB при режиме плавки гололеда показало следующие результаты (табл. 2).

Таблица 2

Результаты испытаний

Параметр	Данные параметра	
	в начале испытания	в конце испытания
Длина зоны плавки, км	27	
Схема плавки	Петлевая	
Ток короткого замыкания, А	3500	2660
Температура контактной подвески, °С	-9	+25
Опускание грузов на опоре с компенсатором DFCB, см	-	107
Опускание грузов на опоре с блочно-полиспластным компенсатором, см	-	120
Время плавки гололеда, мин	10	
Время возврата грузов в исходное состояние, мин	22	

Для оценки возможности применения нового компенсирующего устройства контактной сети построим стратегию его технического обслуживания [4].

Условия, определяющие вид стратегии:

объект имеет мгновенную индикацию об отказе, все восстановления и отказы полные, резервирование отсутствует;

объект восстанавливается либо после отказа, либо, если он работал безотказно, через заданный интервал  $\tau$ . Управляющие воздействия (УВ), проводимые после отказов, называют аварийными, плановые — профилактическими (рис. 3).

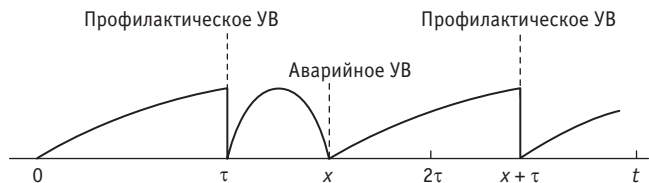


Рис. 3. Строго периодическое восстановление

Пусть  $\xi_\tau$  и  $\eta_\tau$  — случайные наработки соответственно между последовательными аварийными управляющими воздействиями в отношении компенсирующего устройства и двумя последовательными УВ произвольного типа. Вероятность того, что некоторая случайная наработка между последовательными аварийными УВ окажется меньше некоторой наработки  $t$ :

$$P(\xi_\tau < t) = 1 - [F(\tau)]^n \cdot F(t - n\tau),$$

$$n \cdot \tau \leq t < (n+1) \cdot \tau, \quad n = 0, 1, \dots,$$

где  $F(\tau)$  — вероятность того, что отказ компенсирующего устройства не произойдет в течение плановой наработки между профилактиками;

$n$  — число профилактик;

$F(t - n\tau)$  — вероятность того, что отказ не произойдет между последней  $n$ -й профилактикой и очередным  $n + 1$  запланированным УВ;

$\tau$  — плановая наработка между профилактиками, которая отсчитывается от момента окончания последнего УВ.

Вероятность того, что случайная величина наработки между двумя последовательными восстановлениями произвольного типа окажется меньше некоторой наработки  $t$ :

$$P(\eta_\tau < t) = \begin{cases} Q(t) & 0 < t \leq \tau \\ 1 & \tau < t \end{cases},$$

где  $Q(t)$  — вероятность отказа компенсирующего устройства за наработку  $t$ .

Условие  $0 < t \leq \tau$  означает, что на интервале от 0 до  $\tau$  проводится аварийное восстановление.

Условие  $\tau < t$  означает, что проводится плановое профилактическое УВ [4].

При использовании оптимального интервала профилактических УВ  $\tau_{\text{опт}}$  соответствующая интенсивность эксплуатационных затрат

$$R(\tau_{\text{опт}}) = (C_a - C_{\text{п}}) \cdot \lambda(\tau_{\text{опт}}).$$

Предположим, что аварийное и профилактическое УВ требует времени, равного соответственно  $d_a$  и  $d_{\text{п}}$ :

$$0 \leq d_{\text{п}} < d_a.$$

Математическое ожидание времени на проведение УВ

$$\mu_B(\tau) = d_a \cdot Q(\tau) + d_{\text{п}} \cdot F(\tau).$$

Коэффициент готовности есть отношение наработки нахождения в работоспособном состоянии  $\int_0^\tau F(t)dt$  к общей наработке объекта:

$$K_T(\tau) = \frac{\int_0^\tau F(t)dt}{d_a \cdot Q(\tau) + d_{\text{п}} \cdot F(\tau) + \int_0^\tau F(t)dt}.$$

Решением уравнения будет такое  $\tau_{\text{опт}}$ , при котором  $K_T$  обращается в максимум.

