

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА  
НА ПРЯМОМ УЧАСТКЕ ГОРКИ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВСТРЕЧНОГО ВЕТРА**

**МОДЕЛЬ РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ  
НА ОБСЛУЖИВАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЮ  
СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ**

**АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ  
ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ  
ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ 2ЭС6**

**ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕНИ  
МАРШРУТНОГО ДВИЖЕНИЯ  
ПРИ СОЗДАНИИ ЗАЕЗДНЫХ КАРМАНОВ**





## **75-летний юбилей отмечает Александр Васильевич Ефимов, главный редактор журнала «Транспорт Урала»**

Все, кто знает Александра Васильевича Ефимова, говорят так: это человек и руководитель, которого отличают истинная интеллигентность, неподдельная скромность, доброжелательное отношение к людям; это профессионал самого высокого класса, обладающий глубоким научным мышлением и широчайшей эрудицией.

А самое главное, он беззаветно предан родному УрГУПСу. Переступив в августе 1958 года порог нашего вуза, Александр Васильевич остался здесь навсегда и прошел все ступени роста: ассистент, доцент, профессор, заведующий кафедрой, проректор, ректор.

Несомненно, Александр Васильевич внес огромный вклад в развитие университета. Будучи ректором, он проявил себя как великолепный стратег, видящий перспективу, умеющий точно и правильно расставлять приоритеты, формулировать цели и добиваться их достижения. Именно благодаря ему наш вуз превратился в транспортный университетский комплекс с развитой инфраструктурой и социальной сферой, началось активное международное сотрудничество, были созданы два диссертационных совета, основан журнал «Транспорт Урала» — журнал, которым гордится УрГУПС!

Так же, как и университету, Александр Васильевич всю жизнь искренне предан железнодорожному транспорту. Наверное, поэтому самой дорогой для него наградой, хотя, может, и не самой большой в списке его наград, является знак «Почетному железнодорожнику». Как руководитель, Александр Васильевич всегда плодотворно выстраивал взаимоотношения вуза с МПС РФ, а затем с ОАО «РЖД», и в первую очередь — с железными дорогами Уральского региона.

Александр Васильевич — это яркий пример человека, в котором гармонично соединились таланты руководителя, педагога и ученого. Его интересы, кроме административной работы, проявляются при подготовке инженеров путей сообщения, он — автор ряда учебников и монографий, им воспитана целая плеяда научно-педагогических работников.

Профессор Александр Васильевич Ефимов — руководитель, ученый и педагог, чье имя уже навсегда вошло в историю университета.

Редколлегия журнала «Транспорт Урала» присоединяется к многочисленным поздравлениям и искренне желает своему главному редактору дальнейших успехов в его благородном служении родному вузу и всей железнодорожной отрасли!

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Alexander Efimov, 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. Gritsyk Valeriy Ivanovich, DSc, professor, Rostov
5. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
6. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
7. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
8. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, associate professor, Moscow
9. Ledyayev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
10. Reznik Leonid Grigorievich, DSc, professor, Tumen
11. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
12. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
13. Smolyaninov Alexander Vasiliyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Umnyashkin Vladimir Alexeyevich, DSc, professor, Izhevsk
16. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА	GENERAL TRANSPORT PROBLEMS
<i>П. А. Козлов, С. П. Вакулenco.</i> Расчет оптимальных режимов работы локомотивов при обслуживании поездопотоков ..... 3	<i>P. A. Kozlov, S. P. Vakulenco.</i> Calculation of optimal operation modes of locomotives in train traffic management ..... 3
<i>Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко.</i> Математическое описание движения вагона на прямом участке горки при воздействии встречного ветра ..... 8	<i>Kh. T. Turanov, A. A. Gordienko.</i> Mathematical description of railcar movement on tangent track on hump when exposed to headwind ..... 8
<i>Е. Б. Азаров, А. В. Бабкин, С. А. Румянцев, А. М. Шихов.</i> Экспериментальная проверка устойчивости явления самосинхронизации вибровозбудителей на лабораторном вибростенде ..... 14	<i>E. B. Azarov, A. V. Babkin, S. A. Rumyantsev, A. M. Shikhov.</i> Experimental verification of stability of the phenomenon of vibration exciter self-synchronization on laboratory vibration table ..... 14
<i>В. А. Антропов, Е. Н. Морозова.</i> Понятно-терминологический аппарат формирования кадровой политики саморазвития промышленных и транспортных предприятий ..... 19	<i>V. A. Antropov, E. N. Morozova.</i> Conceptual and terminological framework of HR self-development policy at industrial and transport enterprises ..... 19
<i>Н. Б. Попова.</i> Дорельсовый этап транспортного освоения регионов России ..... 27	<i>N. B. Popova.</i> Pre-railway stage of transport development in Russian regions ..... 27
<i>Д. А. Брусянин.</i> Подход к формированию оптимальной маршрутной сети пассажирского общественного транспорта на региональном уровне ..... 31	<i>D. A. Brusyanin.</i> Approach to the development of optimal public passenger transport route network at regional level ..... 31
АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ	AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION
<i>Д. В. Ефанов.</i> Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики ..... 35	<i>D. V. Efanov.</i> Development aspects of functional control systems of railway automation and telemechanics devices ..... 35
<i>А. К. Канаев, Е. В. Опарин.</i> Методика оценки и прогнозирования технического состояния оборудования сети синхронизации ..... 41	<i>A. K. Kanaev, E. V. Oparin.</i> Equipment condition assessment and forecasting method in synchronization network ..... 41
<i>П. А. Козлов, С. В. Бушуев.</i> Модель рационального распределения ограниченных ресурсов на обслуживание и модернизацию систем железнодорожной автоматики ..... 48	<i>P. A. Kozlov, S. V. Bushuev.</i> Model of rational allocation of limited resources for maintenance and modernization of railway automation systems ..... 48
ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK
<i>Ю. А. Быков, А. Б. Васильев, В. А. Фадеева.</i> Прогнозирование развития транспортных коридоров России в сообщении Европа — Азия ..... 53	<i>Yu. A. Bykov, A. B. Vasilyev, V. A. Fadeeva.</i> Prediction of development of Russian transport corridors between Europe and Asia ..... 53
ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО	RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT
<i>А. Б. Левин, А. В. Смольянинов, А. Э. Павлюков.</i> Проектирование билинейного рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов ..... 57	<i>A. B. Levin, A. V. Smolyaninov, A. E. Pavlyukov.</i> Design of bilinear spring suspension of freight car bogies ..... 57
<i>А. Н. Давыдов, А. В. Смольянинов.</i> Определение параметров боковых скользунов постоянного контакта для грузовых вагонов ..... 62	<i>A. N. Davydov, A. V. Smolyaninov.</i> Parameterization of constant contact side bearer for freight cars ..... 62
ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	TECHNOSPHERIC SAFETY
<i>В. Г. Булаев, Э. А. Рябукhin.</i> Идентификация экологических аспектов с помощью диаграмм Парето и Исикавы ..... 67	<i>V. G. Bulaev, E. A. Ryabukhin.</i> Identification of environmental aspects using Pareto and Ishikawa diagrams ..... 67
<i>Ю. В. Трофименко, В. С. Ворожнин.</i> Метод оценки экологической безопасности участников дорожного движения ..... 73	<i>Yu. V. Trofimenko, V. S. Vorozhnin.</i> Method for environmental safety assessment of road users ..... 73
ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ	TRANSPORT MACHINERY
<i>С. А. Войнаш, А. С. Войнаш, А. С. Демидов.</i> Конструктивные особенности фермерского малотоннажного грузовика ..... 79	<i>S. A. Voynash, A. S. Voynash, A. S. Demidov.</i> Specifics of agricultural light truck ..... 79
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА	ELECTRIC TRACTION
<i>М. Г. Дурандин, И. Г. Иванов.</i> Анализ потенциальной устойчивости тяговых электродвигателей грузовых электровозов 2ЭС6 ..... 84	<i>M. G. Durandin, I. G. Ivanov.</i> Analysis of potential stability of electric traction motors of 2ES6 electric freight locomotive ..... 84
<i>Е. Б. Азаров, А. В. Бабкин, С. А. Румянцев, А. М. Шихов.</i> Экспериментальное исследование электромеханических характеристик вибротранспортирующих машин при выбеге ..... 92	<i>E. B. Azarov, A. V. Babkin, S. A. Rumyantsev, A. M. Shikhov.</i> Experimental study of electromechanical characteristics of vibration transport machines when coasting ..... 92
<i>В. А. Усов.</i> Тяговая устойчивость при взаимодействии колесной пары локомотива с рельсами ..... 97	<i>V. A. Usov.</i> Traction stability in interaction between locomotive wheelset and rails ..... 97
АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ	MOTOR TRANSPORT
<i>Г. В. Таубкин, О. Г. Коптелов.</i> Изменение времени маршрутного движения при создании заездных карманов ..... 102	<i>G. V. Taubkin, O. G. Koptelov.</i> Route timetable alteration in case of bay creation at bus stop ..... 102
<i>С. Н. Боярский, Р. Н. Ковалев.</i> Методика и результаты обследования транспортных потоков на регулируемых пересечениях автомобильных дорог Свердловской области ..... 106	<i>S. N. Boyarskiy, R. N. Kovalev.</i> Traffic flow survey method and results for signalled road junctions in Sverdlovsk Oblast ..... 106
АСПИРАНТСКАЯ ТЕТРАДЬ	RESEARCH OF YOUNG SCIENTISTS
<i>Н. Л. Ряполова.</i> Оценка экологической техноёмкости природных комплексов Ямало-Ненецкого автономного округа в связи с транспортным и хозяйственным освоением региона ..... 111	<i>N. L. Ryapolova.</i> Assessment of environmental capacity of natural systems of Yamal-Nenets Autonomous Okrug in the context of transport and economic development of the region ..... 111
<i>Д. В. Кузьмин.</i> Имитационная модель региональных конгрейперных перевозок ..... 114	<i>D. V. Kuzmin.</i> Simulation model of regional piggyback traffic ..... 114

УДК 656.223

**Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ (Современные транспортные технологии государства), Москва,**  
**Сергей Петрович Вакулenco, кандидат технических наук, профессор кафедры «Железнодорожные станции и узлы», директор Института управления и информационных технологий Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ)**

## РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛОКОМОТИВОВ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ПОЕЗДОПотоКОВ

**Petr Alexeyevich Kozlov, DSc in Engineering, President of Research & Production Holding STRATEG (Modern National Transportation Technologies), Moscow,**  
**Sergey Petrovich Vakulenko, PhD in Engineering, Professor, Department of Railway Stations and Junctions, Director of Management and Information Technologies Institute, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)**

### Calculation of optimal operation modes of locomotives in train traffic management

#### Аннотация

Предложена модель, позволяющая рассчитать оптимальные режимы работы локомотивов при обслуживании поездопотока. В качестве основы для построения модели выбрана динамическая транспортная задача. При моделировании выдается информация о режиме работы каждого локомотива, графике движения каждого поезда, а также усредненные результаты об использовании локомотивов и задержках поездов.

**Ключевые слова:** модель, локомотив, поездопоток, оптимизация, режим работы.

#### Summary

A model is proposed that calculates optimal operation modes of locomotives for train traffic management. Dynamic transportation problem was selected as a basis for the model. The simulation provides information about operation of each locomotive, schedule of each train, as well as averaged results regarding the use of locomotives and train delays.

**Keywords:** model, locomotive, optimization, operation.

#### 1. ПРОБЛЕМА

**Н**а закрепленном участке обращения работают сотни локомотивов. Вариантов движения каждого из них множество. Соответственно велико число возможных вариантов обеспечения поездопотока локомотивами в целом. Поэтому основная проблема оптимизации заключается в преодолении многовариантности. Однако решение проблемы при помощи полного перебора вариантов недопустимо — нужна оптимизационная модель.

Трудность состоит в том, что статические модели линейного программирования в данном случае не подходят — процесс существенно динамический. Поэтому в качестве исходной модели выбрана динамическая транспортная задача с задержками [1]. Для решения динамическая задача сводится к статической транспортной задаче линейного программирования методом размножения во времени [2]. Основная трудность — огромный размер получаемых матриц, поэтому выбор решателя — тоже проблема непростая. Общие подходы к решению аналогичных задач уже разрабатывались исследователями [3], в частности, была создана модель обращения кольцевых маршрутов [4].

#### 2. СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Создаваемая модель является замкнутой с точки зрения наличия тяговых ресурсов в течение всего периода моделирования. Моделирование осуществляется исходя из наличия, состояния и дислокации локомотивов по объектам (станциям и участкам) на конец сформированных «нулевых» («пустых») суток, причем в процессе моделирования общее число локомотивов не изменяется — меняется их расположение по станциям, появляются станции с избытком и соответственно с недостатком локомотивов. Требуется за счет грамотной передислокации

3

Январь – Март

направить локомотивы резервом со станции образовавшегося избытка в пункт их дефицита. В реальных условиях наличие, состояние и дислокация локомотивов по объектам принимается из системы ОКДЛ на начало планируемого периода.

На этой стадии моделирования, при введении по станциям поэтапно дополнительных локомотивов, важно определить минимально необходимое число локомотивов  $M_{\text{мин}}$ , которое позволит обеспечить тягой все составы поездов без простоев в ожидании отправления из-за отсутствия локомотива.

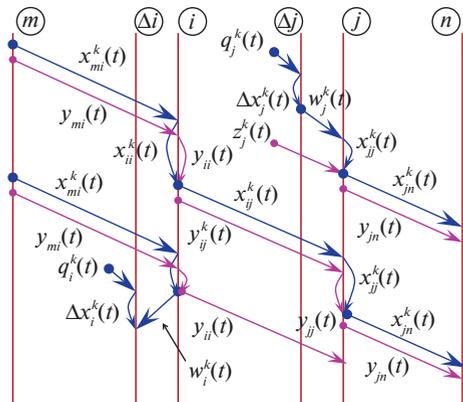
Затем для оперативных условий модель должна оценивать экономически обоснованную (оптимальную) потребность в локомотивах  $M_{\text{опт}}$ , величина которой меньше  $M_{\text{мин}}$ , но при этом допускаются простои составов в ожидании отправления из-за отсутствия локомотивов. Целевая функция имеет вид

$$E = 24T_M \cdot M \cdot e_{\text{л}} + \sum MI_p \cdot e_p + \sum Nt_{\text{ож}} \cdot e_c \text{ при } t_{\text{ож}} \leq t_{\text{ож.д}} \quad (1)$$

- где  $T_M$  — период моделирования, сут;
- $M$  — число локомотивов, находяющихся в системе;
- $e_{\text{л}}$  — стоимость 1 локомотиво-часа, руб.;
- $\sum MI_p$  — суммарные за период моделирования резервные пробеги локомотивов;
- $e_p$  — стоимость 1 локомотиво-километра резервного пробега, руб.;
- $\sum Nt_{\text{ож}}$  — суммарные простои составов поездов в ожидании отправления из-за отсутствия локомотивов за период моделирования;
- $e_c$  — стоимость 1 составо-часа, руб.;
- $t_{\text{ож}}$  — время ожидания состава;
- $t_{\text{ож.д}}$  — допустимое время ожидания состава.

### 3. ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Динамическая задача формулируется в виде функционала оптимизации и балансных уравнений (ограничений) в динамике. В функционале ставится задача минимизации суммарных расходов, связанных с работой локомотивов, и ущербов от задержки поездов. Схема размноженной сети с потоками приведена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема сведения динамической задачи к статической методу размножения во времени:**  
красные линии — движение поездов; синие — движение локомотивов (обозначения приводятся ниже в балансных уравнениях)

На рис. 1 схематически изображена станция ( $i-j$ ) с прилегающими участками ( $m-i, j-n$ ). На станции вводятся понятия сектора входа и сектора выхода.

#### 3.1. Отображение процесса выставки состава в секцию выхода

Уравнение для отображения количества ожидающих выставки в сектор выхода составов для потока  $k$ :

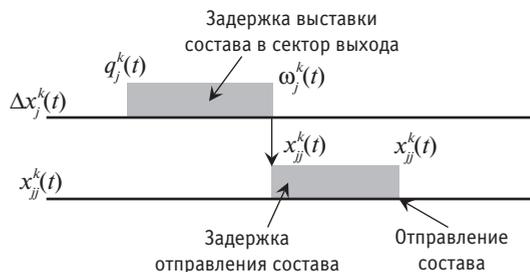
$$\Delta x_j^k(t+1) = \Delta x_j^k(t) + q_j^k(t) - w_j^k(t), \quad (2)$$

где  $\Delta x_j^k(t)$  — количество составов, готовых к выставке в сектор выхода;

$q_j^k(t)$  — фиксатор времени подачи состава в сектор выхода, задается согласно расписанию отправления, прибавляет (+1) к значению  $\Delta x_j^k(t)$ ;

$w_j^k(t)$  — фиксатор выставки состава в сектор выхода, отнимает (-1) от значения  $\Delta x_j^k(t)$ , используется в формуле баланса составов в секторе выхода станции.

В содержательном смысле это выставка составов из зоны ожидания в зону отправления (рис. 2). Если выставка невозможна, то накопление составов отображается переменной  $\Delta x_j^k(t)$ .



**Рис. 2. Схема передачи состава в сектор выхода станции**

#### 3.2. Подсчет времени опоздания прибытия поездов

Уравнение для отображения количества опаздывающих поездов:

$$\Delta x_i^k(t+1) = \Delta x_i^k(t) + q_i^k(t) - w_i^k(t), \quad (3)$$

где  $\Delta x_i^k(t)$  — количество опаздывающих поездов, (+1) означает, что поезд опаздывает на 1 такт, (0) — что опоздания нет;

$q_i^k(t)$  — фиксатор времени прибытия поезда по расписанию, заносит (+1) на значение переменной  $\Delta x_i^k(t)$ ;

$w_i^k(t)$  — фиксатор факта прибытия поезда.

#### 3.3. Баланс составов в секторе входа станции

Уравнение для фиксации количества составов в секторе входа станции:

$$x_{ii}^k(t+1) = x_{ii}^k(t) - x_{ij}^k(t) - w_i^k(t) + x_{mi}^k(t - t_{mi}), \quad (4)$$

где  $x_{ii}^k(t)$  — остаток составов в секторе входа;

$x_{ij}^k(t)$  — число составов, переведенных из сектора входа в сектор выхода  $j$  на такте  $t$ , состав переходит из сектора входа в сектор выхода станции, используя эту переменную;

$w_j^k(t)$  — фиксатор фактического прибытия поезда в сектор входа, эта переменная используется также в подсчете времени опоздания поезда;

$x_{mi}^k(t - t_{mi})$  — число составов, прибывающих с участка  $mi$  на такте  $t$ ;

$t_{mi}$  — время движения поезда по участку  $mi$ , выраженное в тактах.

### 3.4. Баланс составов в секторе выхода станции

Уравнение для отображения количества составов в секторе выхода станции:

$$x_{ij}^k(t+1) = x_{ij}^k(t) + w_j^k(t) + x_{ij}^k(t - t_{ij}) - x_{jn}^k(t), \quad (5)$$

где  $x_{ij}^k(t)$  — остаток составов в секторе выхода пассажирской станции;

$w_j^k(t)$  — фиксатор появления состава в секторе выхода пассажирской станции при передаче с технической;

$x_{ij}^k(t - t_{ij})$  — число составов, переданных из сектора входа в сектор выхода;

$t_{ij}$  — время передачи поезда из сектора входа в сектор выхода станции в тактах;

$x_{jn}^k(t)$  — поток поездов на участке  $jn$ .

### 3.5. Баланс локомотивов в секторе входа

Динамика количества локомотивов в секторе входа станции:

$$y_{ii}(t+1) = y_{ii}(t) - y_{ij}(t) + \sum_m y_{mi}(t - t_{mi}), \quad (6)$$

где  $y_{ii}(t)$  — остаток локомотивов в секторе входа станции;

$y_{ij}(t)$  — число локомотивов, переданных из сектора входа в сектор выхода станции;

$\sum_m y_{mi}(t - t_{mi})$  — число локомотивов, прибывших с примыкающих участков;

$t_{mi}$  — время прохождения локомотивом участка  $mi$  в тактах.

Локомотив может менять направление движения, поэтому в формуле используются переменные всех примыкающих участков.

### 3.6. Баланс локомотивов в секторе выхода

Динамика количества локомотивов в секторе выхода станции:

$$y_{jj}(t+1) = y_{jj}(t) + y_{ij}(t - t_{ij}) - \sum_n y_{jn}(t) + z_j(t), \quad (7)$$

где  $y_{jj}(t)$  — остаток локомотивов в секторе выхода;

$y_{ij}(t - t_{ij})$  — число локомотивов, переданных из сектора входа в сектор выхода;

$t_{ij}$  — время передачи локомотива из сектора входа в сектор выхода;

$\sum_n y_{jn}(t)$  — число отправленных локомотивов на примыкающие участки;

$z_j(t)$  — фиксатор подачи локомотива в сектор выхода станции из резерва.

### 3.7. Ограничения для потоков на участке

Ограничение, не допускающее движения состава по участку без локомотива:

$$\sum_k x_{mi}^k(t) \leq y_{mi}(t). \quad (8)$$

Ограничение по пропускной способности потока локомотивов на участке:

$$y_{mi}(t) \leq d_{mi}, \quad (9)$$

где  $d_{mi}$  — пропускная способность участка.

### 3.8. Функционал минимизации

$$\begin{aligned} & T \cdot c_l \cdot \sum_j \sum_t z_j(t) + M \cdot \sum_i \sum_t y_{ii}(t) + M_n \cdot \sum_i \sum_k \Delta x_i^k(T-1) + \\ & + M_n \cdot \sum_i \sum_k \sum_t x_{ii}^k(t) + c_h \cdot \sum_j \sum_k \sum_t x_{jj}^k(t) + \\ & + (c_h + 1) \cdot \sum_j \sum_k \sum_t \Delta x_j^k(t) + c_d \cdot \sum_i \sum_k \sum_t \Delta x_i^k(t) + \\ & + c_{lr} \cdot \left( \sum_m \sum_i \sum_t s_{mi} \cdot (y_{mi}(t) - \sum_k x_{mi}^k(t)) \right) \rightarrow \min, \quad (10) \end{aligned}$$

где  $T$  — расчетный период в тактах;

$c_l$  — стоимость одного локомотиво-такта в работе;

$M$  — большая величина (штраф);

$M_n$  — штраф за неприбытие поезда (большое число);

$c_h$  — стоимость одного поезд-такта;

$c_d$  — стоимость одного такта задержки (опоздания прибытия);

$c_{lr}$  — стоимость локомотиво-километра резервного пробега;

$s_{mi}$  — длина участка, км;

$t = 0, 1, 2, \dots, T$ .

### 3.9. Содержательный смысл слагаемых функционала

$T \cdot c_l \cdot \sum_j \sum_t z_j(t)$  — общая стоимость использования всех привлеченных локомотивов. Для подсчета вычисляется общее количество привлеченных из резерва локомотивов  $z_j(t)$  и затем умножается на стоимость использования одного локомотива за весь период  $T$ ;

$M \cdot \sum_i \sum_t y_{ii}(t)$  — стоимость нахождения локомотива в секторе входа станции (большое число). Функционал заставляет локомотив быстрее переходить в сектор выхода станции;

$M_n \cdot \sum_i \sum_k \Delta x_i^k(T-1)$  — штраф за неприбытие поезда (большое число). Если поезд не успел прибыть на станцию до конца расчетного периода  $T$ , то в функционал добавляется штраф  $M_n \cdot \sum_i \sum_k \sum_t x_{ii}^k(t)$ . За каждый такт простоя состава в секторе

входа в функционал добавляется штраф  $c_h$ ;

$c_h \cdot \sum_j \sum_k \sum_t x_{jj}^k(t)$  — общая стоимость простоя состава в секторе выхода станции. За каждый такт простоя состава в функционал добавляется штраф  $c_h$ ;

$(c_h + 1) \cdot \sum_j \sum_k \sum_t \Delta x_j^k(t)$  — общая стоимость задержки выстав-

ки состава на станцию. При подсчете используется коэффициент  $c_h + 1$ . Коэффициент специально на единицу больше чем коэффициент задержки отправления состава. Это сделано для того, чтобы состав как можно быстрее переходил в сектор выхода станции  $x_{jj}^k(t)$ ;

$c_d \cdot \sum_i \sum_k \sum_t \Delta x_i^k(t)$  — общая стоимость задержки прибытия состава на станцию. За каждый такт задержки прибытия состава в функционал добавляется штраф  $c_d$ ;

$c_{lr} \cdot \left( \sum_m \sum_i \sum_t s_{mi} \cdot (y_{mi}(t) - \sum_k x_{mi}^k(t)) \right)$  — общая стоимость резервного пробега локомотива по участку. Слагаемое  $\sum_m \sum_i \sum_t s_{mi} \cdot (y_{mi}(t) - \sum_k x_{mi}^k(t))$  подсчитывает количество проходов локомотива по участку без состава.

#### 4. ВЫДАВАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результатах отражаются: характер полного и полезного использования локомотивов, динамика движения поездов и возникшие задержки. При этом можно увидеть режим работы каждого локомотива и график движения каждого поезда.

Для расчета выбран участок обращения от станции Дружинино до станции Вековка (Горьковская железная дорога), включающий 9 станций. Размеры движения приняты близкими к реальным — в действительности на участке работают 180 локомотивов.

Проведены эксперименты, в ходе которых решались следующие задачи:

- расчет числа локомотивов, необходимого для продвижения поездов без задержек (при наилучшем использовании локомотивов);

- определение параметров продвижения поездопотока при том же, что и в реальности, числе локомотивов — какие минимальные задержки возникают при этом;

- выявление того, как отразится на динамике поездопотока уменьшение числа локомотивов;

- установление наилучшего распределения локомотивов по станциям участка для заданной конфигурации участка и структуры поездопотока.

Для пропуска потока без задержек требуется 195 локомотивов. Уменьшение числа локомотивов со 180 до 175 приводит к незначительному росту задержек. На рис. 3–6 представлены некоторые результаты расчета для числа локомотивов, равного 175. Период расчета — 7 сут. Общее число доставленных поездов — 1977.

Согласно результатам экспериментов, средняя занятость локомотивов — 98% модельного времени, его распределение показано на рис. 3.

Модель выдает информацию о числе проведенных локомотивами поездов (см. рис. 4). Маршруты могут быть короткими, тогда и поездов можно провести больше.

С помощью модели можно увидеть, какие задержки в поездопотоке возникают на разных направлениях (см. рис. 5).

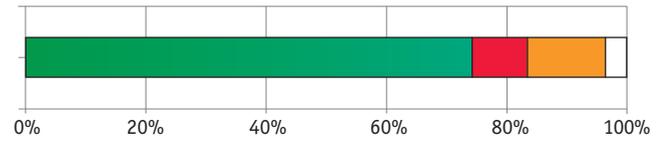


Рис. 3. Полное и полезное использование локомотивов: — полезная занятость; — межоперационный простой; — резервный пробег; — простой



Рис. 4. Распределение локомотивов по числу доставленных поездов

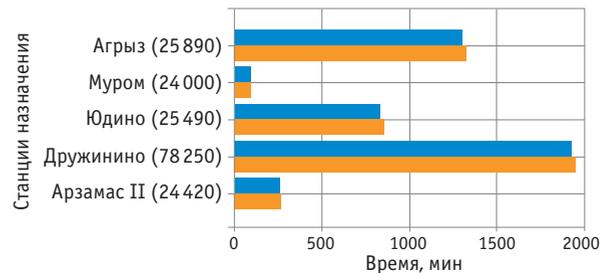


Рис. 5. Задержки поездов, отправленных со станции Вековка: — расчетное время; — среднее реальное время

Модель выдает информацию о режиме работы каждого локомотива (см. рис. 6).

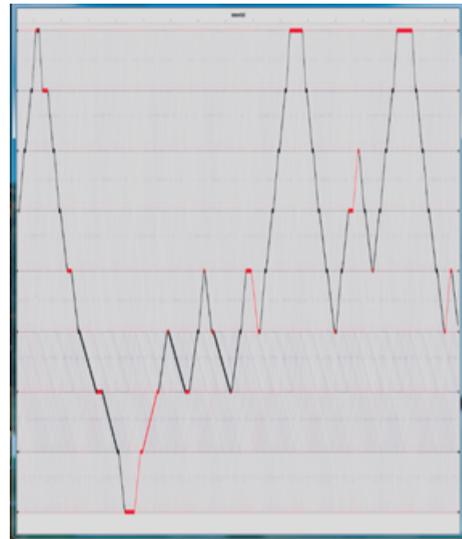


Рис. 6. График работы локомотива: красная линия — холостой пробег

Следует отметить, что предложенную модель можно использовать в двух вариантах — для разработки рациональной технологии работы локомотивов на участке при той или иной структуре поездопотока и для оптимального управления оборотом локомотивов в оперативных условиях. Для

второго варианта оптимизирующий блок необходимо подключить к информационным системам. Предлагаемое автоматизированное управление работой локомотивов на всех участках сети дает значительный технологический и экономический эффект.

## Литература

1. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. Вып. 3. С. 521–531.
2. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии : дис. ... д-ра техн. наук. Липецк : ЛПИ, 1986. 377 с.
3. Тушин Н. А. Повышение интеллектуального уровня процесса моделирования транспортных систем // Общие вопросы транспорта. Моделирование и оптимизация в логистических транспортных системах : сб. науч. трудов / Под ред. Е. Н. Тимухиной. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2011. № 89 (172). С. 194–199.
4. Александров А. Э., Ковалев И. А. Построение автоматизированного процесса управления обращением кольцевых маршрутов // Транспорт Урала. 2007. № 1 (12). С. 41–47. ISSN 1815–9400.