Максимальный коэффициент готовности

$$K_T(\tau_{\text{опт}}) = \frac{1}{1 + (d_a + d_{\text{п}}) \cdot \lambda(\tau_{\text{опт}})}.$$

На основе статистических данных по аварийным и плановым обслуживаниям устройств компенсации ( $d_a = 700$ ,  $d_{\text{п}} = 365$ ), а также интенсивностям их отказов ( $\lambda = 0,08$ ) выполнены расчеты для двух компенсирующих устройств (блочно-полиспластного и компенсатора со встроенным тормозом DFCB).



В результате получены коэффициенты готовности  $K_{г(бп)} = 0,011$  и  $K_{гDFCB} = 0,5$  соответственно.

По итогам испытаний компенсатора со встроенным тормозом типа DFCB можно сделать вывод об удовлетворительных результатах его работы в III климатическом районе: на всех этапах испытаний компенсирующее устройство работало в штатном режиме и выполняло свои функции в соответствии с параметрами, заявленными производителем [5].

Компенсирующее устройство доказало надежность при эксплуатационных мероприятиях, а также при обрыве кон-

тактного провода и плавке гололеда. Работа компенсатора DFCB была стабильной на всех этапах испытаний, рывков, заеданий, ошибочного срабатывания стопорного механизма зафиксировано не было.

Как показали расчеты, вероятность застать устройство DFCB в работоспособном состоянии в 3 раза больше, чем устройство блочно-полиспастного типа.

Таким образом, испытанное оборудование может быть рекомендовано для эксплуатации на электрифицированных железных дорогах Российской Федерации, в частности при плавке гололеда.

## Литература

1. Ковалев А. А., Галкин А. Г. Теория и методы расчета стоимостных показателей системы токосъема на протяжении жизненного цикла : моногр. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2015. 115 с.
2. Исследование надежности системы контактной сети железных дорог как фактора экономического развития региона / А. А. Ковалев, А. М. Маслов, Н. А. Аксенов, А. Ю. Иванисhev // Транспортное дело России. 2016. № 4. С. 52–56. ISSN 2072–8689.
3. Галкин А. Г., Ковалев А. А., Микава А. В. Мониторинг инфраструктурного комплекса системы токосъема в процессе эксплуатации // Инновационный транспорт. 2012. № 1 (2). С. 44–48. ISSN 2311–164X.
4. Галкин А. Г. Теория и методы расчетов процессов проектирования и технического обслуживания контактной сети : дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2002. 300 с.
5. Ковалев А. А. Формирование управляющих воздействий на контактной сети с учетом процесса разрегулировок опор : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2008. 142 с.

## References

1. Kovalev A. A., Galkin A. G. Theory and methods of calculating current collection system costs throughout life-cycle [Teoriya i metody rascheta stoimostnykh pokazateley sistemy tokos'ema na protyazhenii zhiznennogo tsikla] : monograph. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2015. 115 p.
2. Study of reliability contact network of railways as a factor of economic development of regions [Issledovanie nadezhnosti sistemy kontaktnoy seti zheleznnykh dorog kak faktora ekonomicheskogo razvitiya regiona] / A. A. Kovalev, A. M. Maslov, N. A. Aksyonov, A. Yu. Ivanichev // Transport business of Russia. 2016. No. 4. Pp. 52–56. ISSN 2072–8689.
3. Galkin A. G., Kovalev A. A., Mikava A. V. Monitoring of current collection infrastructural complex during operation [Monitoring infrastruktornogo kompleksa sistemy tokos'ema v protsesse ekspluatatsii] // Innotrans. 2012. No. 1 (2). Pp. 44–48. ISSN 2311–164X.
4. Galkin A. G. Theory and methods of calculating catenary design and maintenance processes [Teoriya i metody raschetov protsessov proektirovaniya i tekhnicheskogo obsluzhivaniya kontaktnoy seti] : DSc in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2002. 300 p.
5. Kovalev A. A. Forming control actions on catenary taking into account the process of misalignments of catenary supports [Formirovanie upravlyayushchikh vozddeystviy na kontaktnoy seti s uchedom protsessa razregulirovok opor] : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2008. 142 p.

Объем статьи 0,52 авторских листа

УДК 629.039.58

Александр Владимирович Окунев, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта»  
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИКЕ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Alexander Vladimirovich Okunev, Associate Professor, Transport Power Supply Department,  
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Complex approach to diagnostics of catenary poles

#### Аннотация

В статье проанализированы основные причины разрушения металлической арматуры в стенках железобетонных опор контактной сети. Предложены алгоритм и математическая модель комплексной диагностики опор, разработанные на основе теоремы Байеса и метода последовательного анализа. Рассмотренный способ контроля нескольких параметров одной опоры позволяет определять среднюю вероятность постановки диагноза «неисправна/исправна» по всему участку эксплуатации, предупреждать отказ опоры контактной сети и, таким образом, повышать безопасность перевозочного процесса.

**Ключевые слова:** опора, контактная сеть, жизненный цикл, срок службы, железнодорожный транспорт, комплексная диагностика.

#### Summary

The paper analysis the main causes of metal reinforcement destruction in walls of reinforced concrete catenary poles. The author proposes an algorithm and a mathematical model of pole complex diagnostics being developed on the basis of Bayes theorem and a method of consequent analysis. The considered method of pole parameters controlling enables to determine the mean probability of making a diagnosis «unserviceable/serviceable» on whole section of operation, to prevent catenary poles faults and, therefore, to increase the transportation process safety.

**Keywords:** pole, catenary, life cycle, useful life, railway transport, complex diagnostics.

DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-91-96

**Н**а начальных этапах электрификации железных дорог в нашей стране опоры контактной сети изготавливались из железобетона. Это было вызвано дефицитом металла в послевоенное время — использование железобетонных конструкций позволяло при строительстве каждые 100 км двухпутной линии снижать расход металла на 1500 т.

Позднее в результате испытаний, проведенных на Куйбышевской и Октябрьской дорогах, были выявлены главные проблемы эксплуатации железобетонных опор — коррозия бетона и коррозия металлической арматуры в его стенках [1].

Коррозия бетона развивается в зависимости от погодных условий, места установки опор в грунте, наличия агрессивных грунтов. Но влияние этих факторов можно снизить либо устранить за счет технического усовершенствования конструкций и использования более прочных сортов бетона.

Коррозия металлической арматуры, происходящая под воздействием токов утечки, — это вид электрической коррозии. Она наиболее опасна, так как по мере ее развития в арматуре появляются трещины, что приводит к еще большему взаимодействию металла с воздухом и соответственно к еще большей коррозии. Для снижения влияния тока утечки необходимо повысить сопротивление между деталями арматуры поддерживающих конструкций контактной сети и телом опор. Известно, что бетон не проявляет свойств диэлектрика, более того, при насыщении влагой его проводимость заметно увеличивается. Это, в свою очередь, приводит к увеличению токов утечки, ускоряет развитие электрической коррозии и снижает несущую способность железобетонной опоры, что может стать причиной ее падения. Следовательно, возникает необходимость в разработке способа диагностики, который позволил бы учитывать процессы, происходящие в железобетонных опорах контактной сети.

Величина плотности тока стекания  $\bar{\delta}$  (А/м<sup>2</sup>) напрямую зависит от напряженности электрического поля и в значительной мере влияет на скорость протекания электрической коррозии, подчиняясь закону Ома:

$$\bar{\delta} = \gamma \bar{E}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — проводимость среды, в которую стекает ток, См;

$\bar{E}$  — напряженность электрического поля, В/м, определяемая по формуле

$$\bar{E} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a r}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — линейная плотность заряда, Кл/м;

$\epsilon_a$  — диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

$r$  — радиус проводника, мм.

С учетом формул (1) и (2) получим выражение для расчета сопротивления току утечки  $R$  для одиночного заземлителя, Ом:

$$R = \frac{\ln \frac{2l}{r}}{\gamma \cdot 2\pi l}, \quad (3)$$

где  $l$  — длина стержня, погруженного в бетон, мм;

$r$  — радиус стержня, мм.

От того, как изменяются потенциалы на участках между тяговыми подстанциями, зависит величина токов утечки, протекающих по опорам контактной сети (рис. 1). При принятой положительной полярности контактной сети в точке нахождения электроваза рельс получает положительный потенциал. Таким образом, при проходе электроваза и наличии нескольких электровазов характер распределения потенциала меняется.

Неравномерность распределения потенциалов на участке приводит к неравномерному износу железобетонных опор контактной сети. Отсюда можно сделать вывод о необходимости адресных мер по обслуживанию и диагностике опор.

Это подтверждается статистическим анализом результатов изменения сопротивления за интервал наблюдений 5 лет, показавшим, что полученные значения подчиняются экспоненциальному закону (рис. 2).