## References

1. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Optimizatsiya struktury transportnykh potokov v dinamike pri prioritete potrebiteley [Optimization of traffic flow structure with account to dynamics with customer priority] // Ekonomika i matematicheskie metody. 1982. T. XVIII. Vol. 3. P. 521–531.
2. Kozlov P. A. Teoreticheskie osnovy, organizatsionnye formy, metody optimizatsii gibkoy tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya zavodov chernoy metallurgii : dis. ... d-ra tekhn. nauk [Theoretical basis, organizational forms, methods of optimization of flexible transport service methods at ferrous metallurgy plants : DSc in Engineering Thesis]. Lipetsk : LPI, 1986. 377 p.
3. Tushin N. A. Povyshenie intellektualnogo urovnya protsessa modelirovaniya transportnykh sistem [Improving the intellectual level of simulation of transport systems] // Obshchie voprosy transporta. Modelirovanie i optimizatsiya v logisticheskikh transportnykh sistemakh : sb. nauch. trudov / Pod red. E. N. Timukhinoy. Ekaterinburg : USURT Publishing, 2011. No. 89 (172). P. 194–199.
4. Aleksandrov A. E., Kovalev I. A. Postroenie avtomatizirovannogo protsessa upravleniya obrashcheniem koltsevykh marshrutov [Development of automated process of circular routes management] // Transport of the Urals. 2007. No. 1 (12). P. 41–47. ISSN 1815-9400.

УДК 656.21.001.2

Хабидулла Туранович Туранов, доктор технических наук, профессор кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
 Андрей Александрович Гордиенко, ассистент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА НА ПРЯМОМ УЧАСТКЕ ГОРКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВСТРЕЧНОГО ВЕТРА

Khabibulla Turanovich Turanov, DSc in Engineering, Professor, Department of Stations, Junctions and Freight Work, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,  
 Andrey Alexandrovich Gordienko, Assistant Lecturer, Department of Stations, Junctions and Freight Work, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

### Mathematical description of railcar movement on tangent track on hump when exposed to headwind

#### Аннотация

В статье изложены результаты построения математической модели движения вагона на прямом участке сортировочной горки при воздействии встречного ветра. Получены аналитические формулы для определения скорости вагона и пройденного пути. Установлено, что вагон может медленно набрать скорость и в дальнейшем — при принудительных сопротивлениях — прекратить движение. На основе решения тестовой задачи построены графические зависимости скорости и пройденного пути от времени.

**Ключевые слова:** горка, прямой участок, встречный ветер, принцип Д'Аламбера в координатной форме, интеграл от рациональных функций, интеграл, содержащий экспоненциальную функцию.

#### Summary

The article presents the results of building a mathematical model of railcar movement on tangent track on hump when exposed to headwind. Analytical formulas for determining car speed and distance traveled have been obtained. It is found that the car can slowly pick up speed and subsequently stop moving in case of forced resistance. Based on the test problem solved, graphic dependence of speed and distance traveled on time is shown.

**Keywords:** hump, tangent track, headwind, D'Alembert's principle in coordinate form, rational functions integral, integral containing exponential function.

#### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

**В** [1–3] отмечены некорректности теоретических предположений при изучении динамики скатывания вагона по профилю сортировочной горки, изложенных в [4–14]. В [3] рассмотрены расчетная и математическая модели для определения скорости  $v(t)$  и пройденного пути  $x(t)$  по уклону горки при воздействии силы тяжести и встречного ветра, созданные на основе дифференциального уравнения движения в координатной форме. В [15] с использованием этого же уравнения получены аналитические формулы для скорости  $v(t)$  и пройденного пути  $x(t)$  на прямом участке горки при воздействии попутного ветра.

Однако до сих пор не исследовано движение вагона на путях подгорочного парка сортировочной станции при встречном ветре с учетом начальной скорости вагона. Тем не менее эта проблема является крайне важной и актуальной, особенно для случая ускоренного формирования состава, поскольку из-за встречного ветра вагон может не преодолеть необходимого расстояния и не доехать до места, где находятся группы «стоящих» вагонов.

Настоящая статья продолжает серию публикаций [1–3, 16–18], посвященных изучению динамики скатывания вагона по сортировочной горке на основе принципа Д'Аламбера в координатной форме [19]. Поэтому многие положения и аналитические выражения могут быть такими же, как и в [3, 17, 18].

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать движение вагона на *почти* прямом участке (поскольку обычно его уклон составляет 0,6 ‰, т. е. 0,0006 рад, чему соответствует 0,034 град) подгорочного парка сортировочной горки при воздействии встречного ветра.

### ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Требуется вывести конечную аналитическую формулу скорости и пройденного расстояния (пути) при движении вагона на прямом участке сортировочной горки при воздействии встречного ветра, а также установить характер графических зависимостей  $v(t)$  и  $x(t)$  и их взаимосвязи, поскольку зависимость  $x(t)$  будет получена в результате интегрирования функции  $v(t)$ .

### МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Как и ранее [3, 17, 18], воспользуемся принципом Д'Аламбера в координатной форме [15, 19] и основными положениями дифференциального и интегрального исчисления [20, 21].

### УСЛОВИЯ ЗАДАЧИ И ПРИНЯТЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

В отличие от [3], рассмотрим частный случай, когда вагон по профилю сортировочной горки скатывается поступательно и входит на почти прямой участок пути подгорочного парка с заданной начальной скоростью  $v_0$ , с тем чтобы он при воздействии встречного ветра докатился до расчетной точки без остановки в пути следования. При движении на прямом участке пути подгорочного парка одиночный вагон (или отцеп) будет испытывать воздействие в основном внешних сил — в виде силы аэродинамического сопротивления  $\vec{F}_{\text{рв}}$ , где  $(\vec{F}_{\text{рвх}}, \vec{F}_{\text{рвы}}) \in \vec{F}_{\text{рв}}$ , и силы трения качения со скольжением колес.

Пусть, как и в [3], вагон движется поступательно с переносной скоростью  $\vec{v}_e = \vec{v} = \vec{v}_B$  (искомая величина) на почти прямом участке подгорочного парка относительно подвижной системы координат  $Oxuz$ , жестко связанной с вагоном (рис. 1).

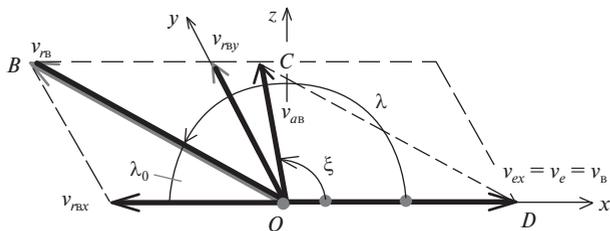


Рис. 1. Векторная диаграмма скорости вагона и встречного ветра на прямом участке горки

На рис. 1 обозначено:  $O$  — начало подвижной системы координат  $Oxuz$ , жестко связанной с вершиной горки;  $H$  — горизонтальная плоскость;  $\vec{v}_{\text{рв}}$  — относительная скорость частиц воздуха (скорость ветра) по отношению к подвижной системе отсчета  $Oxuz$  (вагон);  $\lambda$  — направляющий угол вектора относительной скорости частиц воздуха по оси  $Ox$ ;  $\vec{v}_{\text{ав}}$  — абсолютная скорость частиц воздуха по отношению к земле (к вершине горки) (по данным главы 5 СНиП «Строительная климатология и геофизика» — задаваемая величина);  $\xi$  — направляющий угол вектора абсолютной скорости частиц воздуха по оси  $Ox$  (задаваемая величина).

Допустим, что векторы относительной скорости частиц воздуха (скорости ветра)  $\vec{v}_{\text{рв}}$  и переносной скорости (скорости вагона)  $\vec{v}_e = \vec{v} = \vec{v}_B$  расположены на горизонтальной плоскости  $H$  и направлены под углом  $\lambda$  к горизонту (ось  $Ox$ ).

Примем, что с вагоном жестко связана подвижная система координат  $Oxuz$ , а частицы воздуха, в свою очередь, движутся со скоростью  $\vec{v}_{\text{рв}}$  относительно подвижной системы координат  $Oxuz$  (т. е. вагона). Требуется найти проекции относительной скорости частиц воздуха (скорости ветра)  $\vec{v}_{\text{рв}}$  (относительно подвижных осей  $Oxuz$ , связанных с вагоном).

Как и в [3], покажем зависимости проекции относительной скорости частиц воздуха  $\vec{v}_{\text{рв}}$  (вычисляемая величина) от скорости ветра по отношению к вершине горки, т. е. абсолютной скорости частиц воздуха  $\vec{v}_{\text{ав}}$  (величина задаваемая), и скорости вагона  $\vec{v} = \vec{v}_B$  (искомая величина). Согласно теореме о сложении скоростей при сложном движении, известной из геометрической статики [15, 19], запишем

$$\vec{v}_{\text{ав}} = \vec{v}_{\text{ex}} + (-\vec{v}_{\text{рв}}), \quad (1)$$

где  $\vec{v}_{\text{ав}}$  — абсолютная скорость частиц воздуха (скорость ветра);  $\vec{v}_{\text{ex}} = \vec{v}_x = \vec{v}_{\text{вх}} = \vec{v}_B = \vec{v}_e$  — переносная скорость (скорость вагона) по оси  $Ox$ ;

$\vec{v}_{\text{рв}}$  — относительная скорость частиц воздуха (скорость ветра) по отношению к вагону.

Поскольку считаем, что направление ветра противоположно направлению движения вагона (т. е. ветер встречный), проекция (1) на ось  $Ox$  имеет вид

$$v_{\text{рвх}} = v_e - v_{\text{ав}} \cos(\xi). \quad (2)$$

В соответствии с (2) проекции силы аэродинамического сопротивления  $\vec{F}_{\text{рв}}$  для встречного ветра на координатные оси  $Ox$  и  $Oy$  определяются следующим образом, Н:

$$F_{\text{рвх}}(v_e) = 0,5c_{\text{в}}\rho_{\text{в}}A_{\text{т}}[v_e - v_{\text{ав}} \cos(\xi)]^2; \quad (3)$$

$$F_{\text{рвы}} = 0,5c_{\text{в}}\rho_{\text{в}}A_{\text{б}}v_{\text{рвы}}^2, \quad (4)$$

где  $v_{\text{рвы}} = v_{\text{рв}} \sin(\lambda)$  — проекция относительной скорости ветра на ось  $Oy$  (величина, задаваемая по данным СНиП 23-01-99), м/с.

Или по формуле ТУ [22]

$$F_{\text{рвы}} = 500A_{\text{б}}. \quad (5)$$

Отметим, что в частном случае — при отсутствии бокового ветра (относительной скорости ветра), т. е. при  $v_{\text{рвы}} = 0$ , значение  $F_{\text{рвы}} = 0$ .

В (3) и (4), как и в [3], обозначено:  $c_{\text{в}}$  — безразмерный коэффициент сопротивления воздуха, зависящий от формы тела и от того, как оно ориентировано при движении (например, для плоской поверхности  $c_{\text{в}} = 1,1$  [15]);  $\rho_{\text{в}}$  — средняя плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup> (обычно принимают 1,26–1,29 кг/м<sup>3</sup>);  $A_{\text{т}}$  — площадь торцевой поверхности вагона с грузом, м<sup>2</sup>,  $A_{\text{т}} = 2B \cdot 2H$  (где  $2B$  и  $2H$  — ширина и высота наветренных поверхностей вагона с грузом, м);  $A_{\text{б}}$  — площадь боковой поверхности вагона с грузом, м<sup>2</sup>,  $A_{\text{б}} = 2L \cdot 2H$  (где  $2L$  — длина боковых наветренных поверхностей вагона с грузом, м).

### ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ СКАТЫВАНИЯ ВАГОНА

Расчетная модель движения вагона на почти прямом участке подгорочного парка горки, учитывающая трение качения колес вагона со скольжением  $\bar{F}_{тр,x}$ , приведена на рис. 2. При этом предполагаем, что вагон (или отцеп) входит на пути подгорочного парка горки с начальной скоростью  $\bar{v}_0$  и продолжает замедлять свое движение с учетом воздействия встречного ветра  $\bar{F}_{рвх}$ .

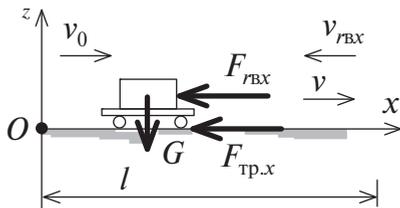


Рис. 2. Расчетная схема движения вагона на подгорочном парке горки при воздействии встречного ветра

На рис. 2 обозначено:  $\bar{v}_{рвх}$  — относительная скорость ветра, м/с;  $l$  — длина почти прямого участка подгорочного парка, м. Здесь движение вагона по путям подгорочного парка горки происходит по инерции со скоростью входа вагона  $v_0$  на данный участок пути.

### МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СКАТЫВАНИЯ ВАГОНА С ГОРКИ

Запишем основной закон динамики для переносного движения вагона (или принцип Д’Аламбера) в координатной форме [15, 19]:

$$M \frac{dv_{a,x}}{dt} = \sum_{k=1}^n F_{kx} + \sum_{k=1}^n R_{kx},$$

где  $M$  — масса вагона с грузом с учетом массы вращающихся частей (колесных пар) вагона, кг;

$F_x = F_{сд,x}$  — проекции всех активных («сдвигающих») сил на направления скатывания вагона, т. е. на ось  $Ox$  (при наличии таких сил), Н;

$R_x = F_{уд,x}$  — проекции всех реактивных («удерживающих») сил (в данном случае — силы аэродинамического сопротивления и силы трения) на ось  $Ox$ , Н.

Подставляя (3) и (4) в принцип Д’Аламбера, в отличие от [3], будем иметь

$$M \frac{dv}{dt} = F_{сд,x} - F_{уд,x}(v_e),$$

где

$$F_{сд,x} = G \sin(\psi_0); F_{уд,x}(v_e) = F_{рвх}(v_e) + f_0 G + n_{ку} f_{ск0} F_{рвх}.$$

Здесь  $\psi_0$  — уклон пути на подгорочном парке, рад, обычно принимают  $\psi_0 = 0,0006$  рад, потому что  $\sin(\psi_0) \approx 0$ , поэтому величиной  $G \sin(\psi_0)$  можно пренебречь;  $f_0$  — некоторый ус-

ловный (или приведенный) коэффициент трения скольжения, учитывающий количество колес в тележках, трения качения (по кольцам подшипника и колеса по рельсу) [3];  $n_{ку}$  — количество колесных пар, боковые поверхности гребней которых будут прижаты к боковой поверхности рельсовой нити (обычно  $n_{ку} = 4$ );  $f_{ск0}$  — коэффициент трения скольжения гребней колес по рельсу (обычно принимают  $f_{ск0} = 0,25$ ).

Учитывая, что  $G = Mg$ , преобразуем последнее уравнение:

$$M \frac{dv}{dt} = -[F_{рвх}(v_e) + f_0 Mg + n_{ку} f_{ск0} F_{рвх}]. \quad (6)$$

Подставляя (3) для встречного ветра в (6), в отличие от [3], представим основной закон динамики применительно к задаче движения вагона на прямом участке горки в виде

$$M \frac{dv}{dt} = -[b_0(v_e - c_0)^2 + F_0], \quad (7)$$

где  $b_0$  — известный по величине постоянный коэффициент, имеющий размерность Н/(м/с)<sup>2</sup>,

$$b_0 = 0,5 c_{вДВ} A_T; \quad (8)$$

$c_0$  — известный по величине постоянный коэффициент, имеющий размерность скорости м/с,

$$c_0 = v_{ав} \cos(\xi);$$

$F_0$  — силы сопротивлений (трения скольжения) в системе «вагон — колесная пара», Н,

$$F_0 = f_0 Mg + n_{ку} f_{ск0} F_{рвх}. \quad (9)$$

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ СКАТЫВАНИЯ И ПРОЙДЕННОГО ПУТИ ВАГОНА НА ПРЯМОМ УЧАСТКЕ С ГОРКИ

Обозначая  $v_e$  в (2) через  $v$  и разделяя обе части (7) на  $b_0$ , в отличие от [3], будем иметь следующее дифференциальное уравнение движения вагона на прямом участке горки при встречном ветре:

$$\frac{M}{b_0} \frac{dv}{dt} = -[(v - c_0)^2 + a_0^2], \quad (10)$$

где  $a_0$  — постоянная величина, имеющая размерность скорости м/с,

$$a_0^2 = \frac{F_0}{b_0}. \quad (11)$$

Начальные условия задачи Коши: если  $t = 0$ , то  $v(0) = v_0$  ( $v_0$  — начальная скорость, с которой вагон входит на прямой участок подгорочного парка).

Разделяя переменные в (9), после преобразования получим [3]



$$\frac{b_0}{M} dt = -\frac{dv}{(v - c_0)^2 + a_0^2},$$

или, имея в виду, что  $d(v - c_0) = dv$ ,

$$\frac{b_0}{M} dt = -\frac{d(v - c_0)}{(v - c_0)^2 + a_0^2} = \frac{d(v - c_0)}{a_0^2 - (v - c_0)^2}.$$

Беря интегралы от рациональных функций обеих частей последнего равенства [20, 21], подставляя пределы интегрирования и опуская все промежуточные математические выкладки, которые представлены в [3], окончательно найдем переносную скорость вагона  $v(t) = v_e(t)$  при его движении на прямом участке подгорочного парка горки при воздействии встречного ветра (см. рис. 2):

$$v_e(t) = c_0 + \frac{a_0(e^{\alpha t} - d_0)}{e^{\alpha t} + d_0}, \quad (12)$$

где  $\alpha$  — постоянная величина, имеющая размерность угловой скорости  $1/c$ ,

$$\alpha = a_0 \frac{b_0}{M};$$

$d_0$  — безразмерное отношение известных по величине данных,

$$d_0 = \frac{a_0 + c_0 - v_0}{a_0 - c_0 + v_0}.$$

Преобразуя (12) и опуская несложные математические преобразования, которые представлены в [3], окончательно найдем другой вид формулы переносной скорости вагона:

$$v_e(t) = c_0 + a_0 - \frac{2a_0d_0}{e^{\alpha t} + d_0}. \quad (13)$$

Переходя к пределу при  $t \rightarrow \infty$ , как и в [3], можно получить максимальную скорость вагона:

$$v_{\max} = c_0 + a_0.$$

Отсюда ясно, что скорость вагона с течением времени на почти прямом участке пути подгорочного парка при воздействии встречного ветра описывается согласно (12) или (13): при принятых геометрических параметрах спускной части профиля горки и массы вагона (отцепы) вагон может набрать заметную скорость (до  $v_{\max}$ ) по нелинейному закону и в дальнейшем по инерции двигаться равномерно.

Учитывая, что  $v_e = \frac{dx}{dt}$ , перепишем (13) в виде дифференциального уравнения движения вагона на почти прямом участке подгорочного парка горки:

$$\frac{dx}{dt} = c_0 + a_0 - \frac{2a_0d_0}{e^{\alpha t} + d_0}. \quad (14)$$

Начальные условия задачи Коши: если  $t = 0$ , то  $x(0) = 0$ .

Для решения (14), поступая аналогично [3] и опуская все элементарные математические выкладки, окончательно получим конечную аналитическую формулу пройденного расстояния (пути) вагона в зависимости от времени:

$$x(t) = (c_0 - a_0)t + \frac{2a_0}{\alpha} \ln \left| \frac{d_0 + e^{\alpha t}}{d_0 + 1} \right|. \quad (15)$$

Отсюда ясно, что расстояние, пройденное вагоном с течением времени, описывается согласно (15): с увеличением времени движения вагона на почти прямом участке подгорочного парка горки это расстояние практически будет увеличиваться медленно и имеет нелинейный характер (т. е. вагон движется неравномерно).

Таким образом, с использованием принципа Д'Аламбера в координатной форме, метода разделения переменных, табличного интеграла от рациональных функций и интеграла, содержащего показательную функцию, выведены конечные аналитические формулы для определения скорости  $v_e(t)$  и пройденного расстояния  $x(t)$  вагона на почти прямом участке горки с течением времени при воздействии встречного ветра.

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА

С целью установления характера кривых  $v_e(t)$  и  $x(t)$  пусть, как и в [3, 15], исходными данными будут:  $v_0 = 1,2$  м/с,  $c_0 = 6$  м/с,  $a_0 = 7,678$  м/с,  $d_0 = 4,335$ ,  $\alpha = 0,013$  1/с. Ниже приведен макет-документ, подтверждающий полученные результаты исследований, которые выполнены в вычислительной среде Mathcad [23].

$$v_0 := 1.2 \text{ м/с} \quad c_0 := 6 \text{ м/с} \quad a_0 := 7.678 \text{ м/с} \quad \alpha := 0.013 \text{ 1/с}$$

$$d_0 := \frac{a_0 + c_0 - v_0}{a_0 - c_0 + v_0} \quad d_0 = 4.336$$

$t := 0, 0.05 .. 60$  — вариация времени движения вагона на почти прямом участке горки, с;

$$ve(t) := c_0 + a_0 - \frac{2 \cdot a_0 \cdot d_0}{e^{\alpha \cdot t} + d_0}$$

$$vel(t) := c_0 + a_0 \cdot \frac{e^{\alpha \cdot t} - d_0}{e^{\alpha \cdot t} + d_0}$$

— переносная скорость вагона  $v(t)$  в любой момент времени  $t$  на почти прямом участке горки, м/с;

$$x(t) := (c_0 - a_0) \cdot t + \frac{2 \cdot a_0}{\alpha} \cdot \ln \left( \frac{d_0 + e^{\alpha \cdot t}}{d_0 + 1} \right)$$

— пройденное расстояние  $x(t)$  вагона в любой момент времени  $t$  на почти прямом участке сортировочной горки, м.

Графические зависимости скорости  $v(t)$  и пройденного расстояния  $x(t)$  на почти прямом участке горки при вариации времени движения вагона  $t = 0, 0.05.. 60$  с представлены на рис. 3 и 4.

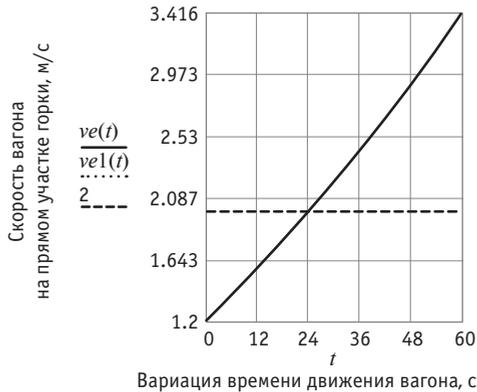


Рис. 3. Графическая зависимость скорости при движении вагона на почти прямом участке горки при  $t = 0, 0.05.. 60$  с



Рис. 4. Графическая зависимость пройденного расстояния при движении вагона на почти прямом участке горки при  $t = 0, 0.05.. 60$  с

Анализ графических зависимостей  $v(t)$  и  $x(t)$  показывает, что, например, в течение времени  $t = 25$  с вагон пройдет расстояние 40 м, при этом его скорость составит 2,02 м/с ( $\approx 7,28$  км/ч). Следует иметь в виду, что характер кривых  $x(t)$  и  $v(t)$  зависит от исходных данных задачи [3, 15]. Поэтому здесь результаты ориентировочных расчетов  $v(t)$  и  $x(t)$  (как частный случай движения вагона по профилю горки) практически совпадают с данными, полученными в [3], где рассмотрено движение вагона по первому скоростному участку горки.

Для того чтобы убедиться в справедливости утверждения о том, что «вагон, двигаясь неравномерно, может набрать заметную скорость и в дальнейшем по инерции двигаться практически равномерно», построим графические зависимости  $v(t)$  и  $x(t)$ , например, при  $t = 0, 10.. 600$  с, которые представлены на рис. 5 и 6.

Как видно, указанное утверждение справедливо при длительном движении вагона на почти прямом участке пути. Для примера отметим, что при заданных исходных данных вагон может набрать максимальную скорость  $v_{\max} = 13,638$  м/с

( $\approx 49,1$  км/ч) при  $t = 580$  с. При этом пройденный путь равен  $x(580) \approx 5,924$  км. Однако в принципе для движения вагона на почти прямом участке горки нет необходимости строить графики функции даже при  $t > 60$  с.

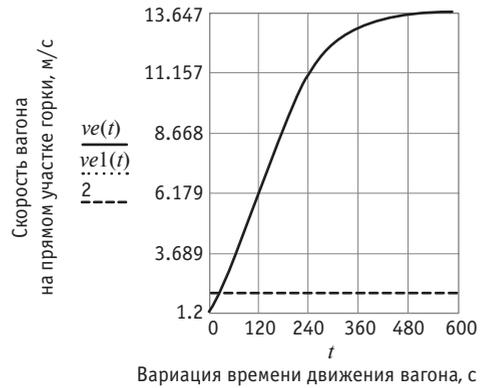


Рис. 5. Графическая зависимость скорости при движении вагона на почти прямом участке горки при  $t = 0, 10.. 600$  с

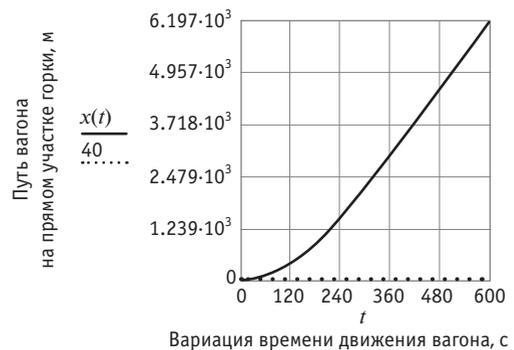


Рис. 6. Графическая зависимость пройденного расстояния при движении вагона на почти прямом участке горки при  $t = 0, 10.. 600$  с

Подчеркнем, что в настоящей статье важным результатом исследований было установить характер графических зависимостей  $v(t)$  и  $x(t)$  и их взаимосвязанность, поскольку зависимость  $x(t)$  получена в результате интегрирования функции  $v(t)$ . При других исходных данных, естественно, графические зависимости  $v(t)$  и  $x(t)$  могут иметь иной, но все равно взаимосвязанный вид (см. рис. 3 и 4).

### ВЫВОДЫ

1. Полученные на основе классических положений теоретической механики математические модели движения вагона на почти прямом участке подгорочного парка горки при воздействии встречного ветра позволили определить скорость скатывания вагона  $v(t)$  и пройденное расстояние  $x(t)$  с течением времени.

2. Результаты исследований могут быть использованы для корректного решения технической проблемы определения рациональных геометрических параметров (профиля) и кинематических характеристик вагона  $v(t)$  и  $x(t)$  при его движении по профилю сортировочной горки.

## Литература

1. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Уточненные математические модели скорости скатывания вагона по уклону горки при воздействии силы тяжести и попутного ветра // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 1. С. 15–21. ISSN 0236-1914.
2. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Упрощенные математические модели движения вагона по уклону горки при воздействии силы тяжести и попутного ветра // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 3. С. 20–24. ISSN 0236-1914.
3. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Уточненные математические модели движения вагона по уклону сортировочной горки при воздействии силы тяжести и встречного ветра // Наука и техника транспорта. 2015. № 1. С. 16–24. ISSN 2074-9325.
4. Образцов В. Н. Станции и узлы. Ч. II. М.: Трансжелдориздат, 1938. 492 с.
5. Земблинов С. В., Страковский И. И. Станции и узлы. М.: Трансжелдориздат, 1963. 348 с.
6. Железнодорожные станции и узлы : учеб. пособие / В. Д. Никитин, И. Е. Савченко, Е. А. Ветухова и др. М.: ВЗИИТ, 1970. 79 с.
7. Савченко И. Е., Земблинов С. В., Страковский И. И. Железнодорожные станции и узлы : учебник для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1967. 466 с.
8. Железнодорожные станции и узлы : учебник для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. В. Г. Шубко, Н. В. Правдина. М.: УМК МПС России, 2002. 368 с.
9. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. М.: ТЕХИНФОРМ, 2003. 168 с.
10. Правдин Н. В., Бессоненко С. А. Анализ существующих методов расчета сортировочных горок // Транспорт: наука, техника, управление. 2004. № 5. С. 22–27. ISSN 0236-1914.
11. Железнодорожные станции и узлы (задачи, примеры, расчеты) : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. Н. В. Правдина и В. Г. Шубко. М.: Маршрут, 2005. 502 с.
12. Бессоненко С. А. Теория расчета сортировочных горок для различных климатических зон : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИИТ, 2011. 37 с.
13. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) : учебник / Под ред. Н. В. Правдина и С. П. Вакуленко. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. 1086 с.
14. Железнодорожные станции и узлы : учебник / Под ред. В. И. Апатцева и Ю. И. Ефименко. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. 855 с.
15. Комаров К. Л., Яшин А. Ф. Теоретическая механика в задачах железнодорожного транспорта. Новосибирск : Наука, 2004. 296 с.
16. Туранов Х. Т., Ситников С. А., Зырянецев А. А. Математическое моделирование скорости вагона по профилю сортировочной горки при воздействии попутного ветра // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 4. С. 7–11. ISSN 0236-1914.
17. Туранов Х. Т., Ситников С. А. Математическое моделирование скорости скатывания вагона с сортировочной горки под действием силы тяжести и встречного ветра // Наука и техника транспорта. 2012. № 1. С. 38–46. ISSN 2074-9325.
18. Turanov Kh. Analytical investigation of wagon speed and traversed distance during wagon hump rolling under the impact of gravity forces and head wind // Global Journal of Researches in Engineering : A. Mechanical and Mechanics Engineering. 2014. Vol. 14. Issue 1. Version 1.0. P. 1–9.
19. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. Т. II. Динамика. М.: Наука, 1983. 640 с.
20. Пискунов Н. С. Дифференциальные и интегральные исчисления для вузов. Т. 1. М.: Наука, 1978. 456 с.
21. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1980. 976 с.
22. Приложение 14 к СМГС «Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах». М.: Планета, 2008. 191 с.
23. Кирьянов Д. В. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 432 с.