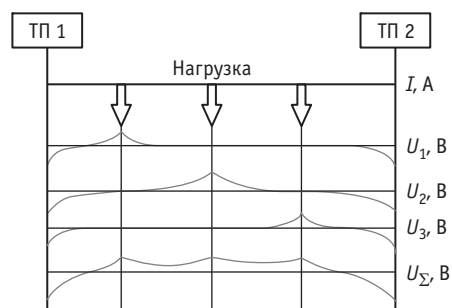


Рис. 1. Изменение характера распределения потенциала при движении электроваза:

$I$  — тяговый ток электроваза;  $U_1, U_2, U_3$  — соответственно разность потенциалов, вызванная движением поезда в начале, середине и конце межподстанционной зоны;  $U_\Sigma$  — разность потенциалов, вызванная тем, что в межподстанционной зоне одновременно находится несколько поездов

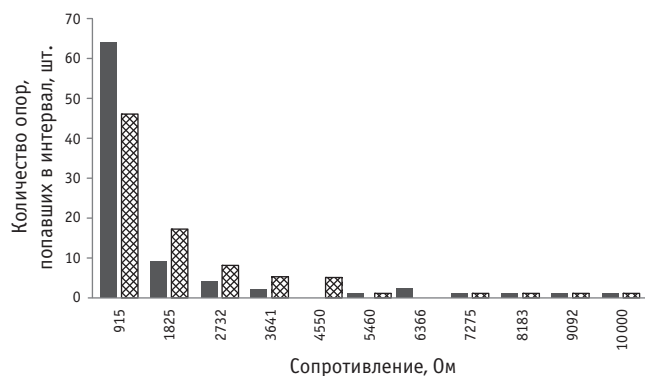


Рис. 2. Гистограмма распределения сопротивления опор контактной сети:  
■ — 2013 г.; ▨ — 2018 г.

Таблица 1

Матрица оценок переходных вероятностей сопротивления опор контактной сети

Предыдущее состояние, Ом	Последующее состояние, Ом										
	6–915	915–1825	1825–2732	2732–3641	3641–4550	4550–5460	5460–6366	6366–7275	7275–8183	8183–9092	9092–10000
6–915	0,6	0,2	0,1	0	0,1	0	0	0	0	0	0,02
915–1825	0,6	0,2	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0
1825–2732	0,3	0,5	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0
2732–3641	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3641–4550	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4550–5460	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5460–6366	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0,5	0
6366–7275	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7275–8183	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8183–9092	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9092–10000	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Для более точной оценки процесса изменения сопротивления опор контактной сети сформированы матрицы переходных вероятностей (табл. 1). За основу взяты интервалы, полученные при составлении гистограммы (см. рис. 2).

Как видно из матрицы, подтверждается нестационарность полученного закона изменения сопротивления железобетонных опор. Отсюда следует, что невозможно дать прогноз в целом по участку на основе значений сопротивления всех исследуемых опор [2]. Причина заключается в том, что в реальности схема протекания токов утечки усложняется из-за насыщения бетона влагой. Поэтому учет всех уровней состояния бетона (рис. 3) должен быть положен в основу методики комплексной диагностики опор контактной сети.

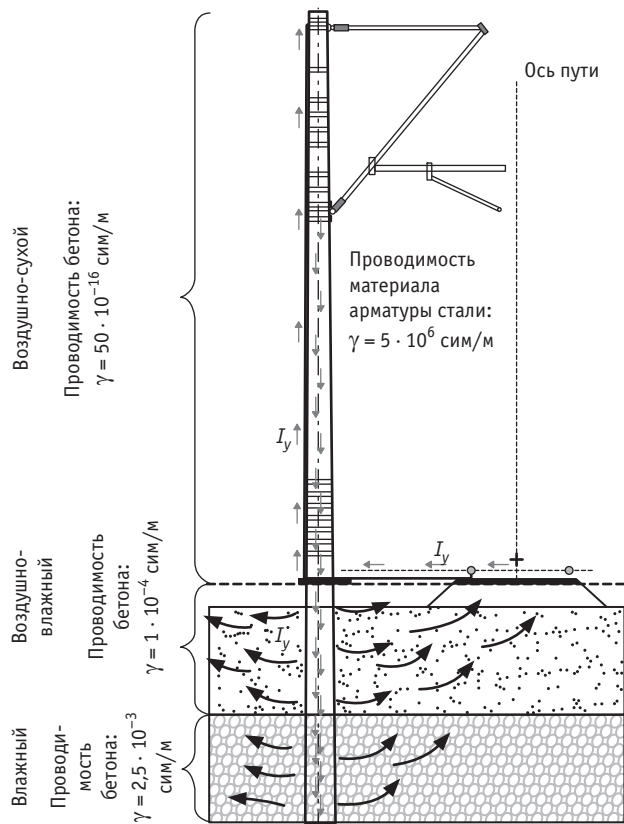


Рис. 3. Схема протекания токов утечки ( $I_y$ ) в железобетонной опоре контактной сети

Чтобы максимально снизить вероятность ошибки в постановке диагноза при комплексной оценке состояния железобетонных опор контактной сети, предложен алгоритм, представленный на рис. 4.

Математическая модель оценки состояния железобетонных опор контактной сети разработана с учетом изменения параметра, в наибольшей степени реагирующего на проявление коррозии металлической арматуры внутри бетона, — сопротивление цепи «консоль — рельс». Потенциал участка «рельс — земля» позволяет определить зоны максимального влияния токов утечки и соответственно скорость снижения несущей способности опор контактной сети.

Модель диагностирования железобетонной опоры контактной сети имеет вид

$$D = k\psi(\alpha, U_{p-3}, R_{к-р}, t), \quad (4)$$

где  $k$  — переводной коэффициент признака «норма/ненорма»;  
 $\alpha$  — угол наклона опоры, град;  
 $U_{p-3}$  — потенциал «рельс — земля», В;  
 $R_{к-р}$  — сопротивление «консоль — рельс», Ом;  
 $t$  — срок эксплуатации, лет.

Вспользуемся теоремой Байеса для определения вероятности постановки диагноза [3], характеризующей показания оценки состояния опор некоторым признаком  $K_j$  [4]. Допустим, что каждый рассматриваемый признак может проявляться как при наличии диагноза  $D_i$  (опора неисправна), так и при его отсутствии. В условиях детерминистического подхода важно лишь то, что накопленная вероятность проявленных признаков  $K_j$  является хоть и случайной величиной, но в достаточной мере зависимой от диагноза  $D_i$ . Вероятность совместного появления событий определяется следующим образом:

$$P(D_i / K_j) = P(D_i) \frac{P(K_j / D_i)}{P(K_j)}, \quad (5)$$

где  $P(D_i)$  — априорная вероятность диагноза, определенная по статистическим данным;

$P(K_j / D_i)$  — вероятность появления признака  $K_j$  у объектов с состоянием  $D_i$ ;

$P(K_j)$  — вероятность появления признака  $K_j$  во всех объектах независимо от состояния.

Для проверки теории на произвольном участке контактной сети выполнен анализ технического состояния 227 опор. При испытаниях сравнивались показания нескольких приборов (УК-1401, ПК-2, ИСО-1М, АДО, интроскоп), позволяющих определить угол наклона, состояние бетона, сопротивление и другие параметры (табл. 2).

Таблица 2

Результаты опытов  
по выявлению дефектов на первой опоре

Состояние опоры	УК-1401	ПК-2	ИСО-1М	АДО	Интроскоп
Исправное	7	8	8	7	9
Неисправное	3	2	2	3	1

Допуская абсолютную достоверность показаний прибора УК-1401, установим границы значений измеренного сопротивления: если оно менее 100 Ом и более 10 кОм, то опора считается дефектной.

Далее используем метод последовательного анализа, позволяющий учитывать показания нескольких приборов. Таким образом, за счет увеличения количества признаков состояния опор мы получаем более точную постановку диагноза.