## References

1. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Utochnennyye matematicheskiye modeli skorosti skatyvaniya vagona po uklonu gorki pri vozdeystvii sily tyazhesti i poputnogo vetra [Refined mathematical model of rolling speed of rail car moving downgrade on hump under the influence of gravity and back wind] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2015. No. 1. P. 15–21. ISSN 0236-1914.
2. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Uproshchennyye matematicheskiye modeli dvizheniya vagona po uklonu gorki pri vozdeystvii sily tyazhesti i poputnogo vetra [Simplified mathematical model of rolling speed of rail car moving downgrade on hump under the influence of gravity and back wind] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2015. No. 3. P. 20–24. ISSN 0236-1914.
3. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Utochnennyye matematicheskiye modeli dvizheniya vagona po uklonu sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii sily tyazhesti i vstrechnogo vetra [Refined mathematical model of rolling speed of rail car moving downgrade on gravity hump yard under the influence of gravity and head wind] // Nauka i tekhnika transporta. 2015. No. 1. P. 16–24. ISSN 2074-9325.
4. Obratsov V. N. Stantsii i uzly [Stations and junctions]. Ch. II. M.: Transzheldorizdat, 1938. 492 p.
5. Zemblinov S. V., Strakovskiy I. I. Stantsii i uzly [Stations and junctions]. M.: Transzheldorizdat, 1963. 348 p.
6. Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly : ucheb. posobie [Stations and junctions : a textbook] / V. D. Nikitin, I. E. Savchenko, E. A. Vetukhov i dr. M.: VZIIIT, 1970. 79 p.
7. Savchenko I. E., Zemblinov S. V., Strakovskiy I. I. Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly : uchebnik dlya vuzov zh.-d. трансп. [Railway stations and junctions : a textbook for railway universities]. M.: Transport, 1967. 466 p.
8. Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly : uchebnik dlya vuzov zh.-d. трансп. [Railway stations and junctions : a textbook for railway universities] / Pod red. V. G. Shubko, N. V. Pravdina. M.: UMC MPS Rossii, 2002. 368 p.
9. Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm [Rules and regulations for the design of sorting devices on 1520 mm railways]. M.: TEKHINFORM, 2003. 168 p.
10. Pravdin N. V., Bessonenko S. A. Analiz sushchestvuyushchikh metodov rascheta sortirovochnykh gorok [Analysis of the existing methods for designing hump yards] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2004. No. 5. P. 22–27. ISSN 0236-1914.
11. Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly (zadachi, primery, raschety) : ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. трансп. [Railway stations and junctions (tasks, examples, calculations) : a textbook for railway universities] / Pod red. N. V. Pravdina i V. G. Shubko. M.: Marshrut, 2005. 502 p.
12. Bessonenko S. A. Teoriya rascheta sortirovochnykh gorok dlya razlichnykh klimaticheskikh zon : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Theory of the design of hump yards for various climatic zones : Synopsis of DSc in Engineering Thesis]. M.: MIIT, 2011. 37 p.
13. Proektirovanie infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnyye i transportnyye uzly) : uchebnik [Design of railway transport infrastructure (stations, railway and transport junctions) : a textbook] / Pod red. N. V. Pravdina i S. P. Vakulenko. M.: FGBOU «Uchebno-metodicheskyy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2012. 1086 p.
14. Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly : uchebnik [Railway stations and junctions : a textbook] / Pod red. V. I. Apatseva i Yu. I. Yefimenko. M.: FGBOU «Uchebno-metodicheskyy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2014. 855 p.
15. Komarov K. L., Yashin A. F. Teoreticheskaya mekhanika v zadachakh zheleznodorozhnogo transporta [Theoretical mechanics in rail transport problems]. Novosibirsk : Nauka, 2004. 296 p.
16. Turanov Kh. T., Sitnikov S. A., Zyryantsev A. A. Matematicheskoe modelirovanie skorosti vagona po profilu sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra [Mathematical modeling of rail car speed moving on hump yard profile when exposed to back wind] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2012. No. 4. P. 7–11. ISSN 0236-1914.
17. Turanov Kh. T., Sitnikov S. A. Matematicheskoe modelirovanie skorosti skatyvaniya vagona s sortirovochnoy gorki pod deystviem sily tyazhesti i vstrechnogo vetra [Mathematical modeling of rolling speed of rail car moving downgrade on hump under the influence of gravity and head wind] // Nauka i tekhnika transporta. 2012. No. 1. P. 38–46. ISSN 2074-9325.
18. Turanov Kh. Analytical investigation of wagon speed and traversed distance during wagon hump rolling under the impact of gravity forces and head wind // Global Journal of Researches in Engineering : A. Mechanical and Mechanics Engineering. 2014. Vol. 14. Issue 1. Version 1.0. P. 1–9.
19. Loitsyanskiy L. G., Lurye A. I. Kurs teoreticheskoy mekhaniki [Theoretical mechanics course]. T. II. Dinamika. M.: Nauka, 1983. 640 p.
20. Piskunov N. S. Differentsialnye i integralnye ischisleniya dlya vtuzov [Differential and integral calculus for technical universities]. T. 1. M.: Nauka, 1978. 456 p.
21. Bronshteyn I. N., Semendyaev K. A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov [Handbook on mathematics for engineers and students of technical universities]. M.: Nauka, 1980. 976 p.
22. Prilozhenie 14 k SMGS «Pravila razmeshcheniya i krepneniya vagonakh i konteynerakh» [Annex 14 to SMGS «Rules for Cargo Placement and Stowage in Wagons and Containers»]. M.: Planeta, 2008. 191 p.
23. Kiryanov D. V. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. SPb.: BXV-Peterburg, 2012. 432 p.

УДК 621.313

**Евгений Борисович Азаров**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Андрей Валентинович Бабкин**, старший преподаватель кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Сергей Алексеевич Румянцев**, доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая и прикладная математика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Андрей Михайлович Шихов**, ассистент кафедры «Мосты и транспортные тоннели» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА УСТОЙЧИВОСТИ ЯВЛЕНИЯ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ НА ЛАБОРАТОРНОМ ВИБРОСТЕНДЕ

**Evgeny Borisovich Azarov**, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Machinery, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,  
**Andrey Valentinovich Babkin**, Senior Lecturer, Department of Electric Machinery, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,  
**Sergey Alexeyevich Rummyantsev**, DSc in Engineering, Professor, Department of Higher and Applied Mathematics, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,  
**Andrey Mikhailovich Shikhov**, Assistant, Department of Bridges and Tunnels, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

## Experimental verification of stability of the phenomenon of vibration exciter self-synchronization on laboratory vibration table

### Аннотация

В статье приведено описание натуральных экспериментов по исследованию динамики колебательных систем, выполненных с использованием лабораторного вибрационного стенда, изложены результаты и выявленные закономерности.

**Ключевые слова:** динамика, вибротранспортирующие машины, самосинхронизация, вибровозбудитель, натуральный эксперимент, лабораторный стенд.

### Summary

The article describes field experiments investigating the dynamics of oscillatory systems, made using laboratory vibration table; the results and identified patterns are presented.

**Keywords:** dynamics, vibration conveyor machines, self-synchronization, vibration exciter, field experiment, laboratory bench.

**Р**анее в статье [1] было дано подробное техническое описание экспериментальной модели вибрационного стенда — учебно-лабораторного комплекса «Динамика вибротранспортирующих машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями» ДВМ-014. Стенд позволяет задавать возбуждающее воздействие в различных точках колебательной системы с разной интенсивностью, определять до шести перемещений движущихся масс в различных точках и направлениях, а также фазные напряжения и токи трех асинхронных электродвигателей, являющихся приводными для вибровозбудителей (ВВ).

В работах [2–6] рассмотрены результаты исследования динамики вибротранспортирующих машин с помощью математических моделей, основное внимание сосредоточено на переходных динамических процессах (неустановившихся движениях), сопровождающих пуск вибротранспортирующей машины из состояния покоя и приводящих (или неприводящих) к самосинхронизации вибровозбудителей, обеспечивающей определенный характер и направление вибрации. Синхронизации работы колебательных систем, в частности феномену самосинхронизации, посвящены работы [7, 8].

В настоящей статье дано описание натуральных экспериментов по исследованию динамики колебательных систем, проведенных с использованием лабораторного вибрационного стенда, изложены результаты и установленные закономерности.

При выполнении этой серии экспериментов пассивный рабочий орган испытательного вибростенда был жестко прикреплен к активному рабочему органу посредством металлических стоек (рис. 1). В результате получился единый активный рабочий орган увеличенной массы (одномассная конфигурация) со смещенным вверх центром масс. Также использованы три ВВ (рис. 2), два из которых расположены с левой стороны рабочего органа, образуя пару (позиции 3–2 и 6–7), а третий — с правой стороны (позиция 13–2). Первая цифра позиции ВВ обозначает его положение по горизонтали, вторая — по вертикали.

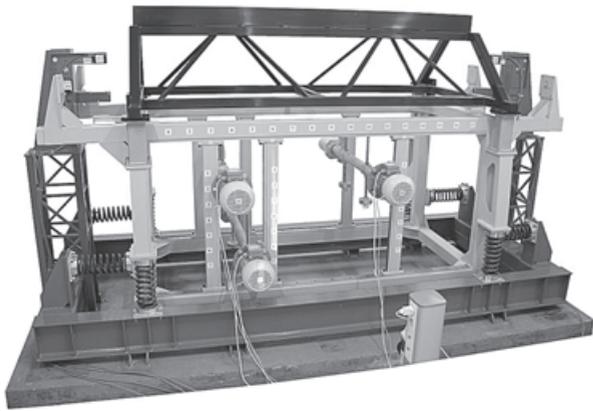


Рис. 1. Общий вид вибростенда в данной серии экспериментов

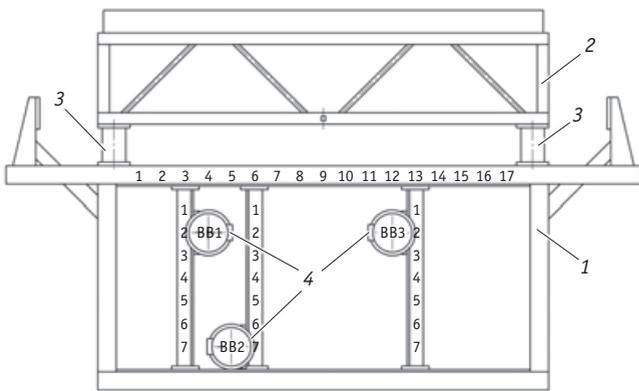


Рис. 2. Схема размещения вибровозбудителей:

- 1 — активный рабочий орган; 2 — пассивный рабочий орган;
- 3 — жесткие металлические стойки с болтовым креплением;
- 4 — вибровозбудители с приводными двигателями АИР 71 В6

После выхода на установившийся режим работы один либо два из трех приводных электродвигателей отключались. При этом в некоторых вариациях работы вибростенда продолжалось незатухающее синхронное вращение двух или всех трех независимых ВВ практически с неизменной скоростью. В ходе экспериментов исследовалось влияние направления вращения ВВ на характер колебаний вибрационного стенда и на устойчивость работы ВВ.

С помощью специализированного программного обеспечения «ДВМ измерения» при выполнении экспериментов полу-

чен набор выходных форм в виде осциллограмм, описывающих движение рабочего органа ВТМ, значений электрических параметров электродвигателей, скоростей вращения ВВ. Примеры выходных форм приведены на рис. 3 и 4.

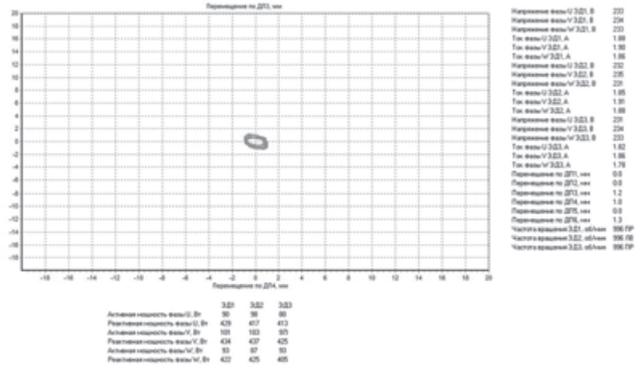


Рис. 3. Выходная форма для случая трех работающих вибровозбудителей, вращающихся в различных направлениях

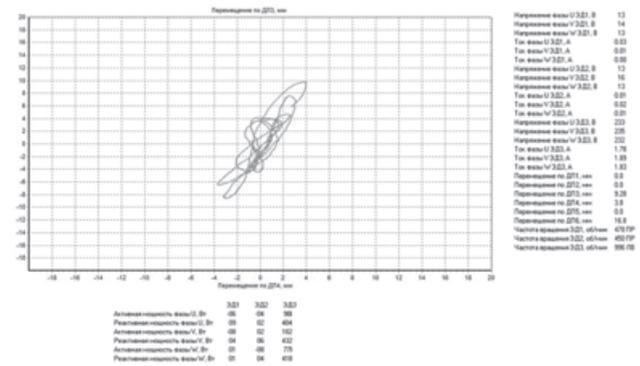


Рис. 4. Выходная форма для случая трех вибровозбудителей в переходном процессе при затухании вращения двух вибровозбудителей после отключения их двигателей

### СЕРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ № 1

Начальные условия. Все ВВ вращаются по направлению часовой стрелки. Далее одновременно отключаются два из трех ВВ в различных вариациях (рис. 5).

№ эксп.	Начальные условия			Воздействие			Результат		
	ВВ1	ВВ2	ВВ3	ВВ1	ВВ2	ВВ3	ВВ1	ВВ2	ВВ3
1.1	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	↻	↻
1.2	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	↻	↻
1.3	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	↻	↻

Рис. 5. Графическая интерпретация серии экспериментов № 1.

Здесь и далее:

- ↻ — вращение под воздействием приводного двигателя;
- ↻ — синхронное вращение при отключенном двигателе

**Результаты.** При одновременном отключении любых двух ВВ их вращение сохранялось, но несколько менялся характер колебаний — изменялся угол вибрации. Таким образом, в данной конфигурации вибростенда при установившихся колебаниях достаточно оставить включенным один ВВ для поддержания работы системы.

### СЕРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ № 2

**Начальные условия.** Два из трех ВВ в различных вариациях вращаются в противоположные стороны. Далее отключается один из ВВ (рис. 6).

№ эксп.	Начальные условия			»	Воздействие			»	Результат		
	ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3
2.1	↻	↻		»	↻	↻		»	↻	×	
2.2	↻	↻		»	↻	↻		»	×	↻	
2.3		↻	↻	»		↻	↻	»		×	↻
2.4	↻		↻	»	↻		↻	»	↻		×

Рис. 6. Графическая интерпретация серии экспериментов № 2.

Здесь и далее:

× — затухание вращения ВВ после отключения приводного двигателя

**Результаты.** При отключении одного из вращающихся ВВ его вращение постепенно затухает вплоть до полной остановки. Таким образом, в данной конфигурации вибростенда при вращении двух ВВ в разные стороны один из них не способен поддерживать вращение второго.

### СЕРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ № 3

**Начальные условия.** Два из трех ВВ, образующие пару, вращаются в одном направлении. Далее отключается один из них (рис. 7).

№ эксп.	Начальные условия			»	Воздействие			»	Результат		
	ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3
3.1	↻	↻		»	↻	↻		»	↻	↻	
3.2	↻	↻		»	↻	↻		»	↻	↻	

Рис. 7. Графическая интерпретация серии экспериментов № 3

**Результаты.** При отключении одного из вращающихся ВВ его вращение сохранялось, но при этом несколько менялся характер колебаний — изменялся угол вибрации. Таким образом, в данной конфигурации вибростенда при установившихся колебаниях достаточно оставить включенным один ВВ для поддержания вращения второго ВВ.

### СЕРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ № 4

**Начальные условия.** Два ВВ, образующие пару, вращаются в противоположные стороны, третий (одиночный) ВВ вращается по направлению часовой стрелки. Далее одновременно отключаются два из трех ВВ в различных вариациях (рис. 8).

№ эксп.	Начальные условия			»	Воздействие			»	Результат		
	ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3
4.1	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻
4.2	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻
4.3	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	×	↻	×

Рис. 8. Графическая интерпретация серии экспериментов № 4

**Результаты.** При одновременном отключении двух ВВ, образующих пару, а также при отключении второго (нижнего) ВВ из пары и одиночного ВВ вращение отключенных ВВ сохранялось, но немного менялся характер колебаний — изменялся угол вибрации. А при отключении первого (верхнего) ВВ из пары и одиночного ВВ вращение отключенных ВВ затухало. Таким образом, в данной конфигурации вибростенда после отключения ВВ возможны варианты, при которых работа системы продолжается, и вариант с затуханием колебаний системы.

### СЕРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ № 5

**Начальные условия.** Два ВВ, образующие пару, вращаются в противоположные стороны, третий (одиночный) ВВ вращается против часовой стрелки. Далее одновременно отключаются два из трех ВВ в различных вариациях (рис. 9).

№ эксп.	Начальные условия			»	Воздействие			»	Результат		
	ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3
5.1	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻
5.2	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	↻	×	×
5.3	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	×	↻	↻

Рис. 9. Графическая интерпретация серии экспериментов № 5

**Результаты.** При одновременном отключении двух ВВ, образующих пару, а также при отключении второго (нижнего) ВВ из пары и одиночного ВВ вращение отключенных ВВ затухало. При отключении же первого (верхнего) ВВ из пары и одиночного ВВ вращение отключенных ВВ сохранялось, однако немного менялся характер колебаний — изменялся угол вибрации.

Таким образом, в данной конфигурации вибростенда после отключения ВВ возможны варианты с затуханием колебаний системы и вариант, при котором работа системы продолжается, т. е. результаты этой серии экспериментов полностью противоположны результатам предыдущей серии.

### СЕРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ № 5.1

*Начальные условия.* Направление вращения ВВ аналогично предыдущей серии экспериментов. Далее попеременно отключается один из ВВ, образующих пару, затем еще один из ВВ в различных вариациях (рис. 10).

№ эксп.	Начальные условия			»	Воздействие			»	Результат		
	ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3
5.4	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	×	↻	↻
5.5	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻
5.6	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	×	×	↻
5.7	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	↻	×	×

Рис. 10. Графическая интерпретация серии экспериментов № 5.1

*Результаты.* При отключении первого (верхнего) ВВ из пары его вращение затухало, а при отключении второго (нижнего) ВВ из пары его вращение сохранялось, но несколько менялся характер колебаний — изменялся угол вибрации. Последующее отключение еще одного ВВ при уже отключенном втором (нижнем) ВВ из пары приводит к затуханию вращения обоих отключенных ВВ. Таким образом, в данной конфигурации вибростенда при отключении первого (верхнего) ВВ из пары происходит затухание его вращения, но при отключении второго (нижнего) ВВ из пары его вращение сохраняется. Отключение еще одного ВВ приводит к затуханию обоих отключенных ВВ, как и в случае их одновременного отключения.

### СЕРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ № 6

*Начальные условия.* Два ВВ, образующие пару, вращаются в одну сторону (по направлению часовой стрелки), третий (одиночный) ВВ вращается против часовой стрелки. Далее одновременно отключаются два из трех ВВ в различных вариациях (рис. 11).

*Результаты.* При одновременном отключении двух ВВ, образующих пару, их вращение затухало, а при отключении одного ВВ из пары и одиночного ВВ затухало вращение только одиночного ВВ, вращение ВВ из пары сохранялось, хотя немного менялся характер колебаний — изменялся угол вибрации. Таким образом, в данной конфигурации вибростенда одиночный ВВ не может поддерживать вращение пары ВВ, а один из ВВ пары не может поддерживать вращение второго ВВ пары, но не может поддерживать вращение одиночного ВВ.

№ эксп.	Начальные условия			»	Воздействие			»	Результат		
	ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3		ВВ1	ВВ2	ВВ3
6.1	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	↻	↻	×
6.2	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	↻	↻	×
6.3	↻	↻	↻	»	↻	↻	↻	»	×	×	↻

Рис. 11. Графическая интерпретация серии экспериментов № 6

На основании описанных выше экспериментов было установлено следующее.

1. Самосинхронизация вибровозбудителей наступала после пуска, разгона ВВ и прохождения резонанса во всех экспериментах при одновременном и последовательном пуске двух или трех ВВ, независимо от того, вращаются они в разные стороны или в одну и ту же.

2. В случае двух и трех вращающихся в одну сторону ВВ стабильно наблюдался такой феномен: если после разгона, самосинхронизации ВВ и выхода всей системы на стационарный режим движения отключался один из двух или даже два из трех электродвигателей, то отключенные ВВ продолжали вращаться сколь угодно долго. При этом их вращение оставалось синхронным, а скорость вращения снижалась очень незначительно (при отключении двух двигателей из трех — менее чем на 1%). Описанный эффект наблюдался стабильно и независимо от того, какие именно двигатели отключались, а какие оставались включенными.

3. При двух вращающихся в разные стороны ВВ отключение одного из двигателей почти всегда приводило к остановке вибровозбудителя. Исключение составлял лишь тот случай, когда центр масс всей установки находился почти точно на среднем перпендикуляре к проекции осей ВВ на перпендикулярную им плоскость. В этом случае оба ВВ продолжали синхронно вращаться в противоположные стороны, но направление вибрации рабочего органа существенно изменялось (больше чем на 90°).

4. Особый интерес представлял случай, когда два ВВ вращаются в одну сторону, а третий — в противоположную. Этот случай соответствует вибромашине, моделирование динамики которой описано в работах [4–6]. При отключении двух вращающихся в разные стороны двигателей (после выхода всей системы на стационарный режим движения) все три ВВ продолжают вращаться синхронно сколь угодно долго, т. е. наблюдается эффект, аналогичный описанному в п. 2, но с вращением в разные стороны. При отключении двух ВВ, вращающихся в одну сторону, эти ВВ останавливаются, а вращение продолжает третий ВВ, двигатель которого вращается в противоположную сторону.

Установленные в экспериментах факты представляются авторам весьма перспективными для создания новых конструкций вибротранспортирующих машин и новых энергосберегающих технологических процессов.

## Литература

1. Азаров Е. Б., Румянцев С. А., Шихов А. М. Экспериментальный вибраторный стенд для исследований динамики колебательных систем // Транспорт Урала. 2014. № 4 (43). С. 3–7. ISSN 1815-9400.
2. Румянцев С. А. Динамика переходных процессов и самосинхронизация движений вибраторных машин. Екатеринбург : УрО РАН, 2003. 134 с.
3. Румянцев С. А. Моделирование динамики переходных процессов самосинхронизирующихся вибраторных машин // Изв. вузов. Горный журнал. 2003. № 6. С. 111–118. ISSN 0536-1028.
4. Румянцев С. А., Тарасов Д. Ю., Шихов А. М. Особенности динамики вибротранспортирующих машин с тремя независимо вращающимися дебалансными вибровозбудителями // Транспорт Урала. 2010. № 3 (26). С. 47–50. ISSN 1815-9400.
5. Румянцев С. А., Тарасов Д. Ю., Шихов А. М. Оптимизация пусковых процессов вибротранспортирующих машин с тремя дебалансными вибровозбудителями // Вестник УрГУПС. 2012. № 4 (16). С. 46–52. ISSN 2079-0392.
6. Нелинейная динамика новых перспективных типов вибротранспортирующих машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями / С. А. Румянцев, Е. Б. Азаров, О. Н. Алексеева и др. // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 2. С. 302–304. ISSN 1993-1778.
7. Блехман И. И. Синхронизация динамических систем. М. : Наука, 1971. 654 с.
8. Косолапов А. Н. Адаптивное свойство вибраторных машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями // Изв. вузов. Горный журнал. 1989. № 11. ISSN 0536-1028.

## References

1. Azarov E. B., Rumyantsev S. A., Shikhov A. M. Eksperimentalnyy vibratsionnyy stend dlya issledovaniy dinamiki kolebatelnykh system [Experimental vibration bench for studying oscillatory system dynamics] // Transport of the Urals. 2014. No. 4 (43). P. 3–7. ISSN 1815-9400.
2. Rumyantsev S. A. Dinamika perekhodnykh protsessov i samosinkhronizatsiya dvizheniy vibratsionnykh mashin [Dynamics of transient processes and self-synchronization of movements of vibrating machines]. Ekaterinburg : UrO RAN, 2003. 134 p.
3. Rumyantsev S. A. Modelirovanie dinamiki perekhodnykh protsessov samosinkhroniziruyushchikhsya vibratsionnykh mashin [Modeling the dynamics of transient processes in self-synchronizing vibration machines] // Izv. vuzov. Gornyy zhurnal. 2003. No. 6. P. 111–118. ISSN 0536-1028.
4. Rumyantsev S. A., Tarasov D. Yu., Shikhov A. M. Osobennosti dinamiki vibrotransportiruyushchikh mashin s tremya nezavisimo vrashchayushchimsya debalansnymi vibrovobuditel'yami [Specifics of dynamics of vibration transport machines with three independently rotating unbalance vibration exciters] // Transport of the Urals. 2010. No. 3 (26). P. 47–50. ISSN 1815-9400.
5. Rumyantsev S. A., Tarasov D. Yu., Shikhov A. M. Optimizatsiya puskovykh protsessov vibrotransportiruyushchikh mashin s tremya debalansnymi vibrovobuditel'yami [Optimization of launch processes in vibration transport machines with three unbalance vibration exciters] // Herald of USURT. 2012. No. 4 (16). P. 46–52. ISSN 2079-0392.
6. Nelineynaya dinamika novykh perspektivnykh tipov vibrotransportiruyushchikh mashin s samosinkhroniziruyushchimsya vibrovobuditel'yami [Nonlinear dynamics of promising new types of vibration transport machines with self-synchronizing vibration exciters] / S. A. Rumyantsev, E. B. Azarov, O. N. Alekseeva i dr. // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. 2011. No. 4. Ch. 2. P. 302–304. ISSN 1993-1778.
7. Blekman I. I. Sinkhronizatsiya dinameskikh sistem [Synchronization of dynamic systems]. M. : Nauka, 1971. 654 p.
8. Kosolapov A. N. Adaptivnoe svoystvo vibratsionnykh mashin s samosinkhroniziruyushchimsya vibrovobuditel'yami [Adaptive properties of vibrating machines with self-synchronizing vibration exciters] // Izv. vuzov. Gornyy zhurnal. 1989. No. 11. ISSN 0536-1028.

*Исследования поддержаны грантом РФФИ № 14-08-00605.*

УДК 658.5.011

**Владимир Алексеевич Антропов**, доктор экономических наук, профессор кафедры «Управление в социальных и экономических системах» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Елена Николаевна Морозова**, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## ПОНЯТИЙНО-ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ АППАРАТ ФОРМИРОВАНИЯ КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ САМОРАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Vladimir Alexeyevich Antropov**, DSc in Economics, Professor, Department of Management in Social and Economic Systems, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,  
**Elena Nikolayevna Morozova**, PhD in Economics, Associate Professor, Department of Transport Economics, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

### Conceptual and terminological framework of HR self-development policy at industrial and transport enterprises

#### Аннотация

В статье исследуются проблемы научного обоснования создания стратегий формирования кадровой политики устойчивого саморазвития предприятий. Систематизируется типология видов кадровой политики, при помощи анализа выявлены и расширены функции отдела управления персоналом на основе интегрированного планирования развития человеческих ресурсов предприятий. Рассмотрены основные характеристики персонала саморазвивающейся организации. Реализация кадровой политики саморазвивающейся организации направлена на формирование корпоративной культуры, этики организации, ее ценностей, высшей из которых является качество (персонала, менеджмента, услуг, среды).

**Ключевые слова:** самоорганизация, кадровая политика, устойчивое развитие, характеристики персонала.

#### Summary

The article investigates the problems of scientific rationale for the creation of sustainable self-development HR policies of companies. HR policy typology is presented; human resource management functions based on integrated planning of corporate human resources development are identified and expanded through analysis. The main characteristics of personnel of a self-sustaining organization are analyzed. Implementation of HR policy of a self-developing organization is aimed at building corporate culture, corporate ethics, organization values, the highest of which is the quality (quality of personnel, management, services and environment).

**Keywords:** self-organization, HR policy, sustainable development, personnel characteristics.

**В** условиях выхода России из кризиса необходимо обеспечить разработку и реализацию кадровой политики устойчивой саморазвивающейся социально-экономической системы любого уровня и направления деятельности. Западные санкции обострили необходимость пересмотра промышленной политики нашего государства и принятия соответствующего Федерального закона [1]. Этот закон органически дополняется принятой несколькими днями позже Концепцией Федеральной целевой программы развития образования на 2016–2020 годы [2]. В таком тесном взаимодействии промышленности и образования заложен синергетический эффект, с помощью которого будут решаться все основополагающие проблемы. Указанные документы органично дополняются Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 г. [3] и программами развития транспорта на ближайшие годы.

Свердловская область готова к такой совместной работе. В 2014 г. принято решение о возрождении Уральской инженерной школы, проработкой концепции которой занимался Совет главных конструкторов региона.

В концепции два основных равноценных и взаимосвязанных блока — промышленный и образовательный. Они должны работать совместно на каждой стадии их реализации в едином понимании цели, решаемых задач работниками и образовательных учреждений, и предприятий. Для этого необходима единая кадровая политика, единый понятийно-терминологический аппарат.

Рассмотрим основные компоненты кадровой политики и начнем с уточнения основополагающих понятий.

Прежде всего остановимся на таком понятии, как самоорганизация, применительно к исследуемой нами проблеме.

В последние годы многие ученые, изучая территориальные общности, делают акцент на самоорганизующемся характере

их жизнедеятельности и используют в качестве теоретико-методологической основы синергетический подход [4]. На принципе социальной саморегуляции построена теория анархизма. Природной самоорганизующей составляющей человека и социума посвящены труды К. А. Альбухановой-Славской, В. В. Васильковой, А. А. Горелова [5–7] и др.

Ни территория, ни предприятие не могут развиваться сами по себе без влияния управляющих воздействий. Поэтому помимо естественного развития необходимо организующее начало любой социальной системы. Существует ряд критериев, позволяющих выделить территориальную общность из других социальных образований: территориальная концентрация населения, пространственная обособленность и локализация основных функций по воспроизводству территориальной группы населения на относительно компактной территории; относительная самодостаточность производственной и непроизводственной сфер для удовлетворения основных потребностей населения; социально-экономическая целостность, проявляющаяся в большой интенсивности внутренних связей по сравнению с внешними; однородность условий функционирования локальных общностей и порождаемая их единством специфика качественного состава населения и среды его жизнедеятельности; осознание большинством жителей своей принадлежности к данной территориальной общности, их социальная самоидентификация; наличие у членов общности общих интересов, формирующих определенные типы поведения территориальной группы; наличие элементов самоуправления [8].

Большинство исследований посвящены понятиям самоорганизации систем, самоорганизации мировой экономики или региона. В недостаточной мере проработаны вопросы самоорганизации предприятий, конкретно — вопросы кадровой политики их саморазвития. Практически все авторы среди показателей устойчивого развития предприятия называют кадровую обеспеченность, но далее эту идею не развивают.

В современных условиях стратегия и тактика самоорганизации служат залогом успешного функционирования предприятий на рынке, повышения их адаптационной способности и организационной гибкости. Устойчивое развитие предприятия во многом предопределяется степенью обеспеченности высококвалифицированными и креативными кадрами. Это обусловлено тем, что мир вступил в эпоху информационной экономики, или экономики знаний, главными факторами производства которой являются знания и интеллект человека, реализуемые в производстве. Следовательно, самоорганизация предприятия предъявляет особые требования к его интеллектуальному капиталу: способностям, уровню знаний, квалификации и мобильности персонала, уровню качества и своевременности выполнения производственных заданий, в целом к профессиональной компетенции работника.

Повышенное внимание к обсуждаемым проблемам со стороны отечественных и зарубежных ученых предопределяет актуальность затронутой тематики. В работах К. Камерона и Р. Куинна [9], Дж. Льюиса [10], А. И. Пригожина [11], Е. А. Малыгина [12], С. В. Рачек [13], В. С. Паршиной [14] и др. рассматриваются различные аспекты управления человеческим ка-

питалом предприятий. Однако до сих пор не выработан механизм управления персоналом в процессе реализации модели самоорганизации предприятий [15].

С нашей точки зрения, в современном мире глобальной конкуренции между странами — поставщиками продукции, а тем более в России сейчас, в условиях введения политики импортозамещения, устойчивое саморазвитие предприятий предопределяется внедрением комплекса мер, ориентированных на эффективную адаптацию к внешним изменениям за счет использования ключевых факторов конкурентных преимуществ, которыми обладает само предприятие. Внутренние резервы развития предприятий определяются шестью генеральными ценностями:

- эффективным управлением;
- тактикой ориентации на клиента;
- социальной направленностью;
- высоким инновационным потенциалом;
- устойчивым прибыльным ростом;
- экологической ответственностью.

Схема взаимосвязи названных ценностей служит ориентиром для разработки модели саморазвития и кадровой политики предприятий, позволяя повысить их производственно-бытовые и организационно-экономические возможности (см., например [15]). Вместе с тем в условиях сотрудничества всего коллектива предприятия бесконфликтное внедрение изменений или управляющих воздействий, обеспечивающих достижение количественных и качественных показателей результативности деятельности, является скорее исключением, чем правилом. Объяснить это можно прежде всего различиями взглядов при оценке перспектив развития со стороны руководства предприятия и его сотрудников.

Планируя управляющие воздействия, руководители предвидят новые возможности для предприятий в долгосрочной перспективе, поэтому очевидным является лоббирование интересов с их стороны. Одновременно изменения вызывают сильное сопротивление персонала (теория управления изменениями), особенно на начальных этапах выполнения проекта. Люди усматривают в предстоящих переменах угрозу для себя лично, что обычно обусловлено их неуверенностью в себе и неочевидностью последствий происходящего, страхом лишиться достигнутого (в карьере, финансах и др.). Сопротивления переменам могут иметь разную силу и интенсивность и проявляться как в форме пассивного, более или менее скрытого неприятия перемен (снижение производительности труда или желание перейти на другую работу), так и в форме активного, открытого выступления против нововведений (забастовка, собрание, явное уклонение от внедрения новшеств, игнорирование приказов руководства).

Причины сопротивлений могут обуславливаться личными и структурными барьерами. Так, в работе [16] отмечается, что «само по себе использование новой техники и программного обеспечения (как, впрочем, и прием на работу специалистов) мало что дает предприятию, если оно не меняет оргструктуру, существующие процедуры взаимодействия подразделений, стандарты предприятия, систему мотивации сотрудников. Многие проекты не приводят к запланированным целям, поскольку

нет процедур и регламентов внедрения и эффективного использования инноваций... Все опирается в обычаи, устоявшуюся деловую практику, неподготовленность людей к изменениям. Организационные, методические, психологические проблемы оказываются более сложными, чем технические, технологические, информационные... Невозможно «безнаказанно» изменять части системы... эффективно развернуть предприятие в сторону клиента, в сторону рынка можно только целиком, включая всего его «этажи» и «отсеки». Если изменения не планируются и тщательно не просчитываются, чаще всего они порождают лишь конфликты и новые проблемы» [16, с. 15].

Обобщая сказанное, отметим, что в ходе преобразований часто совершаются просчеты вследствие недостаточной подготовки менеджеров, отсутствия у большинства из них серьезного практического опыта в области управления изменениями. И эти сложности не зависят от того, какие именно изменения происходят: изменение целей деятельности, функционально-организационной структуры, обязанностей отдельных работников, их мотивации, введение новых производств, должностей или правил деятельности.

Таким образом, требования к кадровому составу с точки зрения самоорганизации предприятий должны быть четко и полно сформулированы в стратегии устойчивого развития: уже на стадии концептуальных разработок в плановом порядке должна быть учтена реакция персонала на изменения. Следовательно, в контексте управления развитием предприятия адаптация персонала к изменениям осуществляется за счет кадровых процессных инноваций.

Хорошо продуманная тактика вовлечения сотрудников в процесс разработки, реализации и внедрения новшеств в условиях саморазвития должна включать следующие аспекты:

- убеждение в необходимости перемен;
- нивелирование конфликтов;
- осуществление прорыва в знаниях;
- процесс постоянного обучения;
- самоорганизацию и самоадаптацию работников;
- укрепление корпоративного духа и формирование высокого уровня организационной культуры.

Использование кадровых процессных инноваций в практике управления позволяет достичь синергизма инноваций по перечисленным направлениям.

Рассмотрев понятия «самоорганизация» и «саморазвитие» во взаимосвязи с реализацией кадровой политики, обратимся к уточнению еще одного ведущего понятия нашего исследования — собственно понятия «кадровая политика».

В литературе по управлению человеческими ресурсами можно встретить различные определения термина «кадровая политика». Для нас кадровая политика — это система принципов и правил поведения всех субъектов процесса управления персоналом, установленная руководством и позволяющая организации наиболее эффективно достичь долгосрочных целей ее развития в существующих условиях внешней среды.

Главная цель кадровой политики — обеспечение функциональных подсистем организации мотивированным персоналом требуемого качества и количества в заданные сроки.

Любая кадровая политика состоит из следующих элементов.

1. Политика занятости, т. е. своевременное обеспечение квалифицированным персоналом, создание необходимых условий труда, обеспечение возможностей профессионально-квалификационного продвижения [17].

2. Политика обучения, т. е. формирование условий для обучения персонала.

3. Политика организации труда, т. е. увязка заработной платы со способностями, опытом, ответственностью работников, их вкладом в развитие организации.

4. Политика благосостояния, т. е. обеспечение широкого набора услуг и льгот для персонала.

5. Политика трудовых отношений, т. е. установление и поддержание организационной культуры.

К видам кадровой политики относят:

пассивную (нет программы действий, перспектив развития, только ликвидация);

реактивную (выявляются признаки плохой работы, определяется проблема);

превентивную (руководство видит проблемы, знает, как решить, есть прогноз, но нет средств для реализации);

активную (есть прогноз и средства для реализации).

Естественно, что для реализации кадровой политики саморазвития возможно использование только активной политики, открытой по отношению к внешней среде. Закрытая политика не сможет обеспечить приток необходимого количества востребованного для саморазвития организации персонала [18].

Основными принципами кадровой политики саморазвивающейся организации должны быть:

соответствие общей стратегии организации, подчиненность кадровой политики состоянию и задачам стратегического развития предприятия;

экономическая целесообразность, баланс экономических и социальных аспектов;

согласованность с региональным рынком труда по квалификации работников, уровню оплаты труда различных категорий, условиям труда, темпам развития предприятия и наличию персонала и др.;

согласованность решений администрации с трудовым коллективом (профсоюзом) по вопросам кадровой политики при условии соблюдения действующего законодательства;

уважение и доверие в трудовом коллективе;

инвестиции в развитие профессиональных компетенций сотрудников;

самотивация сотрудников на достижение высоких результатов и успеха;

индивидуализированное и адекватное активности сотрудников вознаграждение;

обеспеченность сотрудников максимально возможными социальными гарантиями с учетом развития задач предприятия.

Основные направления кадровой политики саморазвития представляют собой систему работы с персоналом в наиболее развитом виде и вытекают из следующих задач.

1. Задача учета, постоянного мониторинга и анализа состояния кадрового потенциала системы.

Процесс управления невозможен без структурированной и оперативной информации, без технологий анализа этой информации. Структура информации по кадровому потенциалу должна измениться в соответствии с решаемыми проблемами управления и включать в себя как объективно-учетные сведения (Ф.И.О., год рождения, образование, стаж и т. д.), так и оценочно-функциональные (план деловой карьеры, оценка способностей, результаты аттестации, самооценки и т. д.).

Основная проблема при решении данной задачи состоит в создании автоматизированной системы управления кадровым потенциалом, которая позволит обеспечить полный и необходимый объем обмена и анализа информации по кадровому потенциалу.

В настоящее время разработано и внедрено в практику работы кадровых служб большое количество автоматизированных систем управления: КАДРЫ, Единая корпоративная система управления трудовыми ресурсами (ЕКАСУТР), Единая корпоративная система управления финансами и ресурсами (ЕКАСУФР) и др. [19], которые в той или иной степени успешно решают кадровые задачи. Однако, с нашей точки зрения, они не в полной мере учитывают мотивационные аспекты деятельности персонала, что весьма важно для саморазвивающейся организации. На рис. 1 показано, как на уровне структурного подразделения собирается информация в базу данных для получения различных форм отчетности и определения за-

трат. Но необходимо учитывать и развивать кадровый потенциал, а не просто заполнять штатные ставки.

## 2. Кадровое планирование.

Кадровое планирование — это составление программ развития персонала для достижения целей организации. Оно опирается на анализ структурно-функциональных моделей органов управления, анализ содержания деятельности, определения стандартов профессиональной деятельности, требуемых для реализации стратегии организации.

Процессный подход основан на использовании иерархической организационной структуры производства. Такая организация управления базируется на принципе последовательного выполнения трудовых операций, т. е. трудовая задача делится на отдельные операции, а каждый работник специализируется на выполнении одной операции.

В настоящее время в связи с ужесточением конкуренции, ростом требований потребителей к качественным характеристикам продуктов и услуг появляется необходимость отслеживать все тенденции рынка, своевременно реагировать на них, экономить все виды ресурсов — от материальных до временных. Поэтому значительно увеличился объем обрабатываемой информации и, как следствие, выросли требования к качеству ее обработки, а именно к таким характеристикам, как скорость, своевременность, актуальность, достоверность [20].

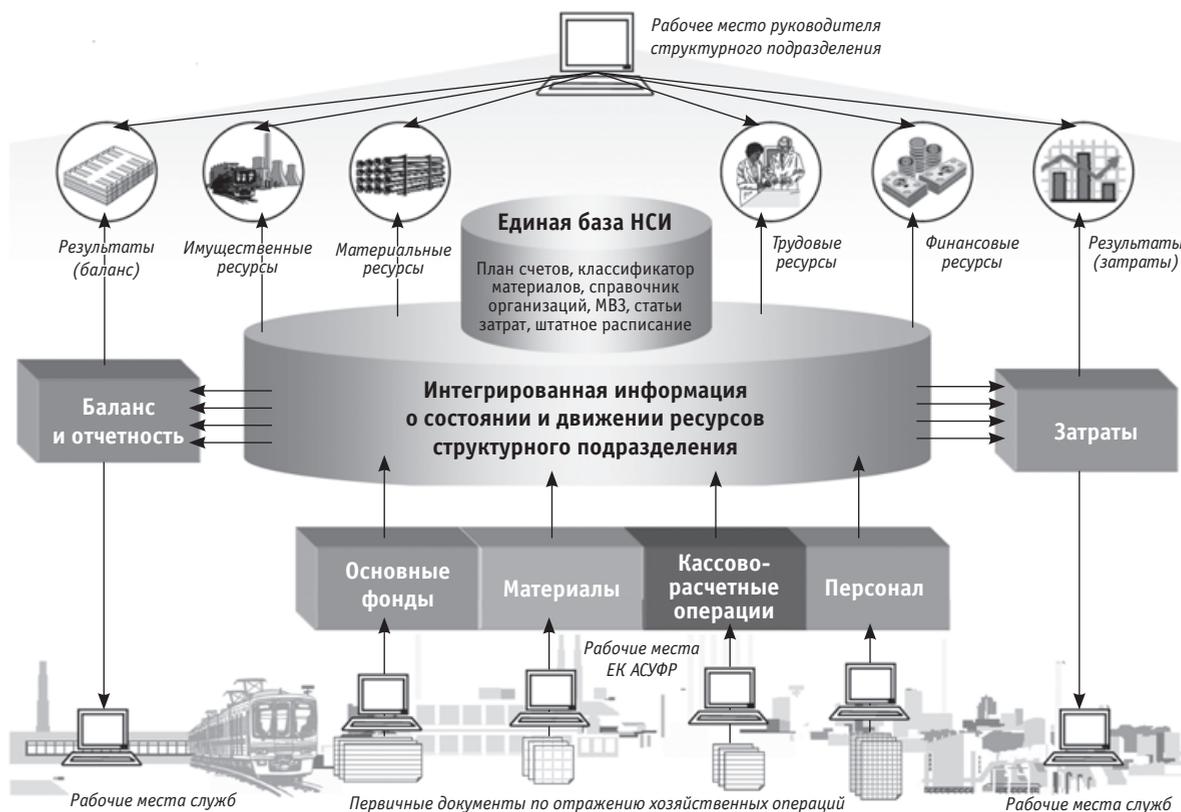


Рис. 1. ТДС ЕК АСУФР (уровень структурного подразделения ОАО «РЖД»)

Структурно-функциональные модели управления зависят от особенностей как внешней, так и внутренней среды организации. В соответствии с теорией организации необходимо согласование степени специализации структурных единиц системы и их координации, объединение усилий отдельных подсистем для достижения синергетического эффекта саморазвивающейся организации.

В эффективно работающей саморазвивающейся организации недостаточно, чтобы каждое подразделение и каждый сотрудник работали эффективно сами по себе, необходимо, чтобы весь персонал концентрировал свои усилия на решении общих целей, необходим работающий механизм интеграции и координации.

В сущности, успех кадрового планирования в значительной степени зависит от того, насколько служба управления персоналом способна интегрировать эффективное планирование персонала с плановым процессом предприятия. К сожалению, кадровое планирование подчас недостаточно адекватно связано с полным общим планированием, в чем мы неоднократно убеждались, выполняя научно-исследовательские проекты на ряде предприятий региона [21, 22].

Сосредоточенность на краткосрочных потребностях организации — естественное следствие неинтегрирования кадрового и стратегического планирования. Этот подход почти всегда ведет к возникновению проблем, которые вынуждают отдел кадрового планирования (если он есть!) сконцентрироваться на краткосрочных кризисах.

Стимулирование как процесс побуждения субъектов к деятельности для достижения поставленных целей наиболее эффективно, если в полной мере учитывается диалектическое взаимодействие интересов работников с интересами организации.

Для саморазвивающейся организации важно прежде всего стимулирование потребности сотрудников в профессиональном образовании. Саморазвитие идет наиболее активно, если потребностями личности работника в образовании совпадают с потребностями организации в ее развитии. Данный ресурс системно практически не реализован ни на одном предприятии России, а потому обучение работников идет бессистемно, точно, вне связи между желанием конкретного работника учиться и его использованием после окончания обучения. Не поддается и экономический эффект от такого обучения [23].

Даже если на предприятиях отделы кадров планируют состав персонала, применяя расчеты, проведенные экономистами, нормировщиками с учетом трудоемкости и нормативов, то эта схема не дает эффекта, так как молодое поколение, устраиваясь на работу, требует конкретных ответов на вопросы: какова будет работа, ее объем, какова заработная плата на этом рабочем месте. Следовательно, для саморазвивающейся организации кадровое планирование будет полностью эффективным лишь в том случае, если оно интегрировано в общий процесс планирования [24].

На рис. 2 показано, что функции отдела кадров современного предприятия не должны сводиться к статистическим данным и наполнению штатного расписания принятыми на работу физическими лицами. Предприятию необходимо развиваться, а следовательно, планировать развитие кадрового потенциала.



Рис. 2. Основные функции отдела управления персоналом (схема интегрированного планирования персонала)

Согласно схеме интегрированного планирования персонала, кадровая политика саморазвивающейся организации должна базироваться на стратегических планах предприятия. Фактически это означает, что цели кадровой политики должны быть производными от стратегических целей предприятия с одновременным пониманием того, какая модель личности специалиста востребована данным предприятием.

### 3. Система мотивирования и стимулирования кадров.

Сближение интересов личности и саморазвивающейся организации происходит на основе высокой корпоративной культуры органа управления, нацеленной на развитие персонала, повышение его квалификации, профессионального роста, на соответствующее затраченным усилиям материальное и моральное вознаграждение.

При разработке системы мотивации и стимулирования персонала весьма важно определить критерии и технологии отбора кандидатов на вакантную должность. Эта задача сейчас решается через ассесмент-центры. Однако мы считаем, что наиболее эффективно решать эту задачу исходя из модели работника, его профессионального стандарта, соответствующих уровней профессиональных компетенций.

### 4. Отбор, расстановка кадров, работа с резервом.

Реализация функции отбора, расстановки кадров, работы с кадровым резервом позволяет набрать наиболее квалифицированный, подготовленный, обладающий высокой культурой работы персонал.

Вся эта деятельность должна учитывать модель специалиста, предъявляемые квалификационные требования к деловым и личностным качествам персонала; формирование системы адаптации кадров; создание нормативно-правовой, научно-методической базы для работы с резервом для повышения его квалификации [25].

### 5. Обучение и подготовка кадров.

Качество работающего персонала в саморазвивающейся организации во многом определяется программами обучения. В ряде случаев обучение обязательно: при приеме на работу, при изменении характера работы (вертикально-горизонтальное перемещение), а также в случае определения недостаточности уровня профессиональной компетентности для эффективного исполнения работы.

Основная задача обучения персонала — необходимость связать подготовку и повышение квалификации с целями организации [26].

В условиях перехода всей системы обучения в России на модульный компетентностно-ориентированный подход меняется ее технология. Действующая система обучения строится на основе усвоения предметных знаний, которые не всегда системно укладываются в голове у слушателей. Однако в современных условиях необходимо усвоение не знаний, а компетенций, которое может быть реализовано только с учетом требований того рабочего места, под которое обучается слушатель [27]. Новая технология обучения требует пересмотра учебно-программной документации (учебных планов, программ), создания кейсов и т. д., как сейчас говорят, создания учебно-методического комплекса специальности, дисциплины [28]. Он может быть эффективно реализован в тесном сотрудничестве

преподавателей и руководителей организаций — такое право им теперь дано [29].

Мы считаем, что та структура, которая хочет быть устойчивой саморазвивающейся организацией, должна изменить психологию мышления трудового коллектива, поставить во главу угла своего развития конкретного человека, личность профессионала, готового и способного постоянно учиться.

Для этого в организации должны быть разработаны методики определения потребности в обучении по разным категориям персонала; сформирована система непрерывного обучения кадров; разработаны методики оценки эффективности обучения.

Как было сказано выше, саморазвивающаяся организация должна иметь собственную модель личности работника, желающего и способного постоянно учиться.

Основные характеристики персонала саморазвивающейся организации:

- активная жизненная позиция;
- креативность;
- максимальная инициативность в создании и реализации новых процессов и технологий;
- лояльность на уровне убеждений, проявляющаяся в самоидентификации с организацией;
- направленность деловой активности на достижение целей организации;
- развитое чувство долга, высокая самооценка;
- эффективный самоконтроль в профессиональной деятельности;
- стремление к саморазвитию, выработка идей, постановка целей, планирование действий по их реализации;
- стремление действовать и быть вознагражденным;
- готовность нести ответственность не только за свои действия, но и за судьбу общего дела.

Вот, например, какие требования выдвигает ООО «Светосервис-Санкт-Петербург»: «Хороший сотрудник — это прежде всего саморазвивающаяся личность. Уровень квалификации специалистов является одним из важнейших факторов успешности Группы компаний. Повышение профессионализма сотрудников — приоритетная задача руководства и основа развития бизнеса. Поэтому мы поддерживаем любую инициативу по саморазвитию и обеспечиваем условия (включая электронную библиотеку и компьютерные курсы), а также активно развиваем комплексную программу обучения, направленную на совершенствование профессиональных и личностных качеств. Стремление к личному повышению квалификации — ответственность сотрудника, поэтому мы готовы оказывать адресную социальную помощь для соответствующего обучения!»

Именно при данном подходе возможно саморазвитие организации во взаимодействии с профессиональным развитием персонала.

Для отбора таких сотрудников и их сопровождения на всех этапах деловой карьеры должна быть и соответствующая служба управления персоналом.

Основные функции службы управления персоналом саморазвивающейся организации:

долгосрочное планирование персонала;  
отбор сотрудников на основе их ценностных ориентаций и уровня профессиональной компетентности;  
обеспечение деловой оценки персонала (в том числе на основе самооценки достижений) с целью развития профессионально важных качеств;  
делегирование полномочий и ответственности;  
реализация системы индивидуальных планов профессионального развития и должностного продвижения (планов деловой карьеры);  
активное использование кадрового резерва.  
Реализация кадровой политики саморазвивающейся организации направлена на формирование корпоративной культуры,

этики организации, ее ценностей, высшей из которых является качество (персонала, менеджмента, услуг, среды). В трудовом коллективе царит взаимная социальная ответственность, клиентоориентированная позиция во взаимоотношениях с внешней средой, а также по отношению к персоналу. Высокие этические стандарты являются ценностью во взаимоотношениях.

Укажем еще на один вопрос, требующий отдельного рассмотрения, но органически связанный с проблемой формирования кадровой политики, — это проблема кадровой безопасности организации [23]. Формирующаяся в настоящее время концепция кадровой безопасности представляет собой основу устойчивого развития организации, является составной частью безопасности личности и общества.

## Литература

1. О промышленной политике в Российской Федерации : Федер. закон Рос. Федерации от 31.12.14 № 488-ФЗ (вступает в силу 30.06.15) // Российская газета. 12 янв. 2015.
2. Концепция Федеральной целевой программы развития образования на 2016–2020 годы / утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.12.14 № 2765-р [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.pravo.ru/document/view/64036519/74843648/> (дата обращения: 14.01.2015).
3. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года / утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.08 № 1734-р [Электронный ресурс]. URL: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer\\_id=5104&STRUCTURE\\_ID=704](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704) (дата обращения: 14.01.2015).
4. Город как самоорганизующаяся система : сб. материалов. Обнинск : Ин-т муниципального управления, 1997.
5. Альбуханова-Славская К. А. Стратегия жизни. М. : Мысль, 1991. 299 с.
6. Василькова В. В. Порядок и хаос в развитии социальных систем (синергетика и теория социальной самоорганизации). СПб. : Лань, 1999. 480 с.
7. Горелов А. А. Человек — гармония — природа. М. : Наука, 1990. 192 с.
8. Новокрещенов А. В. Самоорганизация территориальных общностей как основа становления и развития местного самоуправления : автореф. дис. ... д-ра социол. наук. Екатеринбург, 2003. 42 с.
9. Камерон К., Куинн Р. Диагностика и изменение организационной культуры / Пер. с англ. ; под ред. И. В. Андреевой. СПб. : Питер, 2001. 320 с.
10. Льюис Дж. Управление командой: как заставить других делать то, что вам нужно / Пер. с англ. СПб. : Питер, 2004. 160 с.
11. Пригожин А. И. Методы развития организаций. М. : МЦФЭР, 2003. 864 с.
12. Малыгин Е. А. Практико-ориентированная подготовка специалистов // Вестник УрГУПС. 2014. № 1 (21). С. 56–64. ISSN 2079-0392.
13. Рачек С. В. Методологические основы эффективного использования трудового потенциала предприятия в современных условиях : дис. ... д-ра экон. наук. М., 2001. 373 с.
14. Паршина В. С. Прогнозирование численности работников транспортной отрасли по видам деятельности // Транспорт Урала. 2014. № 4 (43). С. 13–16. ISSN 1815-9400.

## References

1. O promyshlennoy politike v Rossiyskoy Federatsii : Feder. zakon Ros. Federatsii ot 31.12.14 № 488-FZ (vstupayet v silu 30.06.15) [On industrial policy in the Russian Federation : Federal Law of the Russian Federation of 12.31.14, No. 488-FZ (effective date 30.06.15)] // Rossiyskaya gazeta. 12 yanv. 2015.
2. Kontsepsiya Federalnoy tselevoy programmy razvitiya obrazovaniya na 2016–2020 gody / utv. rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 29.12.14 № 2765-r [The concept of the Federal Target Program of Education Development for 2016–2020 / approved by order of the Government of the Russian Federation of 29.12.14 No. 2765-p]. [Electronic resource]. URL: <http://docs.pravo.ru/document/view/64036519/74843648/> (date accessed: 14.01.2015).
3. Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda / utv. rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 22.11.08 № 1734-r [Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 / approved by order of the Government of the Russian Federation of 22.11.08 No. 1734-r]. [Electronic resource]. URL: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer\\_id=5104&STRUCTURE\\_ID=704](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704) (date accessed: 14.01.2015).
4. Gorod kak samoorganizuyushchayasya sistema : sb. materialov [City as a self-organizing system : collection of materials]. Obninsk : In-t munitsipalnogo upravleniya, 1997.
5. Albukhanova-Slavskaya K. A. Strategiya zhizni [Life strategy]. M. : Mysl, 1991. 299 p.
6. Vasilkova V. V. Poryadok i kaos v razvitiy sotsialnykh sistem (sinergetika i teoriya sotsialnoy samoorganizatsii) [Order and chaos in the development of social systems (synergetics and the theory of social self-organization)]. SPb. : Lan, 1999. 480 p.
7. Gorelov A. A. Chelovek — armoniya — priroda [Man — harmony — nature]. M. : Nauka, 1990. 192 p.
8. Novokreshchenov A. V. Samoorganizatsiya territorialnykh obshchnostey kak osnova stanovleniya i razvitiya mestnogo samoupravleniya : avtoref. dis. ... d-ra sotsiol. nauk [Self-organization of territorial communities as a basis for the formation and development of local government : Synopsis of DSc in Sociology Thesis]. Ekaterinburg, 2003. 42 p.
9. Kameron K., Kuinn R. Diagnostika i izmenenie organizatsionnoy kultury [Diagnosis and corporate culture change] / Per. s angl. ; pod red. I. V. Andreevoy. SPb. : Piter, 2001. 320 p.
10. Lyuis Dzh. Upravlenie komandoy: kak zastavit drugikh delat to, chto vam nuzhno [Team management: how to get others to do what you want] / Per. s angl. SPb. : Piter, 2004. 160 p.
11. Prigozhin A. I. Metody razvitiya organizatsiy [Organization development methods]. M. : MTsFER, 2003. 864 p.
12. Malygin E. A. Praktiko-orientirovannaya podgotovka spetsialistov [Practice-oriented training] // Herald of USURT. 2014. № 1 (21). P. 56–64. ISSN 2079-0392.
13. Rachek S. V. Metodologicheskie osnovy effektivnogo ispolzovaniya trudovogo potentsiala predpriyatiya v sovremennykh usloviyakh : dis. ... d-ra ekon. nauk [Methodological basis for effective use of labor potential of the enterprise in modern environment : DSc in Economics Thesis]. M., 2001. 373 p.
14. Parshina V. S. Prognozirovanie chislennosti rabotnikov transportnoy otrasli po vidam deyatel'nosti [Forecasting the number of employees of transport industry by activity types] // Transport of the Urals. 2014. № 4 (43). P. 13–16. ISSN 1815-9400.