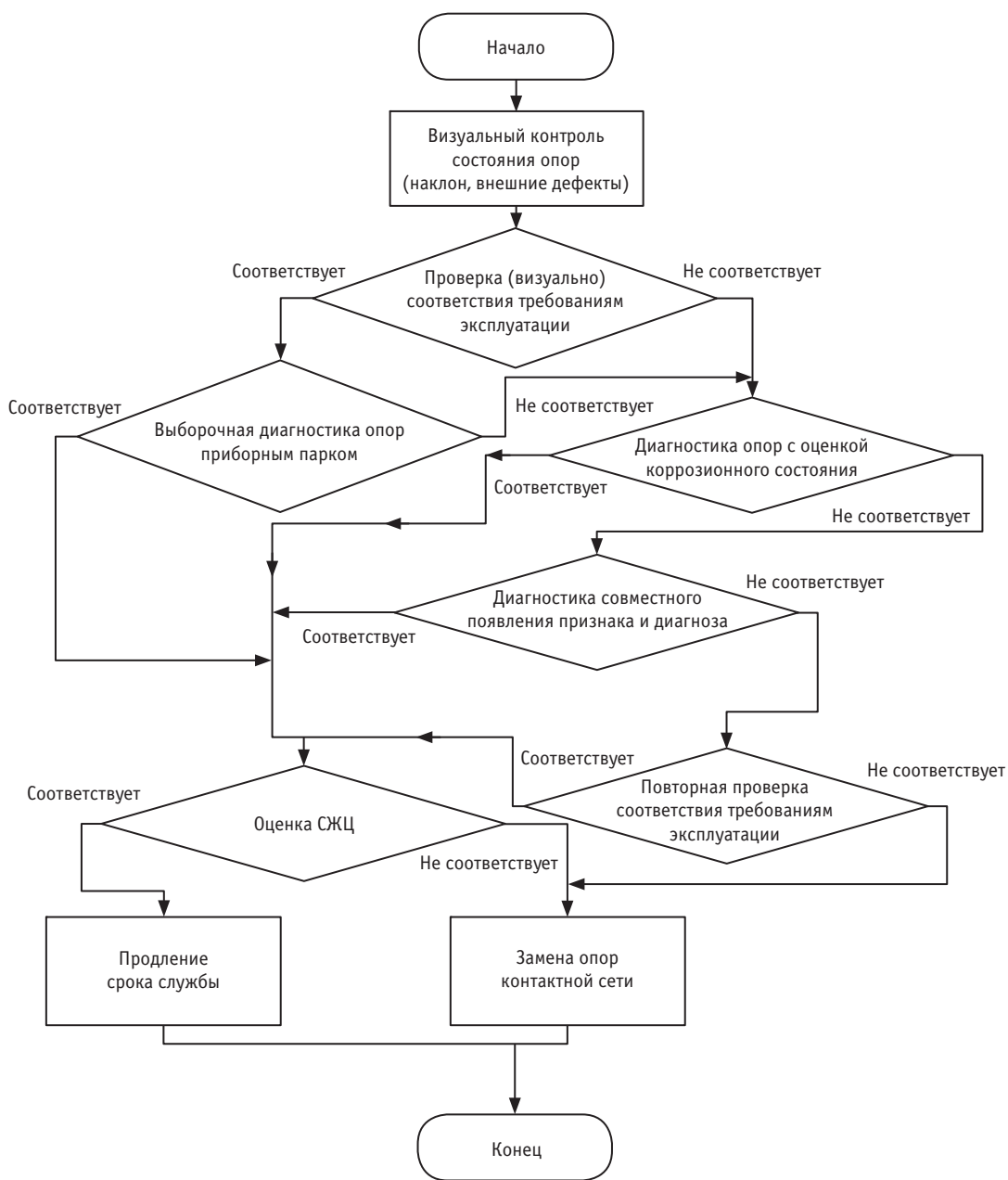


Рис. 4. Алгоритм комплексной диагностики опоры контактной сети с учетом ее жизненного цикла

Отношения вероятностей (отношения правдоподобия) составляются последовательно:

$$B < \frac{P(K_1 / D_2)}{P(K_1 / D_1)} < A, \quad (6)$$

где  $A$  и  $B$  — соответственно верхняя и нижняя границы принятия решений.

Если в результате первой проверки условие (6) выполняется, то необходима следующая проверка, тогда отношение правдоподобия приобретает вид

$$B < \frac{P(K_1 / D_2)}{P(K_1 / D_1)} \cdot \frac{P(K_2 / D_2)}{P(K_2 / D_1)} < A. \quad (7)$$

Расчеты повторяются до тех пор, пока значение отношения не выйдет за одну из указанных границ ( $A$  или  $B$ ).

Границы  $A$  и  $B$  определяются исходя из вероятностей ошибок первого  $\alpha$  и второго  $\beta$  рода, которые считаются заданными:

$$\frac{1 - \beta}{\alpha} \geq A; \quad (8)$$

$$B \geq \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (9)$$

В наших расчетах принимаем, что  $\alpha = \beta = 0,05$ .

Рассчитаем априорную вероятность диагноза «неисправна» по показаниям прибора УК-1401:

$$P(D_1) = \frac{3}{7} = 0,43.$$

Для прибора ПК-2 рассчитаем:

вероятность появления признака «ненорма» у неисправной опоры

$$P(K_{\text{нн1}}/D_1) = \frac{2}{3} = 0,67;$$

вероятность появления признака «ненорма» независимо от состояния опоры

$$P(K_{\text{нн1}}) = \frac{10}{10} = 1;$$

вероятность появления диагноза «неисправное состояние» при получении результата «ненорма»

$$P(D_1/K_{\text{нн1}}) = 0,43 \cdot \frac{0,67}{1} = 0,29.$$

Аналогично выполним расчеты по показаниям остальных приборов.