15. Антропов В. А., Морозова Е. Н. Кадровая политика саморазвития предприятий // Вестник УрГУПС. 2010. № 3 (7). С. 95–104. ISSN 2079-0392.
16. Бирбраер Р. А., Альтшулер И. Г. Основы инженерного консалтинга. М. : Дело, 2005. 208 с.
17. Паршина В. С., Антропов В. А. Управление внутриорганизационной карьерой руководителей и специалистов отрасли железнодорожного транспорта. Екатеринбург : УрГУПС, 2002. 149 с.
18. Антропов В. А., Колесников Б. И., Пиличев А. В. Управление персоналом на предприятиях железнодорожного транспорта: методология организации и оценка эффективности. Екатеринбург : ИЭ УрО РАН, 2002. 173 с.
19. Антропов В. А., Нестеров В. Л., Толмачев О. В. Инновационное кадровое обеспечение процессов внедрения и использования информационных технологий на предприятиях железнодорожного транспорта. Екатеринбург : УрГУПС, 2005. 176 с.
20. Давыдов А. В., Островский А. М., Пикалин Ю. А. Планирование модернизации и реконструкции предприятий транспортного машиностроения // Транспорт Урала. 2012. № 2 (33). С. 22–28. ISSN 1815-9400.
21. Анализ перспектив, направлений развития и совершенствование функционирования ГП «Дистанция гражданских сооружений Свердловской железной дороги» : отчет о НИР / УрГУПС ; исп. Антропов В. А., Нестеров В. Л., Пиличев А. В. Екатеринбург, 2004. 60 с.
22. Разработка методики определения потребности железных дорог и других филиалов компании в квалифицированных кадрах в условиях третьего этапа структурной реформы / В. А. Антропов, В. С. Паршина, Т. Б. Марущак и др. Екатеринбург : УрГУПС, 2006. 189 с.
23. Антропов В. А., Морозова Е. Н. Кадровая политика безопасного саморазвития социально-экономических систем // Вестник УрФУ. Сер. Экономика и управление. 2011. № 4. С. 126–135.
24. Строителива Т. Г. Новые подходы к разработке кадровой политики предприятий Алтайского края, определяющиеся условиями экономического роста // Управление персоналом. 2008. № 9 (187).
25. Паршина В. С. Система развития персонала в организации. Екатеринбург : ИЭ УрО РАН, 2006. 74 с.
26. Антропов В. А., Нестеров В. Л., Тимошин А. А. Научно-методические основы подготовки кадров для информатизации железнодорожного транспорта. М. : Маршрут, 2003. 91 с.
27. Методические рекомендации по исследованию и организационно-экономической оценке содержания труда и рабочего места специалиста / В. А. Антропов, В. Л. Нестеров, А. П. Макаридина и др. Екатеринбург : ИЭ УрО РАН, 2002. 42 с.
28. Разработка концепции формирования учебно-методического комплекса корпоративного университета по направлению «Наземные транспортные системы» : отчет о НИР / УрГУПС ; исп. В. Ф. Лапшин, В. А. Антропов, В. С. Паршина. Екатеринбург, 2009. 42 с.
29. Антропов В. А. Научно-методическая работа образовательных учреждений железнодорожного транспорта и филиалов Учебно-методического центра ЖДТ в условиях интеграции высшего и среднего профессионального образования // Подготовка специалистов среднего звена для железнодорожной отрасли : матер. засед. эксперт.-консульт. сов. / Под ред. В. А. Антропова. Екатеринбург, 2008. 80 с.
15. Antropov V. A., Morozova E. N. Kadrovaya politika samorazvitiya predpriyatiy [Self-development HR policy of enterprises] // Herald of USURT. 2010. № 3 (7). P. 95–104. ISSN 2079-0392.
16. Birbraer R. A., Altshuler I. G. Osnovy inzhenernogo konsaltinga [Fundamentals of engineering consulting]. M. : Delo, 2005. 208 p.
17. Parshina V. S., Antropov V. A. Upravlenie vnutriorganizatsionnoy karyeroy rukovoditeley i spetsialistov otrasli zheleznodorozhnogo transporta [Managing corporate career of railway transport managers and employees]. Ekaterinburg : USURT, 2002. 149 p.
18. Antropov V. A., Kolesnikov B. I., Pilichev A. V. Upravlenie personalom na predpriyatiyakh zheleznodorozhnogo transporta: metodologiya organizatsii i otsenka effektivnosti [Human resource management at railway transport enterprises: management and evaluation]. Ekaterinburg : IE UrO RAN, 2002. 173 p.
19. Antropov V. A., Nesterov V. L., Tolmachev O. V. Innovatsionnoe kadrovoe obespechenie protsessov vnedreniya i ispolzovaniya informatsionnykh tekhnologiy na predpriyatiyakh zheleznodorozhnogo transporta [Innovative staffing of implementation and use of IT at railway transport enterprises]. Ekaterinburg : USURT, 2005. 176 p.
20. Davydov A. V., Ostrovskiy A. M., Pikalin Yu. A. Planirovanie modernizatsii i rekonstruktsii predpriyatiy transportnogo mashinostroeniya [Planning modernization and reconstruction of transport engineering enterprises] // Transport of the Urals. 2012. № 2 (33). P. 22–28. ISSN 1815-9400.
21. Analiz perspektiv, napravleniy razvitiya i sovershenstvovanie funktsionirovaniya GP «Distantsiya grazhdanskikh sooruzheniy Sverdlovskoy zheleznoy dorogi» : otchet o NIR [Analysis of prospects, areas for development and improvement of operation of GP «Civil Structures Distance of Sverdlovsk Railway» : research report] / USURT ; isp. Antropov V. A., Nesterov V. L., Pilichev A. V. Ekaterinburg, 2004. 60 p.
22. Razrabotka metodiki opredeleniya potrebnosti zheleznykh dorog i drugikh filialov kompanii v kvalifitsirovannykh kadrakh v usloviyakh tretyego etapa strukturnoy reformy [Development of methods for determining the needs of railways and other company branches for qualified personnel under the third phase of structural reform] / V. A. Antropov, V. S. Parshina, T. B. Marushchak i dr. Ekaterinburg : USURT, 2006. 189 p.
23. Antropov V. A., Morozova E. N. Kadrovaya politika bezopasnogo samorazvitiya sotsialno-ekonomicheskikh sistem [HR policy of secured self-development of social and economic systems] // Vestnik UrFU. Ser. Ekonomika i upravlenie. 2011. № 4. P. 126–135.
24. Stroiteleva T. G. Novye podkhody k razrabotke kadrovoy politiki predpriyatiy Altayskogo kraya, opredelyayushchiesya usloviyami ekonomicheskogo rosta [New approaches to the development of HR policy of Altai Krai companies, determined by conditions for economic growth] // Upravlenie personalom. 2008. № 9 (187).
25. Parshina V. S. Sistema razvitiya personala v organizatsii [Personnel development system in a company]. Ekaterinburg : IE UrO RAN, 2006. 74 p.
26. Antropov V. A., Nesterov V. L., Timoshin A. A. Nauchno-metodicheskie osnovy podgotovki kadrov dlya informatizatsii zheleznodorozhnogo transporta [Scientific and methodological basis of training of rail transport informatization employees]. M. : Marshrut, 2003. 91 p.
27. Metodicheskie rekomendatsii po issledovaniyu i organizatsionno-ekonomicheskoy otsenke soderzhaniya truda i rabochego mesta spetsialista [Guidelines for the study of organizational and economic assessment of labor and workplace of employee] / V. A. Antropov, V. L. Nesterov, A. P. Makaridina i dr. Ekaterinburg : IE UrO RAN, 2002. 42 p.
28. Razrabotka kontseptsii formirovaniya uchebno-metodicheskogo kompleksa korporativnogo universiteta po napravleniyu «Nazemnye transportnye sistemy»: otchet o NIR [Development of the concept of creating educational complex of corporate university for «Land Transport Systems» discipline : research report] / USURT ; isp. V. F. Lapshin, V. A. Antropov, V. S. Parshina. Ekaterinburg, 2009. 42 p.
29. Antropov V. A. Nauchno-metodicheskaya rabota obrazovatelnykh uchrezhdeniy zheleznodorozhnogo transporta i filialov Uchebno-metodicheskogo tsentra ZhDT v usloviyakh integratsii vysshego i srednego professionalnogo obrazovaniya [Scientific and methodological activities of educational institutions of railway transport and branches of Railway Transport Training Center ZHDT in the context of integration of higher and secondary vocational education] // Podgotovka spetsialistov srednego zvena dlya zheleznodorozhnoy otrasli : mater. zased. ekspert.-konsult. sov. / Pod red. V. A. Antropova. Ekaterinburg, 2008. 80 p.

УДК 338.47:656 (075.8)

Наталья Борисовна Попова, доктор географических наук, профессор кафедры «Экономика транспорта» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск

## ДОРЕЛЬСОВЫЙ ЭТАП ТРАНСПОРТНОГО ОСВОЕНИЯ РЕГИОНОВ РОССИИ

Natalya Borisovna Popova, DSc in Geography, Professor, Department of Transport Economics, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk

### Pre-railway stage of transport development in Russian regions

#### Аннотация

Рассматриваются исторические особенности развития торговых путей как предтечи современной дорожной сети. В зависимости от основных товаров — «предметов транспортной работы» — показаны этапы формирования трансконтинентальных и внутрирегиональных путей сообщения. Отражена роль государства и частного капитала в транспортном освоении России и других территорий евразийского пространства.

**Ключевые слова:** сухопутный транспорт, торговые пути, транспортное освоение.

#### Summary

The historical features of the development of trade routes as forerunners of the modern road network are considered. Development stages of transcontinental and regional railways are shown in the context of basic commodities («transport operations objects»). The role of the state and private capital in the development of transport in Russia and other Eurasian regions is presented.

**Keywords:** land transport, trade routes, transport development.

Оптимальное планирование грузопотоков и управление ими, снижение факторов риска в цепи доставки товаров и реализации транспортных услуг во многом зависят от инфраструктурной обеспеченности территории, существенным элементом которой была и остается сухопутная транспортная сеть [1]. Научно-технический прогресс предопределил появление разнообразных видов транспорта, возникновение которых связано как с эволюционными, так и с революционными изменениями в транспортном производстве [2]. Исследование исторических этапов развития путей сообщения является актуальным в общенаучном и познавательном смысле.

Сухопутная транспортная сеть формировалась постепенно. Эволюция наземного транспорта наилучшим образом отражена в изменении средств передвижения — от вьючных животных (гужевой транспорт) до специальных устройств, обеспечивающих возможность использовать внешние источники энергии для перемещения (автомобильный транспорт). Однако и дороги, которые в настоящее время воспринимаются как один из основных инфраструктурных элементов автомобильного транспорта, претерпели значительные конструктивные изменения.

В древности путешественники, торговые люди, войска передвигались по суше в любых направлениях. Маршруты прокладывались как кратчайшие расстояния с учетом физико-географических условий территории, но при необходимости торговые пути или завоевательные походы осуществлялись и по бездорожью. Иными словами, физическая сила человека, домашних животных (лошади, верблюды и другие вьючные животные), проложенные посуху и укатанные дороги и волоки были прообразом первого из современных сухопутных видов транспорта — автомобильного. Начавшись в качестве гужевого, он в процессе эволюционных преобразований приобрел такие характеристики, как скорость, интенсивность и маневренность движения. Справедливости ради следует подчеркнуть, что развитие другого сухопутного транспорта — железнодорожного — от первого момента его появления до современного состояния есть результат скорее революционных преобразований в организации транспортного производства.

Транспортная сеть (или путь) и подвижной состав каждого вида транспорта — это основные элементы, формирующие единую транспортную сеть (ЕТС) и служащие условиями ее функционирования. Рассмотрим развитие сухопутных коммуникаций

в ретроспективе — от появления направлений перемещения к возникновению торговых путей и до становления современных транспортных сообщений.

Что касается направлений, то, если проанализировать весь ход общественного развития, этот термин более применим к движению древних переселенцев: европеоидов — в Азию, Северный Казахстан, на Южный Урал, монголоидов — из Северного Китая на Русскую равнину и т. д. На ранних этапах зарождения связей между Востоком и Западом (10 и более тысяч лет до н. э.) перемещение представителей евроазиатских культур (древних этносов) совершалось с целью поиска пропитания. Разделение труда было примитивным, примитивными были и транспортные пути — главным образом протоптанные тропы, и средства транспорта — катки, волокуши, носилки.

Установление торговых связей произошло позднее, в том числе и после завоевательных походов. Так возникли индо-римские торговые пути. К тому времени по миру покатались разнообразны повозки, телеги, арбы, колесницы. Как показывают археологические находки, Древний мир уже имел регулярные наземные пути, предназначенные для передвижения людей и грузов. Самый ранний из них, Лазуритовый, связывавший Западную и Среднюю Азию, действовал 6–4 тыс. лет назад. Его последовательно сменили Янтарный, Нефритовый, Северный шелковый. Дорожная сеть была не только внутри-региональной (Волжский торговый путь), но и трансконтинентальной и служила для обмена и торговли. По Янтарному торговому пути (2-е тысячелетие до н. э.) изделия из балтийского янтаря везли в страны Средиземноморья (Египет). По Нефритовому пути (2–1 тыс. до н. э.) изделия из саянского нефрита и бронзовые предметы поступали из Южной Сибири в Восточную Европу. Другим направлением Нефритового пути было восточное (в Китай), откуда обратным маршрутом перевозились изделия из шелка. Эти изделия, как и зеркала с надписями, были частью китайских товаров, которые попадали на территорию Руси (Степное Причерноморье) и по Северному шелковому пути (1-е тыс. до н. э.). Таким образом, дорожная сеть древности — это торговые пути, возникшие после завоевательных походов: в мирной жизни необходимым и созидательным был обмен продукцией.

На Руси предки этнических русских перемещались на восток и на юг, распространяя индоевропейскую культуру вплоть до Египта. Ученым удалось генетически идентифицировать ископаемые остатки древних археологических культур и установить, что наши предки обживали не только Русскую равнину — их миграции внесли вклад и в мировую цивилизацию [3, с. 4–46].

Таким образом, торговые отношения, которые связывали население Древней Руси со странами Европы и Средиземноморья и охватывали огромные пространства вплоть до Енисея, Рудного Алтая и Восточного Туркестана, распространялись благодаря торгово-транспортным сухопутным путям. Судя по летописям и аналогичным археологическим находкам (лазуритовые бусы, нефритовые застёжки, бронзовые наконечники, украшения из янтаря, шелковые ткани и т. д.), сделанным в самых разных регионах (от Британских островов до скифских курганов Алтая и междуручья Тигра и Евфрата) и датированным 6–1 тысячами лет до н. э., в торговый обмен была вовлечена

огромная территория. Действие сменявших друг друга торговых путей — прообраза сухопутных транспортных сообщений и международных транспортных коридоров — было весьма продолжительным по времени (несколько тысячелетий) и охватывало значительное евразийское пространство, в котором формировалась и древнерусская государственность.

Развитие дорог как продолжения торговых путей во всем мире связывают с развитием государственной власти. Для Руси в новое время (н. э.) наиболее важными были торговые пути из Киева к Азовскому морю (Залозный) и в Крым (Соляной), относящиеся к VIII–XII вв. Во времена монголо-татарского ига (XIII–XV вв.) пути Московского государства (Муравский шлях, тянувшийся от Перекопского перешейка по водоразделу до южных областей, и Ногайский шлях — от Нижней Волги до юго-восточных границ) использовались преимущественно кочевниками для набегов. После присоединения Новгородской республики (конец XV в.) уже Русское государство начало строить дороги. Границы государства расширились, сплавляться летом по рекам, а зимой ездить по ним же на санях по льду, «отправляя» управленческие функции, государственным наместникам стало невозможно. Возникла необходимость передвигаться по суше на большие расстояния. Поначалу это были гужевые пути, проложенные по вырубкам в лесных чащах или по деревянным настилам в топких местах. Со временем грунтовые дороги с искусственными сооружениями (мостами и переправами) приобрели облик дорожной сети.

Можно отметить, что зачатки сухопутных связей на Руси появились еще во времена подчинения золотоордынским ханам, которым, чтобы управлять «северо-восточным улусом» и рассылать гонцов за поборами (данью), требовались «ямщики, лошади и подводы». Извозом, т. е. повинностью, они облагали крестьян близлежащих поселений. Внедрив заимствованную в Китае систему «дзямов-дорог и ямджи-гонцов» на российских просторах, ордынские чиновники, по сути, дали начало «ямам на трактах», т. е. постоянным дворам на дорогах с верстовыми столбами, соединяющих важные населенные пункты [4].

Таким образом, для развития транспортной сети обретение Русским государством независимости означало государственную организацию перевозок и дорожное строительство: уже с середины XVI в. службами ямщиков ведал Ямской приказ — центральное государственное учреждение.

В допетровские времена дороги строились в основном вокруг Москвы. Они были проложены на север — до Великого Устюга, Холмогор и Архангельска, на восток — до Владимира и Нижнего Новгорода, на юго-запад — через Калугу до Киева и через Можайск до Смоленска. В северо-западном направлении дорога шла через Тверь и Вышний Волочек до Новгорода Великого. Существовали дороги до крупных святых православных мест — Троице-Сергиева монастыря, Александровской слободы и др. Все эти дороги были грунтовыми, лишь на отдельных участках их покрывали бревенчатыми настилами. Первую дорогу с твердым покрытием (шоссе из Петербурга в Москву) начали сооружать при Петре I. Впоследствии ее мостили щебнем, благоустраивали, поскольку для «экипажей с кузовом», подвешиваемым на ремнях, а затем и на деревянных рессорах, каменное покрытие было малопригодным. Именно при Петре I

дорожная сеть страны, особенно ее европейской части, была упорядочена, определены размеры ширины дороги и мостов как ее элементов; на дорогах начали устанавливать указатели — верстовые и пограничные. Особые службы вели надзор за дорогами и собирали дорожные пошлины.

За Уралом до открытия Сибирского тракта (1763 г.) большое значение в дорожной и транспортной сети имела Бабинская дорога, связывавшая европейскую Россию с Сибирью через Средний Урал. До Верхотурья она была сухопутной, затем шла по рекам Туре и Тоболу в Западную Сибирь. Эта дорога, а также предшествовавшие ей Чердынская (Пермский край) и Арская (из Казани на Соликамск и далее в Сибирь), служили сухопутными маршрутами, по которым впоследствии прошел Московско-Сибирский тракт. Его создание предварили царский указ (1689 г.), а также торговые и политические отношения между Россией и Китаем. Подписав Кяхтинский договор (1727 г.), правительство принялось за обустройство этого важного пути из Европы в Азию (1730 г.).

Прежние сухопутные дороги, волоки, водные пути уже не могли удовлетворить потребности развивающейся экономики России [5]. Но Великий тракт (протяженность от Москвы до Пекина составляла около 9 тыс. км) почти на 300 лет не только обеспечил транспортные связи и торговый обмен между странами, но и оказал большое влияние на развитие Сибири в целом и многих ее городов — Тюмени, Тобольска, Тары, Каинска, Колывани, Томска, Енисейска, Иркутска, Верхнеудинска, Нерчинска, Кяхты. В начале XIX в., когда в Западной Сибири тракт пошел южнее, торгово-обменные транспортные пути придали развитие Ялуторовску, Ишиму, Омску, а затем Ачинску и Красноярску. В Томске память о Сибирском тракте до сих пор сохранилась в названиях двух улиц — Иркутского тракта, ведущего на восток, и Московского, который ведет на юго-запад к месту бывшей переправы (теперь это мост через реку Томь).

Более 200 лет действовал Великий чайный путь, пролежавший между Россией (от Москвы, Нижнего Новгорода через города Среднего Урала, юга Сибири до Селенгинска и Кяхты), Монголией (Урга) и Китаем (Калган, Пекин). В некоторых историко-географических источниках Великим чайным путем называют только восточную часть тракта — из Сибири до Калгана. Путь начинался в городе Ухань (Китай) и шел к российско-китайской границе. На российской территории он имел ответвления в разные губернии, где работало несколько ярмарок (в Западной Сибири — Сургутская, Тарская, Мангазейская, в Восточной Сибири — Кяхтинская, Нерчинская, Верхнеудинская, Иркутская, Енисейская, Туруханская). Обменными товарами (импорт из Китая), кроме чая, были шелковые и хлопчатобумажные ткани, фарфор, золото, серебро, жемчуг. Из России в Китай и Монголию везли пушнину, железные изделия, медь, краску, пшеницу, бакалею, скобяной товар, зеркала, ковры, мыло, стеариновые свечи. Караваны организовывались раз в три года. Их движение в одну сторону длилось год, еще несколько месяцев занимала распродажа русских и закупка китайских товаров. Так продолжалось почти до конца XIX в., пока открытие Суэцкого канала (1869 г.) и строительство Транссибирско-

го железнодорожного пути (1891–1916 гг.) не положили конец караванной торговле. Вместе с тем преемственность этих путей и их вклад в развитие транспортной системы заключается в том, что многие участки Чайного пути XVI–XIX вв. превратились в действующие автомобильные и железнодорожные магистрали и вошли в общую сеть путей сообщения, связывающую регионы Европы и Азии.

Транспортные пути в азиатской России вплоть до XX в. представляли собой наезженные (торные) дороги (не шоссе!). В европейской части уже в начале XIX столетия появились шоссе, светофоры, дорожная разметка. Но строительство дорог с покрытием шло медленно: в 1898 г. было около 25 тыс. верст (26,2 тыс. км) шоссе и других мощных (щебень, гравий, булыжник) дорог. Сеть грунтовых дорог составляла чуть более 200 тыс. верст (216 тыс. км). Проселочных дорог в 72 губерниях европейской России числилось свыше миллиона верст [6, с. 355]. Дороги государственного значения, находившиеся в ведении министерства путей сообщения (МПС), в основном имели щебеночное покрытие, остальные были грунтовыми. Главные дороги того времени: Москва — Санкт-Петербург, Москва — Нижний Новгород, Москва — Смоленск — Брест-Литовск.

Кроме государственных ассигнований (около 13 млн руб. ежегодно вплоть до Первой мировой войны), средства на строительство и обустройство дорог (дорожные капиталы) аккумулировали земства. По 34 земским губерниям общая сумма составляла чуть более 6 млн руб. Еще 1,2 млн руб. на «содержание в исправности дорог, мостов и переправ» ежегодно выделяли сельские общины [6, с. 355]. Для сравнения: средства, направленные в это же время на устройство общей сети железных дорог, составили 3807 млн руб., на 95% это были затраты правительства [6, с. 360].

Накануне Первой мировой войны в ряде губерний европейской России было выполнено «исследование всех грунтовых дорог... для выработки плана расширения и улучшения сети...» [6, с. 360]. Результаты были переданы в государственные органы, и МПС подготовило программу создания в стране «каркаса основных магистралей для последующего развития обширной сети шоссе и дорог», осуществить которую помешали революция и Гражданская война.

Таким образом, в то дорельсовое время сухопутные транспортные пути России представляли собой преимущественно отдельные объекты региональной инфраструктуры. Слабое развитие сети и дорожная необустроенность обуславливали хозяйственную отсталость и бедность населения страны, особенно ее периферийных территорий. Производство товаров и услуг во многом носило очаговый характер, такими же были и рынки сбыта.

Понадобилось еще столетие, чтобы сухопутные транспортные пути (шоссе, грунтовые тракты, большаки, щебеночные шоссе, другие дороги с твердым покрытием) стали частью ЕТС России и функционировали согласованно с региональными социально-экономическими системами в рамках логистической товаропроводящей сети.

## Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.11.08 № 1734-р // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2008. № 50.
2. Эволюция наземных видов транспорта и условий научно-технического прогресса : монография / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Дмитренко. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2011. 210 с.
3. Баязин В. Н. Неофициальная история России. М. : ОЛМА Медиа Групп, 2011. 448 с.
4. Ключевский В. О. Русская история : специальное издание. М. : ОЛМА Медиа Групп, 2011. 400 с.
5. Попова Н. Б., Чикинова М. С. Роль водного транспорта в формировании геополитического и экономического пространства России // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1–2. С. 25–28. ISSN 2071-3827.
6. Россия. Энциклопедический словарь / Издатели Ф. А. Брокгауз и И. А. Ефрон. СПб., 1898. Репринт. Л. : Лениздат, 1991. 922 с.

## References

1. Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda : rasporyazhenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 22.11.08 № 1734-r [Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 : order of the Government of the Russian Federation of 22.11.08 No. 1734-r] // Sobr. zakonodatelstva Ros. Federatsii. 2008. № 50.
2. Evolyutsiya nazemnykh vidov transporta i usloviy nauchno-tekhnicheskogo progressa : monografiya [Evolution of land transport types and conditions of scientific and technological progress : monograph] / Pod red. d-ra techn. nauk, prof. A. V. Dmitrenko. Novosibirsk : Izd-vo SGUPS, 2011. 210 p.
3. Balyazin V. N. Neofitsialnaya istoriya Rossii [Unofficial history of Russia]. M. : OLMA Media Grupp, 2011. 448 p.
4. Klyuchevskiy V. O. Russkaya istoriya : spetsialnoe izdanie [Russian history : the special edition]. M. : OLMA Media Grupp, 2011. 400 p.
5. Popova N. B., Chikinova M. S. Rol vodnogo transporta v formirovaniy geopoliticheskogo i ekonomicheskogo prostranstva Rossii [The role of water transport in the formation of geopolitical and economic space of Russia] // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka. 2014. № 1–2. P. 25–28. ISSN 2071-3827.
6. Rossiya. Entsiklopedicheskiy slovar [Encyclopedic dictionary] / Izdateli F. A. Brokgauz i I. A. Efron. SPb., 1898. Reprint. L. : Lenizdat, 1991. 922 p.

УДК 656.025

Дмитрий Алексеевич Брусянин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНОЙ МАРШРУТНОЙ СЕТИ ПАССАЖИРСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

Dmitriy Alexeyevich Brusyanin, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Railway Construction and Railway Track, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

### Approach to the development of optimal public passenger transport route network at regional level

#### Аннотация

В статье предложен подход к формированию оптимальной маршрутной сети. Он основан на выборе такой ее конфигурации, при которой, с одной стороны, обеспечивается экономический эффект для компаний-перевозчиков, а с другой — социальный эффект — транспортная доступность территорий региона.

**Ключевые слова:** маршрутная сеть, оптимальность, пассажиропоток, конфликтующие стороны, интегральная оценка.

#### Summary

This paper proposes an approach to the development of an optimal route network. It is based on network configuration which on the one hand, provides economic benefits for carriers, and on the other hand generates social impact — improved transport accessibility of the region.

**Keywords:** route network, optimality, passenger traffic, conflicting parties, integral assessment.

**М**аршрутная сеть пассажирского общественного транспорта должна соответствовать взаимосвязанным, но в то же время противоречивым требованиям: обеспечивать, с одной стороны, транспортную доступность территорий региона (социальный эффект), а с другой — рентабельность перевозочного процесса (экономический эффект), влияющую на качество транспортных услуг (безопасность, надежность и др.) и рациональное использование бюджетных средств (рис. 1).



Рис. 1. Участники перевозочного процесса с противоположными интересами

Другими словами, маршрутная сеть должна обеспечивать [1–3]:

минимальный (рекомендуемый) коэффициент использования вместимости транспортных средств (экономический эффект для компаний-перевозчиков);

транспортную доступность территорий региона (социальный эффект для населения);

рациональное использование бюджетных средств, направляемых на покрытие убытков ввиду государственного регулирования тарифов (государственный эффект);

выполнение технико-технологических параметров в работе железнодорожного и автомобильного транспорта.

Маршрутную сеть, которая удовлетворяет перечисленным требованиям, будем называть оптимальной, т. е. наилучшей из множества возможных вариантов.

Поиск оптимального варианта в математике — это нахождение минимума или максимума целевой функции на некотором множестве, ограниченном набором условий. В отличие от математики современная теория оптимального управления (выбора и принятия решений) занимается методами решения задач поиска наилучших вариантов из всех допустимых.

Соответственно постановка задачи по формированию оптимальной маршрутной сети означает определение следующих параметров.

1. Множество допустимых вариантов маршрутной сети  $U$ . Допустимость — это набор ограничений:

технико-технологических (пропускные способности перегонов, станций, автовокзалов, технология организации движения транспортных средств и др.);

социальных — удовлетворение потребностей населения в перевозках (например, освоение суточного пассажиропотока).

2. Целевая функция — количественная оценка, характеризующая каждый вариант маршрутной сети.

3. Критерий выбора  $\Phi$ . При решении данной задачи выбрана максимизация эффективности. В качестве критерия  $\Phi$  может быть взят коэффициент использования вместимости транспортного средства (ТС) на железнодорожном и автомобильном транспорте.

Тогда решением задачи оптимизации маршрутной сети является поиск среди допустимых вариантов такого, который имеет максимальную оценку  $\Phi$ :

$$\Phi \rightarrow \max.$$

На рис. 2 показана область неулучшаемых Парето-оптимальных вариантов (варианты 1, 2, 4), при которых достигаются максимальные коэффициенты использования вместимости подвижного состава на автомобильном и железнодорожном транспорте.

Необходимо отметить, что обоснование критерия  $\Phi$ , отражающего качество транспортного обслуживания населения региона, представляет собой отдельную перспективную задачу.

При поиске оптимальной маршрутной сети важным является отбор допустимых вариантов из множества  $U$ . Формирование маршрутной сети предлагаем представить как процесс улучшения существующей маршрутной сети. То есть в данном случае множество допустимых вариантов образуют варианты, содержащие отклонение от действующей в регионе маршрутной сети.

Иными словами, возникают новые исходные данные для отбора допустимых вариантов маршрутной сети, а следовательно, необходимо скорректировать и решение оптимизационной задачи — заново найти вариант с максимальным зна-

чением целевой функции. Такой оптимизационный процесс представлен на рис. 3.

Отметим, что каждый последующий вариант должен иметь более высокий интегральный показатель  $\Phi$ , характеризующий качество транспортного обслуживания населения региона.

Процесс формирования оптимальной маршрутной сети регулятором (например, органом исполнительной власти региона) можно представить как последовательность действий по ее улучшению (рис. 4).

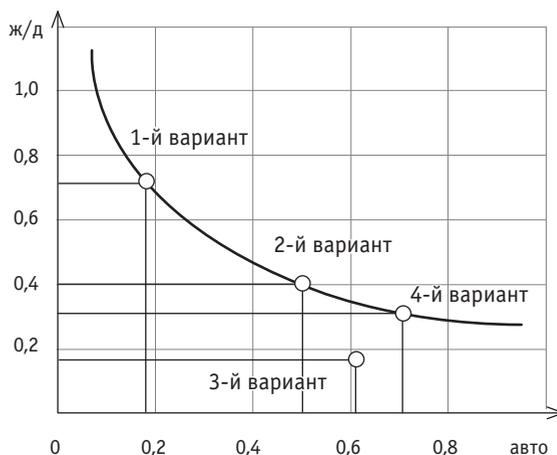


Рис. 2. Парето-оптимальность для двух видов транспорта (автомобильного и железнодорожного)



Рис. 3. Процесс формирования оптимальной маршрутной сети



Рис. 4. Этапы формирования оптимальной маршрутной сети

Рассмотрим подробнее этапы формирования маршрутной сети.

**Первый этап:** определение множества допустимых вариантов маршрутной сети. В работах [2, 4] предложено формировать варианты маршрутов с учетом суммарного среднесуточного пассажиропотока и минимальной (рекомендуемой) среднесуточной наполняемости ТС при заданных технико-технологических ограничениях на железнодорожном и автомобильном транспорте.

**Второй этап (внедрение):** разработка и реализация мероприятий по внедрению варианта маршрутной сети. Например, для Свердловской области этот этап выполняется в соответствии с законом от 27.12.10 № 127-03 [5]. Мероприятия направлены на открытие, изменение и закрытие маршрутов регулярных пассажирских перевозок железнодорожным и автомобильным транспортом на территории региона.

**Третий этап:** мониторинг и контроль реализованных мероприятий по внедрению новой маршрутной сети. Для Свердловской области порядок проведения мониторинга в сфере организации транспортного обслуживания населения установлен законом от 27.12.10 № 127-03 [5].

**Четвертый этап (корректирующие действия):** оценка внедренных изменений в маршрутную сеть и разработка корректирующих мероприятий, направленных на последующее улучшение показателей качества транспортного обслуживания населения в регионе. Схематично процесс формирования оптимальной маршрутной сети показан на рис. 5.

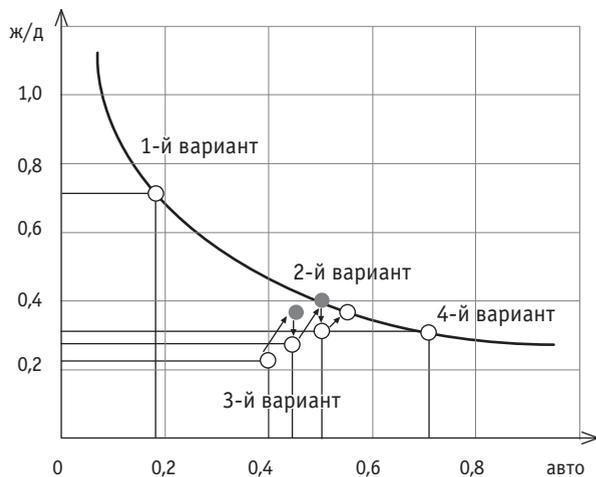


Рис. 5. Поэтапное улучшение коэффициента использования вместимости транспортного средства:

- — расчетное значение;
- — фактическое значение

При формировании оптимальной маршрутной сети регулятор может использовать следующие принципы.

Первый принцип предполагает саморегулирование транспортного комплекса, т. е. формирование и последующую корректировку маршрутной сети де-факто осуществляют хозяйствующие субъекты — компании-перевозчики и компании — владельцы транспортной инфраструктуры. Этот принцип основан на минимальном организационно-распорядительном воздействии на маршрутную сеть со стороны исполнительных органов власти и предусматривает, что перевозчики самостоятельно определяют маршруты исходя из потребного (в том числе потенциального) пассажиропотока и своих технико-технологических и экономических возможностей. В частности, маршрутная сеть Свердловской области сформирована именно по такому принципу.

По результатам анализа существующей маршрутной сети на примере Свердловской области можно констатировать, что саморегулирование позволяет сформировать маршрутную сеть, близкую к оптимальной: массовые перевозки выполняются железнодорожным транспортом (утренние и вечерние всплески), дневной пассажиропоток преимущественно осваивается автомобильным.

Недостатки действующей на территории Свердловской области маршрутной сети состоят в следующем.

Во-первых, не удалось увязать работу железнодорожного и автомобильного транспорта, поскольку каждый перевозчик руководствуется собственными интересами. В результате снизилась наполняемость ТС и, как следствие, доходность перевозочного процесса. В целом это неблагоприятно сказалось на качестве транспортных услуг (в том числе на безопасности и надежности), оказываемых населению.

Во-вторых, произошло увеличение объема дотаций из бюджета Свердловской области, направленных на возмещение выпадающих доходов в связи с тарифным регулированием пригородного железнодорожного сообщения.

В-третьих, наметилась тенденция ухода перевозчиков с убыточных, но социально значимых маршрутов на наиболее экономически привлекательные направления. Это снизило транспортную доступность отдельных территорий региона.

В-четвертых, дальнейшее следование принципу саморегулирования не позволило достичь синергетического эффекта при повышении качества транспортных услуг для населения из-за отсутствия системного формирования маршрутной сети.

Второй принцип состоит в реализации органом исполнительной власти организационно-распорядительного воздействия при формировании единой оптимальной маршрутной сети. При помощи этого принципа можно во многом устранить недостатки, характерные для маршрутной сети, сформированной по первому принципу.

В заключение отметим, что предложенный подход к формированию маршрутной сети общественного транспорта региона позволяет находить компромиссные решения, поэтапно улучшая качество транспортного обслуживания населения.

## Литература

1. Брусянин Д. А., Казаков А. Л., Маслов А. М. Оптимизация региональной маршрутной сети междугородных и пригородных пассажирских перевозок с использованием логистических принципов // Транспорт Урала. 2012. № 1 (32). С. 106–109. ISSN 1815-9400.
2. Методика формирования оптимальной маршрутной сети регулярного пассажирского транспорта / С. В. Сизый, С. В. Вихарев, Д. А. Брусянин и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2013. № 3 (36). С. 73–79. ISSN 1815-588X.
3. Borndorfer R., Grottschel M., Lobel A. Optimization of Transportation Systems [Электронный ресурс]. URL: opus4.kobv.de/opus4-zib/files/352/SC-98-09.pdf (дата обращения: 18.02.2015).
4. Брусянин Д. А., Сай В. М., Вихарев С. В. Обоснование транспортных средств на маршрутной сети регулярных автомобильных и железнодорожных пассажирских перевозок // Вестник УрГУПС. 2013. № 1 (17). С. 50–64. ISSN 2079-0392.
5. Об организации на территории Свердловской области регулярных пассажирских перевозок автомобильным, железнодорожным, водным и воздушным транспортом пригородного и межмуниципального сообщения : закон Свердловской области от 27.12.10 № 127-ОЗ [Электронный ресурс]. URL: http://www.fpa.su/regzakon/sverdlovskaya-oblast/zakon-sverdlovskoy-oblasti-ot-27-dekabrya-2010-g-n-127-oz-ob-organizatsii-na-territorii-sverdlovskoy-oblasti-regulyarnich-passazhirskich-perevozok-avtomobilnim-zheleznodorozhnim-vodnim-i-vozdushnim-transportom-prigorodn/ (дата обращения: 18.02.2015).

## References

1. Brusyanin D. A., Kazakov A. L., Maslov A. M. Optimizatsiya regionalnoy marshrutnoy seti mezhdugorodnykh i prigorodnykh passazhirsikh perevozok s ispolzovaniem logisticheskikh printsipov [Optimization of regional route network of intercity and suburban passenger services using logistics principles] // Transport of the Urals. 2012. № 1 (32). P. 106–109. ISSN 1815-9400.
2. Metodika formirovaniya optimalnoy marshrutnoy seti regulyarnogo passazhirsikogo transporta [A method for development of optimal route network of regular passenger transport] / S. V. Sizyy, S. V. Vikharev, D. A. Brusyanin i dr. // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya. 2013. № 3 (36). P. 73–79. ISSN 1815-588X.
3. Borndorfer R., Grottschel M., Lobel A. Optimization of Transportation Systems [Electronic resource]. URL: opus4.kobv.de/opus4-zib/files/352/SC-98-09.pdf (date accessed: 18.02.2015).
4. Brusyanin D. A., Say V. M., Vikharev S. V. Obosnovanie transportnykh sredstv na marshrutnoy seti regulyarnykh avtomobilnykh i zheleznodorozhnykh passazhirsikh perevozok [Justification of vehicles on regular road and railway passenger transport network] // Herald of USURT. 2013. № 1 (17). P. 50–64. ISSN 2079-0392.
5. Ob organizatsii na territorii Sverdlovskoy oblasti regulyarnykh passazhirsikh perevozok avtomobilnym, zheleznodorozhnym, vodnym i vozdushnym transportom prigorodnogo i mezhmunitsipalnogo soobshcheniya : zakon Sverdlovskoy oblasti ot 27.12.10 № 127-OZ [Organization of regular suburban and intercity passenger transport by road, railway, water and air transport in Sverdlovsk Oblast : Law of Sverdlovsk Oblast of 27.12.10 No. 127-OZ]. [Electronic resource]. URL: http://www.fpa.su/regzakon/sverdlovskaya-oblast/zakon-sverdlovskoy-oblasti-ot-27-dekabrya-2010-g-n-127-oz-ob-organizatsii-na-territorii-sverdlovskoy-oblasti-regulyarnich-passazhirskich-perevozok-avtomobilnim-zheleznodorozhnim-vodnim-i-vozdushnim-transportom-prigorodn/ (date accessed: 18.02.2015).

УДК 681.518.5+656.25

Дмитрий Викторович Ефанов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС)

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Dmitriy Viktorovich Efanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Railway Automatics and Telemechanics, Petersburg State Transport University (PSTU)

### Development aspects of functional control systems of railway automation and telemechanics devices

#### Аннотация

В статье рассматриваются направления развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Определены пути решения ключевых проблем, связанных с этими системами, заключающиеся в совершенствовании методов обработки и представления диагностической информации пользователю: описан подход к автоматизации анализа диагностической информации, основанный на составлении логико-временных моделей функционирования устройств ЖАТ, а также даны рекомендации по модернизации технологии представления диагностической информации в системах функционального контроля.

**Ключевые слова:** железнодорожная автоматика и телемеханика, техническое диагностирование, мониторинг, функциональный контроль, прогнозирование состояния, логический анализ, анимация схем.

#### Summary

The paper describes the areas of development of functional control systems of railway automation and telemechanics devices (RAT). The ways to address the key problems associated with these systems are defined, consisting in improvement of diagnostic information processing methods and its presentation to the user: approach to automation of diagnostic information analysis is described, based on compilation of logic-temporal models of operation of RAT devices, as well as recommendations are provided to improve the technology used to present diagnostic information in functional control systems.

**Keywords:** railway automation and telemechanics, technical diagnostics, monitoring, functional control, status forecasting, logical analysis, animation of schemes.

#### ВВЕДЕНИЕ

Существует большое разнообразие методов и средств повышения надежности и безопасности функционирования систем ЖАТ, основанных на принципах обеспечения безотказности, отказоустойчивости и безопасного поведения при отказах [1–3]. Один из важных подходов к организации высоконадежных систем ЖАТ — создание и эксплуатация систем технического диагностирования и мониторинга их состояния, или систем функционального контроля [4]. Эти системы являются развитием систем диспетчерского контроля (ДК), которые начали внедряться на советских железных дорогах в середине XX столетия. В те годы существенным достижением была организация функционального контроля дискретных параметров устройств ЖАТ. Развитие микроэлектронной и микропроцессорной техники позволило к концу 1990-х гг. внедрить устройства автоматического измерения аналоговых параметров объектов ЖАТ, в основном токов и напряжений, в различных схемных узлах. Благодаря этому современные системы функционального контроля устройств ЖАТ стали мощными информационными системами, облегчающими процесс эксплуатации и обслуживания технических средств управления.

Системы функционального контроля устройств ЖАТ решают все задачи, которые ставятся в технической диагностике: контроль технического состояния, локализация дефекта и прогнозирование дальнейших изменений состояний элементов и систем [5]. Мониторинг ответственных параметров устройств ЖАТ позволяет определять их предотказные состояния [6]. А это, в свою очередь, дает возможность предотвратить отказы, что снижает риск нарушения графика перевозочного процесса, в том числе безопасности его реализации.

Несмотря на явные достоинства, системы функционального контроля устройств ЖАТ имеют ряд существенных недостатков [7]. Прежде всего к таковым следует отнести недостаточную полноту и глубину технического диагностирования. Кроме того, подавляющее большинство технических решений по подключению измерительных контроллеров в схемные узлы ЖАТ дают только косвенную информацию. Так, в релейных системах

ЖАТ дискретная информация о поездном положении практически полностью снимается с контактов ламп пультов-табло, поэтому осуществляется лишь частичный контроль (например, контроль разрешающих показаний светофоров без разделения на различные сигнальные показания и, следовательно, без определения состояния соответствующих сигнальных комплектов на самом светофоре). Еще один недостаток систем функционального контроля устройств ЖАТ связан с необходимостью выполнения большой ручной работы по анализу диагностической информации, при этом уровень автоматизации процесса крайне низок. Сотрудники дистанций сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), а также центров мониторинга и ситуационных центров непрерывно анализируют диагностическую информацию, поступающую от систем функционального контроля. Данные мониторинга представляются хотя и в удобном виде, но все же требуют достаточно трудоемкой аналитической работы (рис. 1).

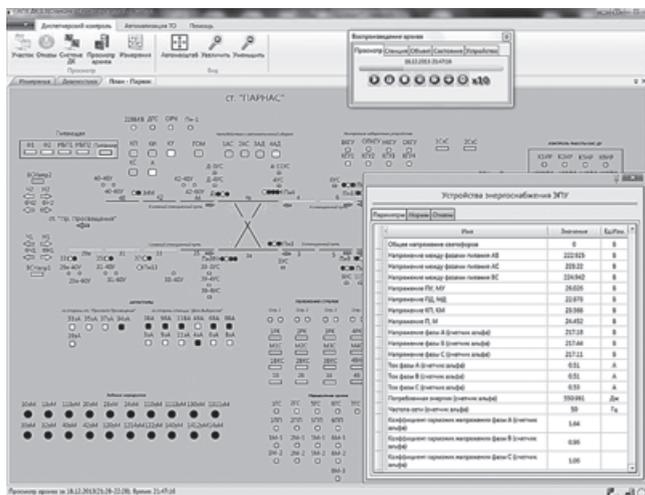


Рис. 1. Технологическое окно АРМ системы функционального контроля [8]

Перспективы развития систем функционального контроля устройств ЖАТ связаны с совершенствованием измерительных контроллеров (а также расширением полигона их внедрения) и методов обработки диагностической информации, с созданием подсистем поддержки принятия решений, которые в автоматическом режиме могли бы давать информацию о текущем состоянии и прогнозируемых изменениях. Именно эти вопросы и поднимаются в настоящей статье.

### 1. ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОРРЕКТНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Как отмечалось выше, один из недостатков современных систем функционального контроля устройств ЖАТ — низкий уровень автоматизации процесса анализа диагностической информации. Поэтому в дистанциях СЦБ, центрах мониторинга и ситуационных центрах дирекций инфраструктуры железных дорог требуется большое количество технического персонала, решающего эту задачу. Логика мышления человека может быть за-

писана на программном языке. Остановимся на первой возникающей при этом задаче, связанной с автоматизацией процесса анализа корректности функционирования устройств ЖАТ. Ее решение рассмотрим на частном примере проверки правильности работы неразветвленных рельсовых цепей метрополитена при использовании для анализа дискретной диагностической информации.

Пусть системой функционального контроля диагностируется состояние двух датчиков — свободности секции (датчик П) и замыкания секции в маршруте (датчик З). К примеру, система функционального контроля «Аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля» (АПК-ДК), разработанная на кафедре «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС, диагностирует в Петербургском метрополитене именно эти параметры [8]. Логика работы системы функционального контроля описана в табл. 1. Каждый из дискретных датчиков может находиться в четырех состояниях: 0 — низкий уровень, 1 — высокий уровень, 2 — попеременная смена значений 0 и 1 (соответствует фактически миганию) и 3 — неопределенное значение. Значимыми в данном случае являются состояния 0 и 1, а два других объединены знаком х. На основании значений, поступающих непрерывно с датчиков, в системе функционального контроля идет вывод в установленной цветовой гамме соответствующей смысловой нагрузки на АРМ электромеханика и технолога дистанции СЦБ.

Таблица 1

Дискретные параметры рельсовой цепи

№	П	З	Логическое значение
0	0	0	Секция занята и замкнута
1	0	1	Секция занята и не замкнута
2	1	0	Секция свободна и замкнута
3	1	1	Секция свободна и не замкнута
4	х	х	Неисправность системы функционального контроля

К объекту диагностирования — рельсовой цепи (РЦ) — справа и слева примыкают смежные рельсовые цепи (РЦ<sub>1</sub> и 1\_РЦ соответственно). Рассмотрение других типов рельсовых цепей и случаев их расположения опустим (процесс автоматизации для них аналогичен). Таким образом, для оценки корректности работы данной рельсовой цепи достаточно анализировать ее работу и работу смежных рельсовых цепей без проверки работы всех остальных рельсовых цепей на станции или перегоне (рис. 2). Каждая из рельсовых цепей дает двузначный логический вектор значений от датчиков  $\Pi_i$  и  $З_i$ , т. е.  $\langle \Pi_i, З_i \rangle$ . Объединяя все три вектора в один вектор  $\langle \Pi_1, З_1, \Pi_2, З_2, \Pi_3, З_3 \rangle$ , получим некоторый информационный вектор длины  $m = 6$ , по набору значений в разрядах которого можно судить о наличии той или иной логической ситуации, возникающей в работе диагностируемой рельсовой цепи. Под логической ситуацией здесь понимается событие, связанное с изменением состояний устройств автоматики при их взаимном

функционировании: корректная (нормальная) работа рельсовой цепи или наличие неисправности рельсовой цепи (список логических ситуаций может быть и расширен за счет учета аналоговых параметров устройств автоматики [9, 10]).

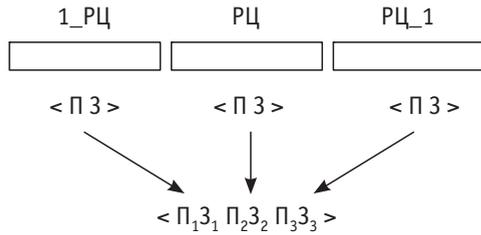


Рис. 2. Выбор объектов диагностирования и кодирование данных

По логике смены значений в векторе  $\langle П_1 З_1 П_2 З_2 П_3 З_3 \rangle$  с течением времени можно судить о правильности работы рельсовой цепи. При этом, поскольку длина информационного вектора  $m = 6$ , существует  $2^6$  различных векторов, соответствующих логическим ситуациям, присущим объекту диагностирования, а также один вектор, которому соответствует набор значений  $\langle x x x x x x \rangle$ , присущий нарушениям в работе

системы функционального контроля (например, потере данных в результате отказа измерительного контроллера или отказа каналаобразующего оборудования). Из анализа значений информационного вектора  $\langle П_1 З_1 П_2 З_2 П_3 З_3 \rangle$ , например, следует, что при формировании в некоторый момент времени двух векторов  $\langle 11 10 11 \rangle$  и  $\langle 11 00 11 \rangle$  возникает нарушение в работе рельсовой цепи. Первый вектор соответствует замыканию рассматриваемой рельсовой цепи в маршруте при свободности обеих смежных рельсовых цепей, а второй — занятости и замкнутости рельсовой цепи в маршруте при свободности обеих смежных рельсовых цепей. Кроме того, можно выделить еще две логические ситуации: появление вектора  $\langle 11 01 11 \rangle$  после того, как был сформирован вектор  $\langle 11 11 11 \rangle$ , и появление вектора  $\langle 01 11 01 \rangle$  после того, как был сформирован вектор  $\langle 01 01 01 \rangle$ . Первая логическая ситуация соответствует защитному отказу типа «ложная занятость», вторая — опасному отказу типа «ложная свободность».

На рис. 3 изображен граф переходов автомата Мура, где выходные значения  $A_2, A_3, A_6, A_7$  соответствуют перечисленным выше отказам средств автоматики, значение  $A_5$  — некорректной работе средств диагностирования, а  $A_1$  — нормальному функционированию средств автоматики. Вектором  $\langle \sim \sim \sim \sim \sim \sim \rangle$  обозначены все нерассмотренные векторы.

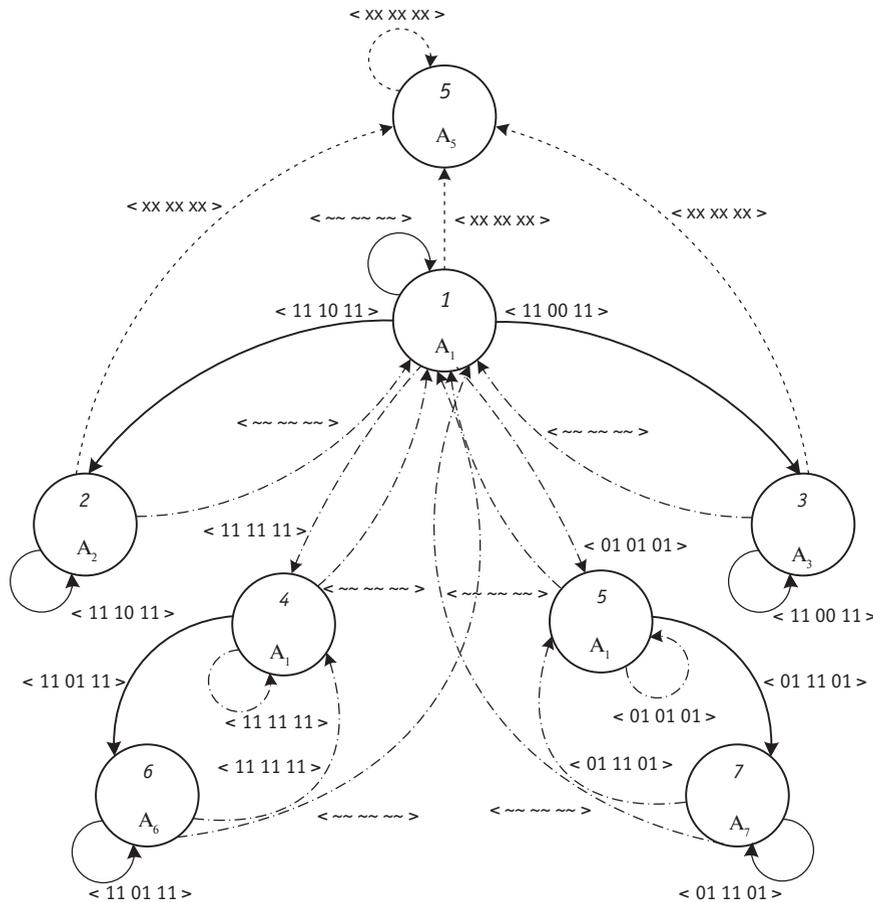


Рис. 3. Автомат Мура для фиксации некорректной работы устройств автоматики

Таблица 2

 Некоторые векторы  $RS4(6,3)$ -кода

Информационный вектор						$r$	$V$	$\alpha$	$W$	Контрольный вектор		
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$					$y_1$	$y_2$	$y_3$
0	1	0	1	0	1	3	3	1	7	1	1	1
0	1	1	1	0	1	4	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	1	1	5	1	0	1	0	0	1
1	1	1	1	1	1	6	2	1	6	1	1	0

Помимо введенных обозначений на графе рис. 3 сплошными стрелками указаны переходы, соответствующие логическим ситуациям нарушения логики работы рельсовых цепей, пунктирными — логические ситуации, связанные с отказом средств диагностирования, пунктирными стрелками с точками — переходы, связанные с восстановлением нормального режима работы.

Отметим актуальность учета рассмотренных логических ситуаций. В процессе функционирования средств автоматики нередко встречаются случаи кратковременной ложной занятости, которая человеком может быть не замечена в момент первого проявления. Запись данных о нарушениях, происходящих в работе средств автоматики, в архив позволяет при дальнейшем детальном анализе установить события, при которых возникла такая логическая ситуация, и найти ее причину. Это дает возможность предотвратить отказы на стадии их зарождения — на стадии предотказных состояний [6].

Подобные графы (см. рис. 3) внедряются в программное обеспечение современных систем функционального контроля и могут применяться без дополнительных установок и работ по привязке датчиков диагностической информации ко всем однотипным объектам. Для повышения надежности работы программного модуля информационные векторы могут быть закодированы каким-либо помехоустойчивым кодом (например, из описанных в [11–17]).

При создании логико-временных моделей, внедренных в программное обеспечение АПК-ДК, в качестве помехоустойчивого кода был выбран модульно модифицированный код из семейства  $RS4(m, k)$ -кодов (где  $m$  — длина информационного вектора,  $k$  — длина контрольного вектора), специально разработанный для повышения надежности устройств автоматики и вычислительной техники [16, 17].

Этот код строится по следующим правилам.

1. Фиксируется модуль  $M = 4$ .
2. Подсчитывается вес информационного вектора  $r$  (число единичных информационных разрядов).
3. Число  $r$  представляется по модулю  $M$  (другими словами, определяется вычет числа  $r$  по заданному модулю), т. е.  $V = (r) \bmod M$ .
4. Определяется поправочный коэффициент  $\alpha$ , равный сумме по модулю два произвольного (но заранее установленно) числа любых информационных разрядов.
5. Формируется число  $W = V + \alpha M$ .
6. Полученное число  $W$  представляется в двоичном виде и записывается в контрольный вектор.

Приведенный алгоритм получения контрольных векторов  $RS4(m, k)$ -кода иллюстрируется на нескольких примерах информационных векторов с длиной  $m = 6$  в табл. 2. При этом поправочный коэффициент определяется как сумма по модулю два первых трех информационных разрядов, т. е.  $\alpha = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3$ .

Как показано в [16, 17], при выборе  $\left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor$  информационных разрядов в сумме поправочного коэффициента  $\alpha$ , где запись  $\lfloor \dots \rfloor$  обозначает целое снизу от вычисляемого значения,  $RS4(m, k)$ -коды обнаруживают максимальное число ошибок в информационных векторах при данной длине.

Применение семейства  $RS4(m, k)$ -кодов в логико-временных моделях позволяет при постоянном числе контрольных разрядов  $k = 3$  обеспечивать защиту от:

- любых ошибок нечетных кратностей;
- любых монотонных ошибок (т. е. связанных с искажением только 0 или только 1), кратность которых не равна  $d = 4, 8, 12, \dots$ ;
- более половины двукратных симметричных ошибок (связанных с искажением  $0 \rightarrow 1$  и  $1 \rightarrow 0$ ).

Например, классический код Бергера [18] не обнаруживает все 100% симметричных искажений, имея при этом число контрольных разрядов, равное  $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ , где запись  $\lceil \dots \rceil$  обозначает целое сверху от вычисляемого значения. Другие коды с постоянным числом контрольных разрядов, например модульные коды  $S8(m, k)$ , также не обнаруживают 100% симметричных искажений [12].

## 2. О ПРЕДСТАВЛЕНИИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Существенным недостатком современных систем функционального контроля устройств ЖАТ является отсутствие встроенных систем поддержки принятия решений, которые должны базироваться на логико-временных моделях работы средств ЖАТ (способ их построения описан выше), а также на известных алгоритмах поиска неисправностей [19].

Наряду с совершенствованием методики анализа диагностической информации необходимо развивать и уровень представления данных. Поскольку персоналу дистанций СЦБ легче работать со схематическими планами станций и с принципиальными схемными решениями по ЖАТ, целесообразно именно их отражать в технологических окнах АРМ систем функционального контроля.

Сегодня многие схемы ЖАТ переводятся в электронный вид, например, с использованием АРМ проектирования технической документации (АРМ ПТД) [20–22]. Одна из новых функций АПК-ДК — возможность стыковки данных от АРМ ПТД. Схемы, изображенные в АРМ ПТД, записываются в формате \*.odx и воспринимаются программным обеспечением АПК-ДК. Эти схемы выводятся в технологическое окно АПК-ДК (рис. 4).

Использование имеющихся измерительных контроллеров дает возможность анимировать схемы, т. е. подсвечивать различными цветами пути протекания токов, состояния реле и их контактов, отражать некоторые аналоговые измерения. А значит, выдавать информационные сообщения об отклонениях параметров устройств от норм и о возникающих неисправно-

стях (отказах и предотказных состояниях), прогнозировать дальнейшие изменения. Таким образом, анимация схем расширяет функциональные возможности и совершенствует работу АПК-ДК, следовательно, позволяет использовать данную систему более эффективно с позиции технического персонала дистанций СЦБ.

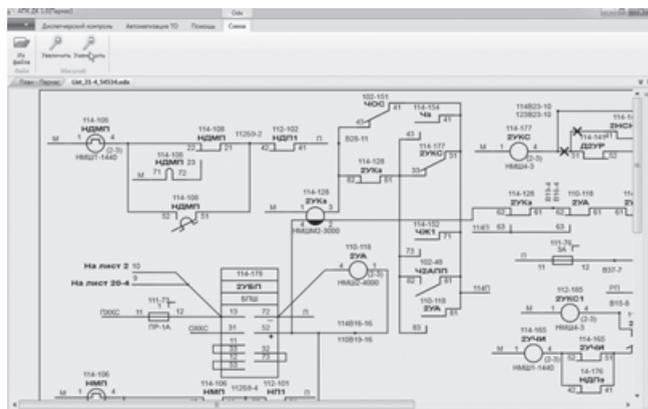


Рис. 4. Представление схем в АРМ

Работа эксплуатационного штата дистанций СЦБ нередко связана с анализом схемных решений ЖАТ, и наличие функции «подсказки» в АРМ системы функционального контроля заметно бы упростило этот процесс.

Ясно, что в существующих системах ЖАТ невозможна полная анимация схем, так как поставить измерительные контроллеры во все схемные узлы нереально. С другой стороны, даже частичная анимация схем представляется значительным развитием АПК-ДК, потому что позволит сузить поле поиска дефектов и облегчить анализ схемных решений при наличии неисправностей.

Подобного рода анимация работы схем ЖАТ ранее использовалась для поиска неисправностей в результате машинного моделирования [23]. В описываемом в настоящей статье варианте в качестве исходных данных выступают реальные дискретные и аналоговые параметры устройств ЖАТ.

## Литература

1. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов и др. М. : Транспорт, 1995. 272 с.
2. Лисенков В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов. М. : ВИНТИ РАН, 1999. 331 с.
3. Шаманов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики. М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. 244 с.
4. Ефанов Д. В., Лыков А. А. Основы построения и принципы функционирования систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие. СПб. : ПГУПС, 2012. 59 с.
5. Гавзов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем // Автоматика и телемеханика. 1994. № 8. С. 3–50. ISSN 0005-2310.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-технический прогресс определяет пути развития в области ЖАТ: применение современной высоконадежной микроэлектронной и микропроцессорной техники, реализующей как старые, так и новые функции по управлению движением поездов; создание средств функционального контроля и мониторинга, автоматически устанавливающих техническое состояние устройств, и многие другие.

Современные системы функционального контроля устройств ЖАТ при всех своих достоинствах остаются несовершенными, а дальнейшее их развитие должно идти по нескольким направлениям. В статье описаны подходы к совершенствованию систем функционального контроля путем интеграции в их программное обеспечение логико-временных моделей работы устройств ЖАТ, а также к развитию систем поддержки принятия решений. Это позволит системам функционального контроля устройств ЖАТ стать более удобным средством наблюдения за качеством работы устройств управления и контроля.

При дальнейшем совершенствовании систем функционального контроля средств ЖАТ необходимо структурировать информацию следующим образом. Центральным звеном в АРМ должен быть схематический план в двухниточном исполнении, где с использованием цветовой индикации следовало бы показывать техническое состояние всех объектов (или максимального их количества). Конечно, для эксплуатационного персонала дистанций СЦБ важным является не само поездное положение в реальном времени, а техническое состояние объектов ЖАТ. Должны быть организованы простые переходы к схемным решениям: например, по двойному щелчку левой кнопки мыши по объекту на схематическом плане можно было бы разворачивать схему его управления и контроля. Подобная функция частично введена в АРМ системы АПК-ДК [4, 7, 9]. При этом АРМ должны содержать все схемные решения, а не только маленький их набор.