Для ИСО-1М:

$$P(K_{\text{нн1}}/D_1) = \frac{2}{3} = 0,67;$$

$$P(K_{\text{нн1}}) = \frac{10}{10} = 1;$$

$$P(D_1/K_{\text{нн1}}) = 0,43 \cdot \frac{0,67}{1} = 0,29.$$

Для АДО:

$$P(K_{\text{нн1}}/D_1) = \frac{3}{3} = 1;$$

$$P(K_{\text{нн1}}) = \frac{10}{10} = 1;$$

$$P(D_1/K_{\text{нн1}}) = 0,43 \cdot \frac{1}{1} = 0,43.$$

Для интроскопа:

$$P(K_{\text{нн1}}/D_1) = \frac{1}{3} = 0,33;$$

$$P(K_{\text{нн1}}) = \frac{10}{10} = 1;$$

$$P(D_1/K_{\text{нн1}}) = 0,43 \cdot \frac{0,33}{1} = 0,14.$$

Определим отношение вероятностей появления признака «ненорма» у неисправной опоры к вероятности появления признака «ненорма» у исправной опоры для прибора УК-1401:

$$\frac{P(K_1/D_1)}{P(K_1/D_2)} = \frac{3}{7} = 0,43.$$

После замеров несколькими приборами логарифм отношения имеет вид

$$L = \ln \frac{P(K_1/D_2) \dots P(K_N/D_2)}{P(K_1/D_1) \dots P(K_N/D_1)}. \quad (10)$$

Для прибора УК-1401 логарифм отношений

$$L_1 = \ln(2,33) = 0,85.$$

Оценка вероятности появления признака «ненорма» у исправной опоры:  
для ПК-2

$$P(K_{\text{нн2}}/D_2) = \frac{8}{7} = 1,14;$$

для ИСО-1М

$$P(K_{\text{нн2}}/D_2) = \frac{8}{7} = 1,14;$$

для АДО

$$P(K_{\text{нн2}}/D_2) = \frac{7}{7} = 1;$$

для интроскопа

$$P(K_{\text{нн2}}/D_2) = \frac{9}{7} = 1,29.$$

Логарифм отношений:  
для ПК-2

$$\frac{P(K_1/D_1)}{P(K_1/D_2)} = \frac{0,67}{1,14} = 1,71,$$

$$L_2 = \ln(2,33 \cdot 1,71) = 1,39;$$

для ИСО-1М

$$\frac{P(K_1/D_1)}{P(K_1/D_2)} = \frac{0,67}{1,14} = 1,71,$$

$$L_3 = \ln(2,33 \cdot 1,71 \cdot 1,71) = 1,93;$$

для АДО

$$\frac{P(K_1/D_1)}{P(K_1/D_2)} = \frac{1}{1} = 1,$$

$$L_4 = \ln(2,33 \cdot 1,71 \cdot 1,71 \cdot 1) = 1,93;$$

для интроскопа

$$\frac{P(K_1/D_1)}{P(K_1/D_2)} = \frac{0,33}{1,29} = 0,26,$$

$$L_5 = \ln(2,33 \cdot 1,71 \cdot 1,71 \cdot 0,26) = 0,57.$$

Определим границы принятия решений:

$$A \leq \frac{1-0,05}{0,05} = 19, \ln A = \ln 19 = 2,94;$$

$$B \leq \frac{0,05}{1-0,05} = 0,0526,$$

$$\ln B = \ln 0,0526 = -2,94.$$

Результаты расчетов сведем в табл. 3.

Снижение или повышение показателей надежности на заданном интервале времени можно наблюдать по графикам (рис. 5).

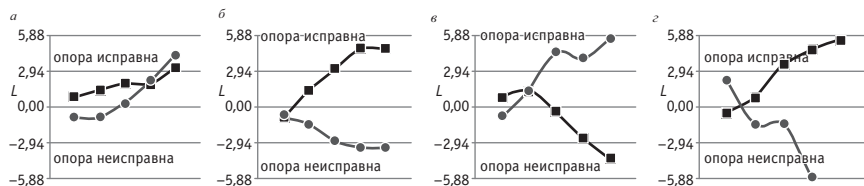


Рис. 5. Результаты расчета постановки диагноза для опоры 1 (а), опоры 2 (б), опоры 6 (в) и опоры 227 (г):  
■ — 2013 г.; ● — 2018 г.

Таблица 3

Результаты расчетов по выявлению дефектов на первой опоре

Прибор	$P(D_1)$	$P(K_{nn1}/D_2)$	$P(K_{nn1})$	$P(D_1/K_{nn1})$	$P(K_{nn2}/D_2)$	$\frac{(K_{nn1}/D_1)}{(K_{nn2}/D_2)}$	$L$
УК-1401	0,43	—	—	—	—	2,33	0,85
ПК-2	—	0,67	1,00	0,29	1,14	1,71	1,39
ИСО-1М	—	0,67	1,00	0,29	1,14	1,71	1,93
АДО	—	1,00	1,00	0,43	1,00	1,00	1,93
Интроскоп	—	0,33	1,00	0,14	1,29	0,26	0,57

Таким образом, предложенный метод позволяет оценивать состояние не только отдельных опор контактной сети, но и всего участка, поскольку учитывает данные, полученные с использованием нескольких приборов, и изменение показателей в течение интервала наблю-

дения [5]. Метод можно применять и для оценки средней вероятности исправности участка эксплуатации. С помощью методики по определению стоимости жизненного цикла в дальнейшем можно принимать решения о продлении или замене опоры контактной сети [6].

## Литература

- О причинах образования продольных трещин в центрифугированных опорах контактной сети / О. Я. Берг, Г. Н. Писанко, А. А. Смольянинов, Е. Н. Щербаков // Транспортное строительство. 1965. № 10. С. 42–45.
- Галкин А. Г. Теория и методы расчетов процессов проектирования и технического обслуживания контактной сети : дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2002. 300 с.
- Ефимов А. В., Галкин А. Г. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог : учеб. М. : УМК МПС России, 2000. 512 с.
- Ковалев А. А. Прогноз эксплуатационной надежности опор контактной сети // Электрика. 2008. № 1. С. 39–43. ISSN 1684–2472.
- Галкин А. Г., Ковалев А. А., Микава А. В. Мониторинг инфраструктурного комплекса системы токосъема в процессе эксплуатации // Инновационный транспорт. 2012. № 1 (2). С. 44–48. ISSN 2311–164X.
- Ковалев А. А. Применение методологии УПРАН для определения целесообразности продления срока службы несущего троса контактной подвески // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. 2013. № 2 (6). С. 24–28.

## References

- About causes of back formation in centrifugal catenary poles [O prichinakh obrazovaniya prodo'nykh treshhin v tsentrifugirovannykh oporakh kontaktnoy seti] / O. Ya. Berg, G. N. Pisanko, A. A. Smol'yaninov, E. N. Shherbakov // Transport Construction. 1965. No. 10. Pp. 42–45.
- Galkin A. G. Theory and methods of calculating catenary design and maintenance processes [Teoriya i metody raschetov protsessov proektirovaniya i tekhnicheskogo obsluzhivaniya kontaktnoy seti] : DSc in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2002. 300 p.
- Efimov A. V., Galkin A. G. Reliability and diagnostics of power supply systems of railways [Nadezhnost' i diagnostika sistem elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog] : textbook. Moscow, 2000. 512 p.
- Kovaliov A. A. Predikation of reliability of contact networks pylons [Prognoz ekspluatatsionnoy nadezhnosti opor kontaktnoy seti] // Electrics. 2008. No. 1. Pp. 39–43. ISSN 1684–2472.
- Galkin A. G., Kovalev A. A., Mikava A. V. Monitoring of current collection infrastructural complex during operation [Monitoring infrastruktturnogo kompleksa sistemy tokos'ema v protsesse ekspluatatsii] // Innотrans. 2012. No. 1 (2). Pp. 44–48. ISSN 2311–164X.
- Kovalev A. A. Application of URRAN (management of resources, risks and dependability at lifecycle phases) methodology to determine expediency of catenary carrying wire useful life extension [Primenenie metodologii URRAN dlya opredeleniya tselesoobraznosti prodleniya sroka sluzhby nesushego trosa kontaktnoy podveski] // Science and transport. Modernization of railway transport. 2013. No. 2 (6). Pp. 24–28.

Объем статьи 0,55 авторских листа

### 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>

<b>Извещение</b>	<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> Платательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2019 г.</p>
<b>Квитанция</b>	<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> Платательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2019 г.</p>



Подписка на 2019 год.

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

**АБОНЕМЕНТ**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

**Транспорт Урала**

(наименование издания)

Количество  
комплектов:

на 2019 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  
пересылки

руб. \_\_\_\_ коп.  
руб. \_\_\_\_ коп.

Количество  
комплектов:

на 2019 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

№ 4 (59), 2018 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Почта России» — 46463

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Роскомнадзора  
ПИ № 77-18098 от 27 мая 2004 г.

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков  
и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

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

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий,  
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций  
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Дата выхода в свет 12.02.2019

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Цена 300,8 руб.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета  
в типографии ООО «АЛЕКС ПРИНТ».

394007, г. Воронеж, Ленинский проспект, д. 94, кв. 52.

Тел./факс: (473) 290-45-17. E-mail: alexey-print@mail.ru

Заказ № 6999

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2018