В более далекой перспективе следует рассматривать усовершенствованные системы функционального контроля как подсистемы самих систем управления движением поездов и, возможно, снабжать подсистему мониторинга обратной связью для реализации функций адаптивного управления.

## References

1. Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Methods of development of safe microelectronic railway automation systems] / V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, Kh. A. Khristov i dr. M. : Transport, 1995. 272 p.
2. Lisenkov V. M. Statisticheskaya teoriya bezopasnosti dvizheniya poezdov [Statistical theory of train safety]. M. : VINITI RAN, 1999. 331 p.
3. Shamanov V. I. Elektromagnitnaya sovmestimost sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Electromagnetic compatibility of railway automation and telemechanics systems]. M. : FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2013. 244 p.
4. Efanov D. V., Lykov A. A. Osnovy postroeniya i printsipy funktsionirovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki : ucheb. posobie [Fundamentals of development and operation principles of technical diagnostics and monitoring systems of railway automation and telemechanics devices : a textbook]. SPb. : PGUPS, 2012. 59 p.
5. Gavzov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Metody obespecheniya bezopasnosti diskretnykh sistem [Safety methods for discrete systems] // Avtomatika i telemekhanika. 1994. № 8. P. 3–50. ISSN 0005-2310.

6. Сапожников Вл. В., Лыков А. А., Ефанов Д. В. Понятие предотказного состояния // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 11. С. 6–8. ISSN 0005-2329.
7. Лыков А. А., Ефанов Д. В., Власенко С. В. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 5 (42). С. 67–72. ISSN 1994-831X.
8. Ефанов Д. В. Техническое диагностирование и мониторинг устройств автоматики в метрополитенах // Автоматизация в промышленности. 2014. № 3. С. 4–8. ISSN 1819-5962.
9. Ефанов Д. В., Богданов Н. А. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 36–42. ISSN 1815-9400.
10. Ефанов Д. В., Богданов Н. А. О достоверности фиксации предотказных состояний в системах непрерывного контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 2. С. 27–30. ISSN 0236-1914.
11. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. L. New Code for Fault Detection in Logic Circuits // Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems, St. Petersburg, Russia, June 21–24, 1999. P. 693–696.
12. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Блюдов А. А. Экспериментальные исследования двоичных кодов с суммированием // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. № 2 (27). С. 145–152. ISSN 1815-588X.
13. Blyudov A. A. On the Synthesis of Test Equipment for Modulo Codes with Summation // Proceedings of Petersburg Transport University. 2013. № 1. P. 53–58.
14. Блюдов А. А., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Модифицированный код с суммированием для организации контроля комбинационных схем // Автоматика и телемеханика. 2012. № 1. С. 169–177. ISSN 0005-2310.
15. О способах построения кодов с суммированием с минимальным общим числом обнаруживаемых искажений в информационных векторах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. № 1 (38). С. 82–91. ISSN 1815-588X.
16. On the Problem of Selection of Code with Summation for Combinational Circuit Test Organization / D. Efanov, V. Sapozhnikov, V. L. Sapozhnikov et al // Proceedings of 11<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013), Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013. P. 261–266.
17. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников и др. // Автоматика и телемеханика. 2014. № 8. С. 131–145. ISSN 0005-2310.
18. Berger J. M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. 1961. Vol. 4. Issue 1. P. 68–73.
19. Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). М. : Энергоатомиздат, 1981. 320 с.
20. Василенко М. Н., Булавский П. Е., Денисов Б. П. Организация электронного документооборота на полигоне Октябрьской железной дороги при реконструкции и модернизации систем автоматики и телемеханики // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2008. № 4. С. 67–72. ISSN 0201-727X.
21. Автоматизированная система экспертизы схемных решений железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев, Д. В. Зуев и др. // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 5 (36). С. 64–67. ISSN 1994-831X.
22. Булавский П. Е., Марков Д. С. Автоматизация синтеза электронного документооборота систем железнодорожной автоматики на основе международных стандартов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2013. № 4 (37). С. 17–24. ISSN 1815-588X.
23. Лыков А. А., Ефанов Д. В., Кузнецов В. А. Проблемы повышения надежности работы устройств АБТЦ-2000 при организации высокоскоростного движения // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 3 (34). С. 40–43. ISSN 1994-831X.
6. Sapozhnikov V. L., Lykov A. A., Efanov D. V. Ponyatie predotkaznogo sostoyaniya [A concept of pre-failure state] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2012. № 11. P. 6–8. ISSN 0005-2329.
7. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. Tekhnicheskoe diagnostirovanie i monitoring sostoyaniya ustroystv ZhAT [Technical diagnostics and condition monitoring of RAT devices] // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2012. № 5 (42). P. 67–72. ISSN 1994-831X.
8. Efanov D. V. Tekhnicheskoe diagnostirovanie i monitoring ustroystv avtomatiki v metropolitenakh [Technical diagnosis and monitoring of automation devices in subways] // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2014. № 3. P. 4–8. ISSN 1819-5962.
9. Efanov D. V., Bogdanov N. A. Monitoring parametrov relsovykh tsepey tonalnoy chastoty [Parameter monitoring of tone track circuits] // Transport of the Urals. 2013. № 1 (36). P. 36–42. ISSN 1815-9400.
10. Efanov D. V., Bogdanov N. A. O dostovernosti fiksatsii predotkaznykh sostoyaniy v sistemakh nepreryvnogo kontrolya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Reliability of recording of pre-failure states in continuous monitoring systems of railway automation and telemechanics devices] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2012. № 2. P. 27–30. ISSN 0236-1914.
11. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. L. New Code for Fault Detection in Logic Circuits // Proceedings of 4th International Conference on Unconventional Electro-mechanical and Electrical Systems, St. Petersburg, Russia, June 21–24, 1999. P. 693–696.
12. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. L., Blyudov A. A. Eksperimentalnye issledovaniya dvoichnykh kodov s summirovaniem [Experimental studies of binary codes with summation] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putyey soobshcheniya. 2011. № 2 (27). P. 145–152. ISSN 1815-588X.
13. Blyudov A. A. On the Synthesis of Test Equipment for Modulo Codes with Summation // Proceedings of Petersburg Transport University. 2013. № 1. P. 53–58.
14. Blyudov A. A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. L. Modifitsirovanny kod s summirovaniem dlya organizatsii kontrolya kombinatsionnykh skhem [Modified code with summation for combinational circuits monitoring] // Avtomatika i telemekhanika. 2012. № 1. P. 169–177. ISSN 0005-2310.
15. O sposobakh postroyeniya kodov s summirovaniem s minimalnym obshchim chislom neobnaruzhivaemykh iskazheniy v informatsionnykh vektorakh [Methods of development of codes with summation with a minimum total number of undetected misstatements in information vectors] / V. V. Sapozhnikov, V. L. Sapozhnikov, D. V. Efanov i dr. // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putyey soobshcheniya. 2014. № 1 (38). P. 82–91. ISSN 1815-588X.
16. On the Problem of Selection of Code with Summation for Combinational Circuit Test Organization / D. Efanov, V. Sapozhnikov, V. L. Sapozhnikov et al // Proceedings of 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013), Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013. P. 261–266.
17. O kodakh s summirovaniem edinichnykh razryadov v sistemakh funktsionalnogo kontrolya [Codes with summation of individual bits in functional control system] / A. A. Blyudov, D. V. Efanov, V. V. Sapozhnikov i dr. // Avtomatika i telemekhanika. 2014. № 8. P. 131–145. ISSN 0005-2310.
18. Berger J. M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. 1961. Vol. 4. Issue 1. P. 68–73.
19. Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva) [Fundamentals of technical diagnostics (optimization of diagnosing algorithms, hardware)]. M. : Energoatomizdat, 1981. 320 p.
20. Vasilenko M. N., Bulavskiy P. E., Denisov B. P. Organizatsiya elektronnoy dokumentooborota na poligone Oktyabrskoy zheleznoy dorogi pri rekonstruktsii i modernizatsii sistem avtomatiki i telemekhaniki [Organization of electronic document management at October Railway facility during reconstruction and modernization of automation and telemechanics systems] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putyey soobshcheniya. 2008. № 4. P. 67–72. ISSN 0201-727X.
21. Avtomatizirovannaya sistema ekspertizy skhemnykh resheniy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Automated system for examination of circuit design of railway automation and telemechanics] / M. N. Vasilenko, A. M. Gorbachev, D. V. Zuev i dr. // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2011. № 5 (36). P. 64–67. ISSN 1994-831X.
22. Bulavskiy P. E., Markov D. S. Avtomatizatsiya sinteza elektronnoy dokumentooborota sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki na osnove mezhdunarodnykh standartov [Automation of synthesis of electronic document management for railway automation systems based on international standards] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putyey soobshcheniya. 2013. № 4 (37). P. 17–24. ISSN 1815-588X.
23. Lykov A. A., Efanov D. V., Kuznetsov V. A. Problemy povysheniya nadezhnosti raboty ustroystv ABTC-2000 pri organizatsii vysokoskorostnogo dvizheniya [Issues of increasing reliability of ABTC-2000 devices in high-speed traffic management] // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2011. № 3 (34). P. 40–43. ISSN 1994-831X.

УДК 621.39

**Андрей Константинович Канаев, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС),  
Евгений Валерьевич Опарин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала ФГУП ЦНИИС — ЛО ЦНИИС, ассистент кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС)**

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СЕТИ СИНХРОНИЗАЦИИ

**Andrey Konstantinovich Kanaev, DSc in Engineering, Head of Department of Electrical Communications, Petersburg State Transport University (PSTU),  
Evgeny Valeryevich Oparin, PhD in Engineering, Senior Research Fellow, St. Petersburg Branch of FSUE CNIIS — LO CNIIS, Assistant Lecturer, Department of Electrical Communications, Petersburg State Transport University (PSTU)**

### Equipment condition assessment and forecasting method in synchronization network

#### Аннотация

В статье рассмотрены подходы к оценке показателей надежности оборудования сети синхронизации. Предложена методика, позволяющая анализировать и прогнозировать техническое состояние такого оборудования. В основу методики положена идентификация вида закона распределения возникновения отказов с использованием цензурированных выборок. Даны рекомендации по применению методики в составе системы управления телекоммуникационным комплексом.

**Ключевые слова:** сеть синхронизации, цензурированная выборка, телекоммуникационная система, система управления, техническое состояние.

#### Summary

The article discusses various approaches to estimate reliability indicators of synchronization network equipment. A method is proposed to analyze and predict technical condition of the equipment. The methodology is based on identification of the type of failure distribution law using censored samples. Recommendations are given to use the method as a part of telecommunications complex control system.

**Keywords:** network synchronization, censored sample, telecommunication system, management system, technical condition.

#### ВВЕДЕНИЕ

Функционирование телекоммуникационной системы (ТКС) зависит от ряда подсистем, среди которых одна из наиболее важных — система синхронизации. Ключевая задача этой системы — выработка, передача, распределение и доставка сигналов синхронизации до цифрового оборудования ТКС с целью его согласованного взаимодействия.

Отказы в системе синхронизации и отклонение значений характеристик сигналов синхронизации способны привести к существенному ухудшению качества передаваемой информации — вплоть до полного прекращения оказания телекоммуникационных услуг.

В связи с этим важную роль играет процесс управления сетью синхронизации (СС) как составной части системы синхронизации, обеспечивающий требуемые показатели ее функционирования. Вопросы управления СС становятся особенно актуальными, когда возникают нарушения в работе системы синхронизации либо отказы, в том числе и в результате внешних воздействий. В этих случаях необходимо восстановить функционирование сети синхронизации в течение заданного времени, чтобы обеспечить устойчивость всей ТКС [1, 2]. Причем в процессе управления важно не только оценить, но и прогнозировать техническое состояние СС и показателей ее надежности, для того чтобы предотвратить ухудшение значений характеристик и параметров оборудования, а также возникновение аварийных ситуаций и отказов.

#### 1. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СОСТОЯНИЙ СЕТИ СИНХРОНИЗАЦИИ

В целом можно выделить два подхода к оценке показателей надежности оборудования СС и прогнозированию состояний сети синхронизации [3] — структурный и статистический (рис. 1).



**Рис. 1. Классификация подходов к оценке и прогнозированию показателей надежности оборудования сети синхронизации**

В основе структурного подхода лежит использование априорных сведений и данных об элементах и оборудовании СС без учета воздействия дестабилизирующих факторов. То есть оборудование СС представляется в виде структурной схемы, в которой указана логическая взаимосвязь составляющих его элементов.

При статистическом подходе используется статистика отказов, происходящих на СС. Выделяют статистический подход на основе реальной и искусственной статистики.

В связи с достаточной сложностью и распределенностью СС, а также с воздействием многочисленных дестабилизирующих факторов наиболее целесообразно использовать статистический подход.

Тем не менее получение достоверной статистики отказов оборудования СС в необходимом объеме может быть затруднено по ряду причин, среди которых следует выделить:

- различное время начала и окончания эксплуатации оборудования СС, что вводит дополнительную погрешность в достоверность статистики отказов;

- вывод из эксплуатации некоторого оборудования по организационным причинам или в результате отказа его составных частей, надежность которых не исследуется;

- перевод оборудования СС в процессе эксплуатации из одного режима работы в другой;

- использование оборудования однократного применения по назначению из режима хранения;

- необходимость оценки надежности оборудования до наступления отказов всей группы оборудования, за которым ведется наблюдение;

- осуществление периодического контроля, когда информация о надежности поступает в виде интервалов;

- использование различных планов наблюдения за оборудованием СС в течение всего периода его эксплуатации;

- недостаточную точность метрологических ресурсов и диагностического оборудования.

В подобных условиях, когда отсутствуют достоверные сведения о моментах возникновения отказов части оборудования СС, для анализа и прогнозирования наиболее рационально применять методы оценивания надежности по цензурированным выборкам [4, 5]. Под цензурированием понимается процесс возникновения неопределенности моментов отказа оборудования, когда интервал неопределенности известен. Интервал неопределенности — это интервал наработки, вну-

три которого произошел либо произойдет отказ оборудования, причем точное значение наработки до отказа неизвестно.

Задача по оценке показателей надежности и прогнозированию состояний оборудования СС на основе цензурированных выборок может быть решена при помощи параметрических и непараметрических методов. Для использования параметрических методов должен быть известен или предполагаем закон распределения наработки до отказа оборудования СС. Однако в условиях функционирования сети синхронизации, на которой существует огромное многообразие различного оборудования, предварительный выбор такого закона достаточно затруднителен. Поэтому в данном случае лучше применять непараметрические методы, которые позволяют в целом получать объективные оценки показателей надежности.

Отсутствие сведений о законе распределения наработок до отказа при использовании непараметрических методов оценки надежности предполагает построение экспериментальной функции.

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА ОБОРУДОВАНИЯ СЕТИ СИНХРОНИЗАЦИИ

Для построения экспериментальной функции распределения наработки до отказа в условиях функционирования СС предлагается использовать следующий подход.

Пусть на СС расположено  $N$  однотипных устройств, которые могут находиться в эксплуатации, служить запасным оборудованием, быть в ремонте и т. д. При функционировании системы управления (СУ) СС, элементы которой разработаны авторами [6, 7], ее база знаний (БЗ) обновляется в дискретные моменты времени. В эти моменты в БЗ записывается статистика о возникающих отказах части оборудования из  $N$ , статистика об оборудовании, которое продолжает функционировать, а также отслеживается оборудование, характеристики которого СУ СС в силу различных причин не может контролировать. В интервале между данными дискретными моментами времени  $[t_{i-1}, t_i]$  может произойти отказ какого-либо оборудования СС, а также какая-то часть оборудования может выйти из мониторинга СУ СС по ряду причин, но при этом находиться в исправном состоянии [5].

Зафиксируем произвольный момент времени  $T_k$ , временной промежуток  $[0, T_k]$  можно разбить на  $k$  интервалов, по истечении которых БЗ обновляется. С учетом этих рассуждений можно записать следующие выражения [5]:

$$\sum_{j=1}^k (r_j + n_j) = N; \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^k r_j = r; \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^k n_j = n, \tag{3}$$

где  $r$  — общее число полных наработок до отказа;

$n$  — общее число неполных наработок до отказа;

$N$  — число устройств СС, за которыми ведется мониторинг.

Отметим, что момент времени  $T_k$  является окончанием всех наблюдений за оборудованием СС, при этом все неполные наработки становятся полными.

Таким образом, для оценки функции распределения наработок до отказа оборудования СС в каждый данный дискретный момент времени предлагается использовать выражение [5]

$$\hat{F}(t) = \begin{cases} \sum_{j=1}^k (1 - \hat{F}_{j-1}) \frac{r_j}{N_{yj}} & \text{при } N_{yj} > 0 \\ 0 & \text{при } N_{yj} < 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $k$  — число интервалов в промежутке  $[0, T_k]$ ;

$\hat{F}_{j-1}$  — оценка функции распределения в точке  $t_{j-1}$ ;

$r_j$  — число полных наработок в интервале  $[t_{j-1}, t_j]$ ;

$N_{yj}$  — условный объем цензурированной выборки, представляет собой число оборудования СС, за которым ведется наблюдение в интервале  $[t_{j-1}, t_j]$ ,

$$N_{yj} = N - \sum_{i=0}^{j-1} (r_i + n_i). \quad (5)$$

Отметим также, что  $N_{y1} = N - n_0$ ;  $r_0 = 0$ ;  $F_0 = 0$ .

Таким образом, имея статистику отказов, полученную с применением БЗ СУ СС, по приведенным выше выражениям мы можем построить экспериментальную функцию распределения наработки до отказа оборудования СС. Если задать вероятность предотказного состояния оборудования, можно оценить временной промежуток, по истечении которого наступит такое предотказное состояние, требующее замены оборудования или его тщательной диагностики.

В качестве примера применения цензурированных выборок рассмотрим построение экспериментальной функции распределения наработки до отказа блока синхронизации 1-го типа. Число отказов в данном блоке по годам приведено на рис. 2.

С использованием выражений (1)–(5) построена экспериментальная функция распределения возникновения отказов блоков синхронизации 1-го типа оборудования оператора связи по цензурированным выборкам. При этом принято допущение, что для рассмотрения выбрана группа аппаратуры оператора связи, содержащая блоки синхронизации 1-го типа, и наблюдения проводились до тех пор, пока не произошли отказы в каждом блоке синхронизации этой группы. На рис. 3 представлены экспериментальные функции распределения, построенные классическим способом и по цензурированным выборкам.

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что функция распределения, построенная классическим способом, дает неоправданно оптимистические оценки вероятности возникновения отказов оборудования. Экспериментальная функция распределения, построенная по цензурированным выборкам, вследствие учета большего числа факторов наблюдения дает более реальные оценки. Таким образом, применение цензурированных выборок кажется наиболее обоснованным для оценки и прогнозирования состояния оборудования СС.

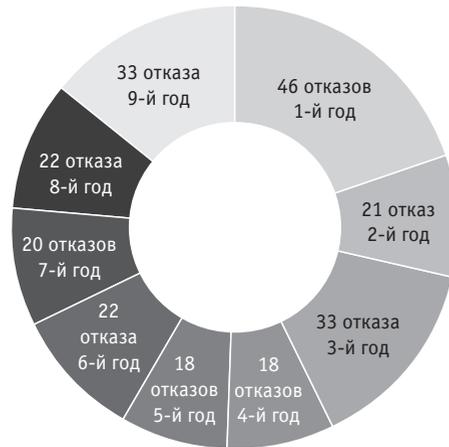


Рис. 2. Число отказов в блоках синхронизации 1-го типа оборудования оператора связи

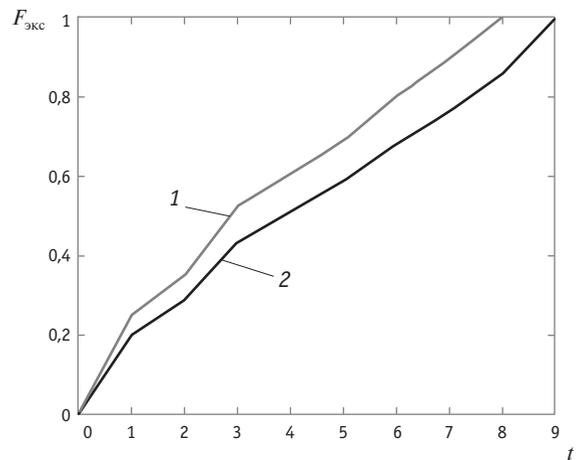


Рис. 3. Экспериментальная функция распределения возникновения отказов в блоках синхронизации 1-го типа оборудования оператора связи:

1 — по цензурированным выборкам; 2 — классическим способом

Поскольку БЗ СУ СС обновляется постоянно, периодически возможен постоянный перерасчет экспериментальной функции распределения наработок до отказа, что позволяет уточнить временной промежуток предотказного состояния.

Для прогнозирования состояний СС необходимо провести исследование полученного вероятностного распределения интервалов безотказной работы устройств синхронизации, что предполагает решение задачи идентификации полученного распределения из набора наиболее часто встречающихся законов распределения. Знание закона распределения наработки до отказа будет способствовать прогнозированию (с определенной долей вероятности) состояния СС в конкретный момент времени.

### 3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВИДА ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ СЕТИ СИНХРОНИЗАЦИИ ТКС

В качестве исходных данных для решения задачи идентификации распределения наработки до отказа необходимо использовать полученную статистику продолжительности безотказной работы устройств синхронизации. Обработка статистики сводится к поиску параметров известных функций распределения наработок до отказа устройств СС. Наиболее часто используются такие законы распределения наработок до отказа, как экспоненциальное, нормальное, логарифмически нормальное распределение, распределение Вейбулла, гамма-распределение, однако могут применяться и другие [3].

Чтобы определить конкретный вид распределения для описания статистики и прогнозирования возникновения отказов, будем рассуждать следующим образом. Статистику отказов можно одновременно описать несколькими распределениями, в данном случае сначала оценим их параметры, чтобы представить распределения в аналитической форме. После того как распределения будут представлены в аналитической форме, оценим каждое из них для описания статистики отказов.

Можно выделить несколько способов оценки параметров законов распределения по цензурированным выборкам, среди них чаще всего применяют метод максимального правдоподобия, метод получения линейных оценок с минимальной дисперсией, метод квантилей, метод моментов, метод Менона, метод наименьших квадратов, графический метод [5, 6].

Как показал анализ, наибольшую точность в получении оценок параметров распределения наработок до отказа оборудования СС обеспечивает метод максимального правдоподобия, однако он достаточно сложен, приводит к громоздким вычислительным процедурам и большой загрузке ресурсов СУ СС. Наиболее приемлемыми при обработке информации в задачах оперативного управления надежностью, к числу которых можно отнести и решаемую нами задачу, являются методы Менона, квантилей, моментов и комбинированные методы, отличающиеся меньшей сложностью вычислений при допустимой точности оценивания.

С учетом перечисленных особенностей целесообразнее всего использовать метод моментов. Его суть заключается в приравнивании эмпирических и теоретических моментов закона распределения наработок до отказа оборудования СС. В результате решения выведенных уравнений находят оценки параметров распределения.

Таким образом, полученные аналитические зависимости будут основой для определения закона, который наиболее точно описывает экспериментальную функцию распределения наработок до отказа оборудования СС. В терминах математической статистики данная задача формулируется как задача проверки гипотез.

Для проверки гипотез о согласии эмпирических распределений времени наработки до отказа с теоретическими по полному выборкам чаще всего используют критерии Колмогорова, Крамера — Мизеса, Пирсона или их разновидности. Анализ показал, что при использовании цензурирования данные

критерии теряют часть своих свойств. Изучение других критериев согласия позволило сделать вывод, что применительно к цензурированным выборкам наиболее рационально применение критерия Мозеса.

Статистика критерия Мозеса имеет вид [5]

$$T_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_0(t_i), \quad i=1, \dots, N, \quad (6)$$

где  $N$  — объем выборки;

$F_0$  — теоретический закон распределения, используемый в качестве нулевой гипотезы при проверке согласия;

$\{t_i\}$  — совокупность зафиксированных наработок до отказа.

Нулевая гипотеза принимается, если выборочное значение статистики критерия Мозеса находится в интервале [5]

$$0,5 - (12N)^{-1/2} \Phi^{-1}(1 - \alpha/2) \leq T_N \leq 0,5 + (12N)^{-1/2} \Phi^{-1}(1 - \alpha/2), \quad (7)$$

где  $\Phi^{-1}(1 - \alpha/2)$  — квантиль уровня  $1 - \alpha/2$  стандартного нормального распределения;

$\alpha$  — требуемый уровень значимости критерия.

Последовательно проверив полученные экспериментальные законы распределения наработок до отказа оборудования СС по критерию Мозеса, получаем законы распределения, которые описывают статистику отказов.

Для идентификации построенной экспериментальной функции распределения возникновения отказов блоков синхронизации 1-го типа выберем следующие распределения: распределение Вейбулла, распределение Коши, равномерное распределение, нормальное распределение, логистическое распределение и гиперэкспоненциальное распределение.

Анализ полученного экспериментального распределения и использование метода моментов позволили определить параметры перечисленных выше распределений. В результате аналитические выражения, характеризующие представленные выше распределения, имеют следующий вид:

$$F_1(t) = 1 - \exp\left(\left(-\frac{t}{3,249}\right)^{1,053}\right); \quad (8)$$

$$F_2(t) = 0,5 + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{t-2,536}{1,547}\right); \quad (9)$$

$$F_3(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ \frac{t}{7,5} & 0 < t \leq 7,5; \\ 1 & t > 7,5 \end{cases} \quad (10)$$

$$F_4(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right) \cdot \int_{-\infty}^{\left(\frac{t-3,682}{2,705}\right) - \left(\frac{u^2}{2}\right)} e^{-\frac{u^2}{2}} du; \quad (11)$$

$$F_5(t) = \frac{1}{1 + \exp\left[-\left(\frac{t-3,131}{1,814}\right)\right]}; \quad (12)$$

$$F_6(t) = 0,038 \cdot (1 - e^{-0,094t}) + 0,478 \cdot (1 - e^{-0,106t}) + 0,238 \cdot (1 - e^{-0,047t}) - 0,079 \cdot (1 - e^{+0,198t}) + 0,325 \cdot (1 - e^{-0,751t}). \quad (13)$$

Выражение (8) представляет собой распределение Вейбулла, выражение (9) — распределение Коши, выражение (10) — равномерное распределение, формула (11) — нормальное распределение, формула (12) — логистическое распределение. Выражению (13) соответствует гиперэкспоненциальное распределение пятого порядка. Порядок гиперэкспоненциального распределения был выбран из соображений того, что имеется 10 точек наблюдения. В общем случае порядок гиперэкспоненциального распределения при расчетах может быть уменьшен. Полученные выражения функций распределения совместно с экспериментальной функцией распределения представлены на рис. 4.

Оценим с помощью критерия Мозеса, какую из полученных функций в наибольшей степени можно использовать для прогнозирования состояния блока синхронизации 1-го типа.

При помощи выражения (6) вычислим статистику критерия Мозеса:

$$T_{N1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_1(t_i) = 0,714; \quad (14)$$

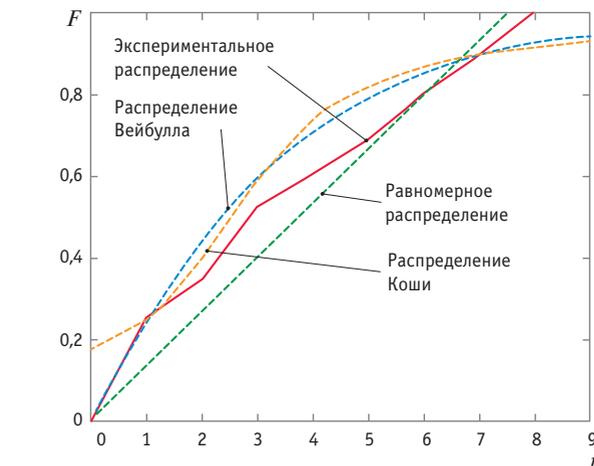
$$T_{N2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_2(t_i) = 0,667; \quad (15)$$

$$T_{N3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_3(t_i) = 0,711; \quad (16)$$

$$T_{N4} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_4(t_i) = 0,631; \quad (17)$$

$$T_{N5} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_5(t_i) = 0,759; \quad (18)$$

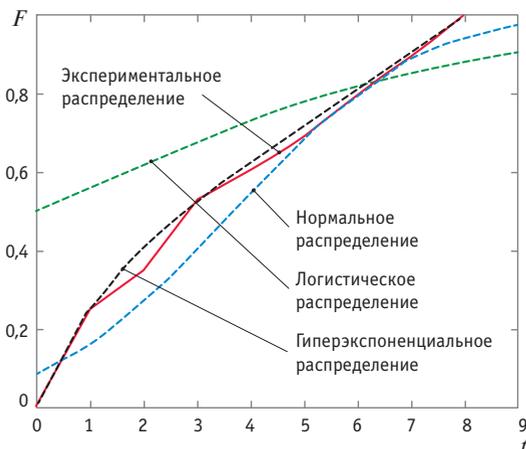
$$T_{N6} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_6(t_i) = 0,570. \quad (19)$$



Выражение (14) представляет собой статистику критерия Мозеса для распределения Вейбулла, выражения (15) и (16) — для равномерного распределения и распределения Коши. Выражению (17) соответствует статистика критерия Мозеса для нормального распределения, выражению (18) — для логистического, выражению (19) — для гиперэкспоненциального.

Расчет при помощи выражения (7) показал, что с уровнем значимости критерия Мозеса  $\alpha = 0,4$  для прогнозирования состояния блока синхронизации 1-го типа можно использовать гиперэкспоненциальное распределение:

$$0,5 - (12N)^{-1/2} \Phi^{-1}(1 - 0,4/2) \leq 0,570 \leq 0,5 + (12N)^{-1/2} \Phi^{-1}(1 - 0,4/2). \quad (20)$$



Данный результат подтверждается графическими расчетами (см. рис. 4), из которых видно, что гиперэкспоненциальное распределение точнее всего воспроизводит экспериментальное распределение.

Если  $\alpha > 0,4$ , то ни одно из полученных теоретических распределений не рекомендуется использовать для прогнозирования состояния блоков синхронизации 1-го типа. Однако, с учетом того что значимость критерия Мозеса  $\alpha = 0,4$  относительно невысока, окончательную оценку показателей надежности блока синхронизации 1-го типа рекомендуется предоставить эксперту. Также можно сделать вывод о том, что для вычисления теоретического распределения, способного производить оценку оборудования с достаточно высоким значением  $\alpha$ , необходимо иметь в наличии более объемные цензурированные данные.

В случае если одну и ту же статистику отказов описывают несколько законов распределения, можно повысить требуемый уровень значимости критерия Мозеса  $\alpha$  и отобрать одно

Рис. 4. Теоретические функции распределения наработок до отказа блоков синхронизации 1-го типа

распределение или предоставить окончательный выбор эксперту. Алгоритм методики идентификации вида закона распределения возникновения отказов оборудования на сети синхронизации представлен на рис. 5.

Если при помощи данной методики удалось получить результат, что наработка до отказа оборудования СС соответствует одному из законов распределения, можно утверждать, что параметры распределения показателей надежности оборудования СС являются функциями, и далее использовать в обработке указанные функции. Однако если полученная экспериментальная функция распределения наработок до отказа оборудования СС не соответствует ни одному из теоретических распределений, то в этом случае целесообразно использовать непараметрические методы прогнозирования показателей надежности.

К числу основных непараметрических способов прогнозирования показателей надежности оборудования СС относятся [3]: имитационное моделирование процесса функционирования СС, которое заключается в задании параметров модели, параметров нестационарности происходящих на СС процессов и последующем моделировании показателей надежности;

составление непараметрических математических моделей процессов функционирования, которое в основном используется при нестационарных режимах работы СС. В данном случае временной интервал функционирования СС, на котором на-

блюдается нестационарный режим, разбивается на последовательность интервалов, функционирующих в стационарном режиме. Таким образом, существует возможность получения показателей надежности для каждого интервала и последующей их обработки. При этом на каждом интервале возможно применение параметрического прогнозирования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика идентификации вида закона распределения наработок до отказа оборудования СС является ключевым элементом формирования и функционирования СУ СС. Данная методика, в основе которой лежит применение цензурированных выборок, позволяет качественно определять показатели надежности оборудования СС, с высокой долей вероятности прогнозировать состояние оборудования СС и определять предотказные состояния оборудования для его последующей замены или тщательной диагностики [8]. Это особенно важно в условиях эксплуатации, когда в значительной мере отсутствуют сведения о моментах возникновения отказов оборудования СС, а информация об отказах нередко носит неполный, неточный и недостоверный характер.

Используемые в методике подходы можно применить в другой предметной области телекоммуникационной системы, что в совокупности позволит существенно повысить эффективность СУ ТКС.

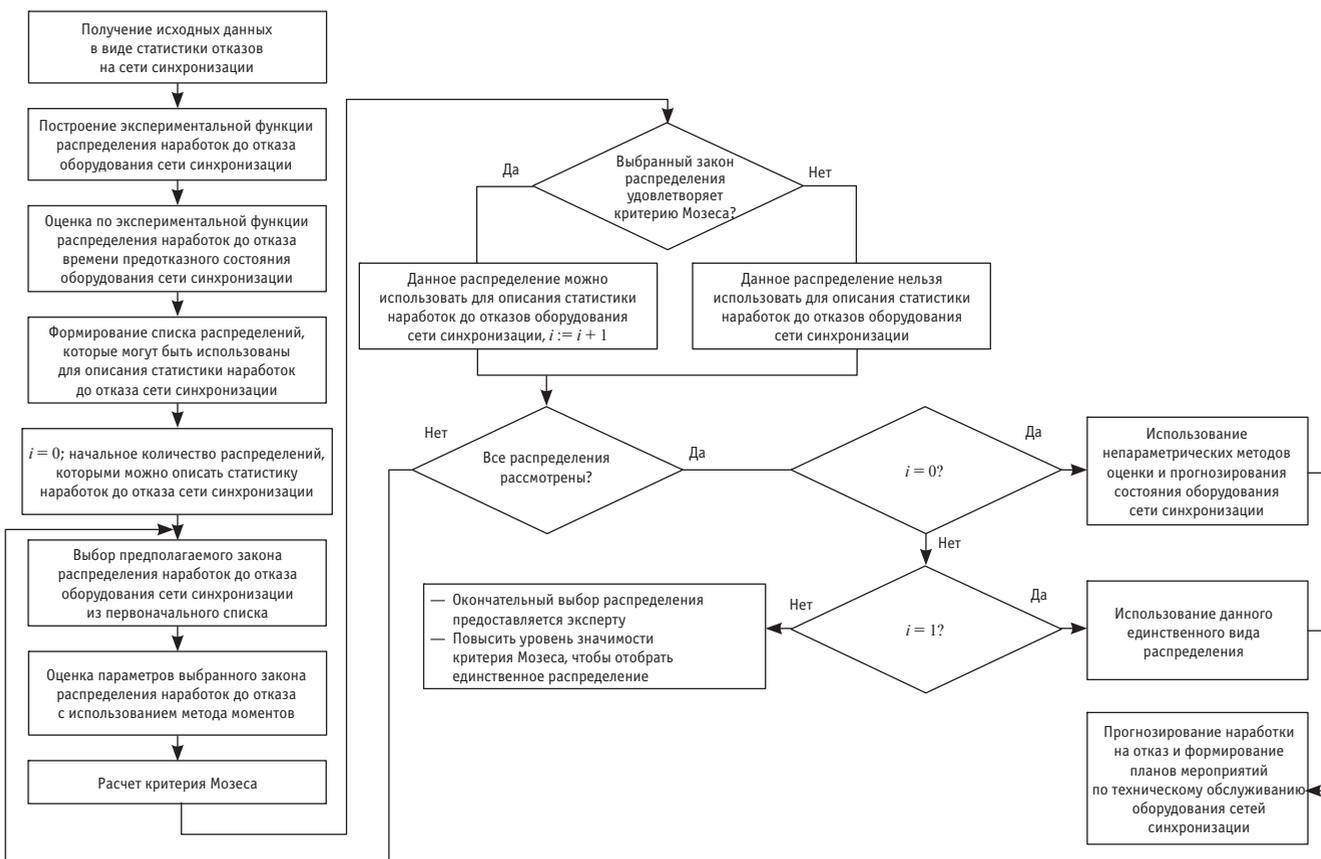


Рис. 5. Блок-схема методики идентификации вида закона распределения возникновения отказов на сети синхронизации

## Литература

1. Давыдкин П. Н., Колтунов М. Н., Рыжков А. В. Тактовая сетевая синхронизация. М. : Эко-Трендз, 2004. 205 с.
2. Буренин А. Н., Курносков В. И. Теоретические основы управления современными телекоммуникационными сетями : монография. М. : Наука, 2011. 464 с.
3. Научно-методические основы управления надежностью и безопасностью эксплуатации сетей связи железнодорожного транспорта : монография / В. К. Котов, В. Р. Антонен, Г. П. Лабетская и др. М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. 193 с.
4. Надежность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. ; под ред. И. А. Ушакова. М. : Радио и связь, 1985. 608 с.
5. Анализ надежности технических систем по цензурированным выборкам / В. М. Скрипник, А. Е. Назин, Ю. Г. Приходько и др. М. : Радио и связь, 1988. 184 с.
6. Камынина М. А., Канаев А. К., Опарин Е. В. Построение фрейм-овой модели представления знаний в интеллектуальной системе поддержки принятия решений системы управления сетью тактовой сетевой синхронизации // Бюллетень результатов научных исследований. 2012. № 2 (3). С. 59–68. ISSN 2223-9987.
7. Камынина М. А., Канаев А. К., Опарин Е. В. Формирование базы знаний интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению сетью тактовой сетевой синхронизации ОАО «РЖД» : сб. матер. второй междунар. науч.-практ. конф. «Интеллектуальные системы на транспорте». СПб., 2012. С. 238–244.
8. Канаев А. К., Опарин Е. В., Тошев А. К. Формирование модели процесса функционирования и восстановления сети тактовой сетевой синхронизации в условиях применения автоматизированной системы поддержки принятия решений // Бюллетень результатов научных исследований. 2011. № 1 (1). С. 41–55. ISSN 2223-9987.

## References

1. Davydkin P. N., Koltunov M. N., Ryzhkov A. V. Taktovaya setevaya sinkhronizatsiya [Clock network synchronization]. M. : Eko-Trendz, 2004. 205 p.
2. Burenin A. N., Kurnosov V. I. Teoreticheskie osnovy upravleniya sovremennymi telekommunikatsionnymi setyami : monografiya [Theoretical basis for modern telecommunications networks management : a monograph]. M. : Nauka, 2011. 464 p.
3. Nauchno-metodicheskie osnovy upravleniya nadezhnostyu i bezopasnostyu ekspluatatsii setey svyazi zheleznodorozhnogo transporta : monografiya [Scientific and methodical basis of reliability and operation safety management of rail transport communication networks : a monograph] / V. K. Kотов, V. R. Antonets, G. P. Labetskaya i dr. M. : FGBOU «Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2012. 193 p.
4. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem : spravochnik [Reliability of technical systems : a guide] / Yu. K. Belyaev, V. A. Bogatyrev, V. V. Bolotin i dr. ; pod red. I. A. Ushakova. M. : Radio i svyaz, 1985. 608 p.
5. Analiz nadezhnosti tekhnicheskikh sistem po tsenzurovannym vyborkam [Analysis of reliability of technical systems using censored samples] / V. M. Skripnik, A. E. Nazin, Yu. G. Prikhodko i dr. M. : Radio i svyaz, 1988. 184 p.
6. Kamynina M. A., Kanaev A. K., Oparin E. V. Postroenie freymovoy modeli predstavleniya znaniy v intellektualnoy sisteme podderzhki prinyatiya resheniy sistemy upravleniya setyu taktovoy setevoy sinkhronizatsii [Building frame model of knowledge representation in smart decision support system for clock synchronization network management system] // Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy. 2012. № 2 (3). P. 59–68. ISSN 2223-9987.
7. Kamynina M. A., Kanaev A. K., Oparin E. V. Formirovanie bazy znaniy intellektualnoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu setyu taktovoy setevoy sinkhronizatsii ОАО «RZD» : sb. mater. vtoroy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Intellektualnye sistemy na transporte» [Building a knowledge base for smart decision support system for clock synchronization network management system of JSC «Russian Railways» : a collection of materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Smart Transportation Systems»]. SPb., 2012. P. 238–244.
8. Kanaev A. K., Oparin E. V., Toshchev A. K. Formirovanie modeli protsessa funktsionirovaniya i vosstanovleniya seti taktovoy setevoy sinkhronizatsii v usloviyakh primeneniya avtomatizirovannoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy [Building a model of clock synchronization network operation and recovery process in the context of automated decision support system] // Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy. 2011. № 1 (1). P. 41–55. ISSN 2223-9987.

УДК 656.25

Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ (Современные транспортные технологии государства), Москва,  
Сергей Валентинович Бушуев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## МОДЕЛЬ РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ НА ОБСЛУЖИВАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЮ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Petr Alexeyevich Kozlov, DSc in Engineering, President of Research & Production Holding STRATEG (Modern National Transportation Technologies), Moscow,  
Sergey Valentinovich Bushuev, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Railway Automation, Telemechanics and Communication, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

### Model of rational allocation of limited resources for maintenance and modernization of railway automation systems

#### Аннотация

Предложена методология выбора рационального варианта использования выделенных ограниченных средств на совершенствование системы железнодорожной автоматики. Критерием является достижение максимального технологического эффекта, т. е. снижение технологического ущерба при вероятном выходе из строя тех или иных устройств автоматики.

Усредненный технологический ущерб возможного отказа конкретного устройства с учетом его расположения в структуре станции, роли в технологическом процессе, а также воздействия случайных процессов и диспетчерского управления определяется при помощи подробной имитационной модели.

Для выбора оптимального набора работ из огромного множества возможных вариантов предложена оригинальная модель — динамическая полно-поточковая задача.

Сочетание имитационного моделирования и модели динамической оптимизации позволит найти наилучший вариант совершенствования станционной системы автоматики при конкретных выделенных ресурсах.

**Ключевые слова:** железнодорожная автоматика, технологический ущерб, имитационная модель, динамическая потоковая задача, оптимальное распределение ресурсов.

#### Summary

A methodology for the selection of efficient option of use of limited resources allocated for improvement of railway automation system is proposed. The key criterion is to maximize process efficiency, i. e. reduce process damage in the event of probable failure of various automation devices.

Averaged process damage resulting from possible failure of a particular device with regard to its position in station structure, its role in the process, as well as the impact of random processes and supervisory control is determined using detailed simulation model.

To select the optimal set of works from multiple options, an original model is offered — a dynamic full-flow problem.

The combination of simulation and dynamic optimization model will help find the best option for improving station automation system using specific allocated resources.

**Keywords:** railway automation, process damage, simulation model, dynamic flow problems, optimal allocation of resources.

#### 1. ПРОБЛЕМА

По оценке специалистов ОАО «РЖД» в отрасли порядка 50–60% устройств автоматики эксплуатируются со сверхнормативными сроками. Рассчитывать на скорое их обновление, особенно в современных условиях, не приходится. Естественным видится поиск компромисса между стремлением максимально снизить вероятность выхода из строя средств автоматики и минимизацией затрат [1], т. е. сопоставление возможного технологического ущерба при отказе тех или иных устройств с затратами на их обновление [2] и эксплуатацию [3].

Однако для этого необходимо разработать методологические основы решения таких двух возникающих проблем, как: оценка реального технологического ущерба при выходе из строя конкретных устройств на определенной станции в условиях заданных потоков, конкретной структуры и конкретной технологии;

выбор рационального набора работ по обслуживанию или модернизации систем автоматики с учетом выделенного объема средств.

В первом случае предлагается использовать имитационное моделирование, так как только этот метод позволит учесть перечисленные выше факторы. Технологический ущерб от выхода из строя того или иного устройства может быть разным, в зависимости от расположения устройства в структуре системы, числа и характера структурных связей, особенностей использования в технологическом процессе. Например, при выходе из строя стрелочного привода возникает запирающее действие стрелки в определенном положении, вследствие чего уменьшается вариантность выполнения технологических операций, возрастает нагрузка на другие элементы структуры, что приводит к увеличению задержек и соответственно технологического ущерба. Эта проблема уже получила освещение в научной литературе [4].

Введем термин «структурно-функциональное совершенствование (СФС) устройств железнодорожной автоматики», под которым будем понимать любые работы по замене старых устройств на новые, модернизацию старых устройств, их усовершенствование (это в большей степени можно отнести к структурному совершенствованию), а также работы по обслуживанию, которые должны обеспечить или улучшить качество выполнения функции (функциональное совершенствование).

Тогда вторую проблему (выбор рационального способа СФС при выделенных средствах), по мнению авторов, можно решить с помощью аппарата оптимизации на основе потоковой задачи. При этом сущность работы заменим на поток средств, который необходим для ее выполнения. Таким образом, будем считать, что работа по СФС полностью выполнена, если освоены все необходимые для этого средства. Аппарат оптимизации должен выбрать, как распределить выделенный поток средств, чтобы он был освоен с максимальным эффектом.

## 2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПОТОКОВОЙ ЗАДАЧИ БЕЗ УЧЕТА ВРЕМЕНИ

На первом этапе рассмотрим статическую потоковую задачу (без учета времени) для СФС устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) в условиях ограниченных ресурсов (рис. 1).

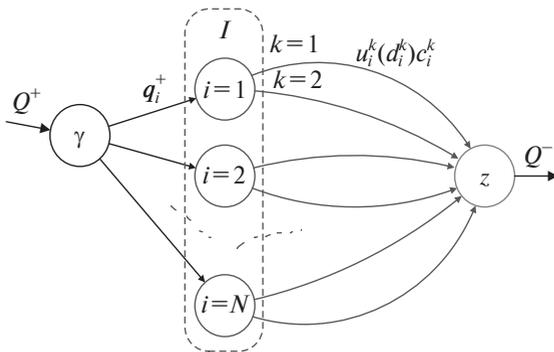


Рис. 1. Потокоская схема СФС устройств железнодорожной автоматики

На модернизацию всех устройств выделен ограниченный объем финансирования  $Q^+$ . В состоянии  $\gamma$  поток средств распределяется на потоки  $q_i^+$ , достаточные для выполнения работ над каждым  $i$ -м устройством СЦБ. Нераспределенные средства при наличии остатка, недостаточного для завершения работы с устройством СЦБ, сохраняются в этом состоянии.

Множество состояний  $I$  соответствует множеству устройств автоматики от 1 до  $N$ , с каждым из которых можно выполнять несколько взаимоисключающих видов работ по СФС, а значит, по снижению технологических потерь. Эти работы на рис. 1 обозначены дугами  $iz$  с номерами  $k$ . Сама модель не ограничивает число возможных вариантов повышения надежности устройств СЦБ, но мы будем рассматривать два варианта СФС, например: замену устройства на новое ( $k = 1$ ) или дополнительное обслуживание ( $k = 2$ ). Вообще-то, сущность вариан-

тов нужно рассматривать в каждом конкретном случае и для каждого устройства, важно, что они должны быть взаимоисключающими, обладать разными затратами на реализацию и/или давать разный технологический эффект.

На самом деле существует третий вариант — ничего дополнительно не делать с устройством (в этом случае средства не будут расходоваться и дополнительной дуги на схеме не требуется, просто поток освоения средств не пройдет ни по одной из дуг).

Каждая дуга, обозначающая один из видов работ с  $i$ -м устройством СЦБ, характеризуется:

пропускной способностью  $d_i^k$ , которая показывает необходимое количество средств для выполнения данной работы; технологическим эффектом  $c_i^k$  — снижением технологических потерь от отказов,

$$c_i^k = \Delta p_i^k C_i + C_i^n, \quad (1)$$

где  $\Delta p_i^k$  — уменьшение вероятности отказа  $i$ -го устройства при реализации  $k$ -го варианта СФС;

$C_i$  — технологические потери на станции при отказе  $i$ -го устройства;

$C_i^n$  — снижение технологических потерь на станции после СФС  $i$ -го устройства.

В случае если работа выполняется, то поток  $u_i^k$  по дуге равен пропускной способности, так как для завершения работы над устройством должны быть освоены все необходимые средства на СФС. Если работа не выполняется, то поток по дуге равен 0. Поэтому предлагаемую модель можно назвать полно-потоковой, т. е. когда поток по дуге существует, то он полный, равен пропускной способности.

Учитывая эту особенность, заменим поток освоения средств на

$$u_i^k = d_i^k \cdot x_i^k, \quad (2)$$

где  $x_i^k \in \{0,1\}$  — двоичная переменная, обозначающая наличие или отсутствие потока по дуге.

Оптимальным по критерию максимума технологического эффекта будет вариант распределения средств на работы, отвечающий условию (3):

$$\sum_i \sum_k c_i^k \cdot x_i^k \rightarrow \max; \quad (3)$$

$$i \in I, k \in K, \quad (4)$$

где  $I$  — множество устройств, над которыми возможны работы по улучшению;

$K$  — множество вариантов выполнения работ по улучшению каждого устройства.

### 2.1. Ограничения

Баланс распределения средств на СФС устройств:

$$q_\gamma = Q^+ - \sum_i q_i^+. \quad (5)$$

Баланс распределения средств по вариантам СФС устройства:

$$q_i^+ = \sum_k d_i^k \cdot x_i^k. \quad (6)$$

Уравнение, обеспечивающее выбор только одного варианта СФС для каждого устройства:

$$\sum_k x_i^k \leq 1. \quad (7)$$

В общем случае количество вариантов, которые необходимо рассмотреть, равно  $(k + 1)^i - 1$ , в нашем случае при наличии 100 устройств число вариантов составит  $5 \cdot 10^{47}$ . Тем не менее эта задача может быть решена сравнительно просто стандартными методами линейного программирования.

### 3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ С УЧЕТОМ ВРЕМЕННОГО ФАКТОРА

Для учета временного фактора можно использовать разработанный математический аппарат динамической транспортной задачи [5], предусматривающий дополнительные ограничения на потоки.

Все процессы, начиная с выделения денег и получения материальных ресурсов и заканчивая проведением самих работ, требуют времени, и нужно выбирать как набор задач, так и их рациональную последовательность. К тому же ограничения могут быть заданы не только по средствам, но и по срокам.

Поэтому задачу СФС устройств железнодорожной автоматики надо рассматривать как динамическую. Общая идея постановки задачи рационального распределения средств на СФС сохраняется, но вводится зависимость переменных потоков от времени. Обычно при решении динамическая задача сводится к статической методом разложения во времени.

Модель представляет собой аппарат для выбора оптимального распределения средств на СФС устройств автоматики по критерию «максимум технологического эффекта» с учетом временного фактора. Структура модели — потоковый граф, по дугам которого перемещаются потоки средств, выделяемых для рассматриваемых объектов и осваиваемых на тот или иной вариант СФС (рис. 2). Для приведения задачи к статической время дискретизировано, все дуги могут размножаться во времени, но на схеме приводится только одна из возможных реализаций потока. Учитывая возможность выбирать любой сколь угодно малый интервал дискретизации и начинать работы в любое время, индексы текущего времени далее явным образом указывать не будем.

На рис. 2 приведены следующие обозначения:

$Q^+(t)$  — выделенные средства в момент времени  $t$ ;

$Q^-(t)$  — освоенные средства в момент времени  $t$ ;

$q_i^+(t)$  — средства, выделенные на  $i$ -й объект;

$u_i^k(t)$  — выполненная работа (величина потока) на  $i$ -м объекте с затратами  $U_i^k$ , которые равны пропускной способности дуги  $d_i^k$ ;

$x_i^k(t) \in \{0,1\}$  — выполненная работа на  $i$ -м объекте с затратами  $U_i^k$ ;

$\tau_i$  — продолжительность операции, обозначенной дугой, т. е. время выполнения работы  $u_i^k(t)$  или время выделения ресурса  $q_i^+(t)$ ;

$u_{zz}(t)$  — потоки по соединительным дугам после завершения работ;

$q_\gamma(t)$  — остаток неосвоенных средств;

$q_f(t)$  — средства из фиктивного источника;

$Q_f^-$  — фиктивный сток;

$Q_f^+$  — фиктивный источник.

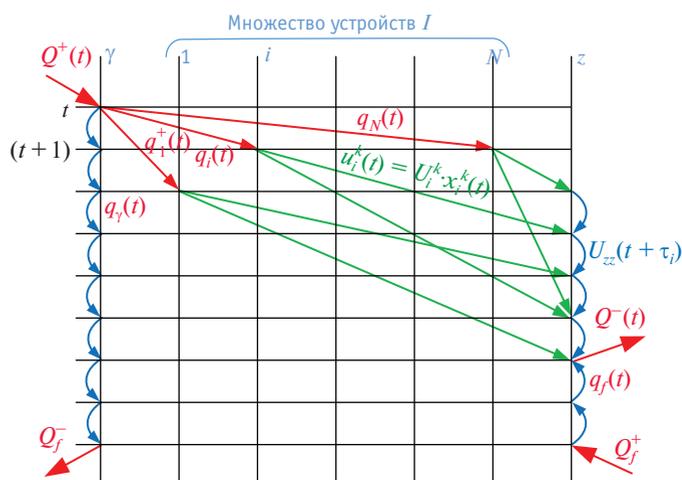


Рис. 2. Схема динамической потоковой модели СФС

Зеленые дуги (см. рис. 2) имитируют выполнение некоторой работы на объекте. Величина потока соответствует израсходованным средствам, время хода по дуге — продолжительности выполняемой операции. Разница в продолжительности работ по разным вариантам для построения математической модели не имеет принципиального значения. При необходимости схема меняется. Эффект от работы возникает только тогда, когда она полностью выполнена или, иначе говоря, средства освоены полностью. Поэтому потоки по зеленым дугам могут быть либо равны 0 (работа не выполнялась), либо равны пропускной способности дуги, соответствующей затратам на выполнение данной работы  $U_i^k$ . Это обстоятельство может быть представлено в модели через двоичную переменную  $x_i^k(t) \in \{0,1\}$ , тогда поток средств по дуге будет выражен как

$$u_i^k(t) = U_i^k \cdot x_i^k(t). \quad (8)$$

Фиктивный сток вводится для поглощения остатка средств, которых не хватит ни для какой операции. Фиктивный источник, как следствие предыдущего, — для баланса производства и потребления. Вообще-то, эта процедура в компьютерной реализации задач линейного программирования является стандартной, чтобы не возникала проблема неразрешимости.

## 4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

### 4.1. Содержательная постановка задачи

Распределить выделенные средства на проведение некоторых операций с устройствами автоматики так, чтобы получить максимальный технологический эффект. Под этим понимается максимальное снижение возможного технологического ущерба от ненадежной работы устройств или снижение технологических простоев на станции за счет разгрузки лимитирующих элементов. Важное замечание — средства уже выделены в известном объеме, требуется использовать их максимально эффективно, расчет экономической эффективности в задачу не входит.

### 4.2. Формальная постановка задачи

#### 4.2.1. Функционал

Максимум технологического эффекта от выполненных работ при заданных средствах (снижение возможных технологических потерь):

$$\sum_i \sum_k c_i^k \cdot x_i^k(t) \rightarrow \max; \quad (9)$$

$$i \in I, k \in K, t \in T, \quad (10)$$

где  $I$  — множество устройств, над которыми возможны работы по улучшению;

$K$  — множество вариантов выполнения работ по улучшению каждого устройства;

$T$  — множество интервалов времени, полученных при преобразовании динамической задачи;

$c_i^k$  — эффект от затраченных средств на  $i$ -м устройстве по  $k$ -му варианту (сэкономленные технологические потери при выходе из строя устройства или снижение потерь от простоев при выполнении технологических операций на станции),

$$c_i^k = \Delta p_i^k C_i + \Delta C_i^{\Pi}, \quad (11)$$

где  $C_i$  — технологический ущерб при выходе из строя  $i$ -го устройства, значение определяется путем моделирования вариантов работы станции при выходе обозначенного устройства из строя;

$\Delta p_i^k$  — снижение вероятности выхода из строя  $i$ -го объекта после выполнения работы на нем по  $k$ -му варианту;

$\Delta C_i^{\Pi}$  — снижение потерь от простоев при выполнении технологических операций на станции после выполнения работ на  $i$ -м устройстве, значение определяется путем моделирования вариантов работы станции до и после СФС устройства.

Для приведенной постановки задачи выбрана схема работы на объекте из двух вариантов — с заменой оборудования или с некоторым совершенствованием без замены (частичный ремонт, организация специального контроля и т. п.). Возможно применение схемы из нескольких вариантов, но это приводит к росту размерности задачи и усложняет получение исходных данных.

#### 4.2.2. Ограничения

Баланс распределения средств по объектам:

$$q_{\gamma}(t) = q_{\gamma}(t-1) + Q^+(t-1) - \sum_i q_i^+(t). \quad (12)$$

Баланс распределения средств по видам работ:

$$q_i(t - \tau_i) = \sum_k U_i^k \cdot x_i^k(t). \quad (13)$$

Уравнение связи описывающих работу дуг освоения средств:

$$u_{zz}(t) = u_{zz}(t-1) + \sum_i \sum_k U_i^k \cdot x_i^k(t - \tau_i^k). \quad (14)$$

Уравнение, обеспечивающее выбор только одного вида работ:

$$\sum_t \sum_k x_i^k(t) \leq 1. \quad (15)$$

Обеспечение баланса выделенных и потребленных средств:

$$Q^+(t) = Q^-(t). \quad (16)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод сочетания имитационного моделирования и оригинальной модели динамической оптимизации позволяет выбирать наилучший вариант структурно-функционального совершенствования системы железнодорожной автоматики по критерию максимума технологического эффекта при конкретных выделенных ресурсах.

## Литература

1. Внедрение методологии УРРАН в хозяйстве автоматики и телемеханики / В. А. Гапанович, Б. Ф. Безродный, А. В. Горелик и др. // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 4. С. 12–16. ISSN 0005-2329.
2. Управление надежностью функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики по экономическому критерию / Б. Ф. Безродный, А. В. Горелик, Д. В. Шалягин и др. // Экономика железных дорог. 2011. № 3. С. 3–13. ISSN 1727-6500.
3. Бушуев С. В. Автоматизация диспетчерского управления на малоделятельных участках железных дорог : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2001. 203 с.
4. Тимухина Е. Н. Методология исследования работоспособности станций при технологических сбоях // Транспорт Урала. 2011. № 4 (31). С. 58–62. ISSN 1815-9400.
5. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. Вып. 3. С. 521–531. ISSN 0424-7388.

## References

1. Vnedrenie metodologii URRAN v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki [Implementation of URRAN methodology at automation and telemechanics facilities] / V. A. Gapanovich, B. F. Bezrodnyy, A. V. Gorelik i dr. // Avtomatika, svyaz, informatika. 2012. № 4. P. 12–16. ISSN 0005-2329.
2. Upravlenie nadezhnostyu funktsionirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki po ekonomicheskomu kriteriyu [Operational reliability management of railway automation and telemechanics systems using economic criterion] / B. F. Bezrodnyy, A. V. Gorelik, D. V. Shalyagin i dr. // Ekonomika zheleznykh dorog. 2011. № 3. P. 3–13. ISSN 1727-6500.
3. Bushuev S. V. Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya na malodeyatelnykh uchastkakh zheleznykh dorog : dis. ... kand. tekhn. nauk [Automation of supervisory control on low-traffic areas of railways : PhD in Engineering Thesis]. SPb., 2001. 203 p.
4. Timukhina E. N. Metodologiya issledovaniya rabotosposobnosti stantsiy pri tekhnologicheskikh sboyah [A methodology for study of operating capability of railway stations in case of technology failures] // Transport of the Urals. 2011. № 4 (31). P. 58–62. ISSN 1815-9400.
5. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Optimizatsiya struktury transportnykh potokov v dinamike pri prioritete potrebiteley [Optimization of traffic flow structure with account to dynamics with priority to customers] // Ekonomika i matematicheskie metody. 1982. T. XVIII. Vol. 3. P. 521–531. ISSN 0424-7388.

УДК 656.078

**Юрий Александрович Быков, доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование и строительство железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ),**  
**Анатолий Борисович Васильев, кандидат технических наук, профессор кафедры «Проектирование и строительство железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ),**  
**Валентина Андреевна Фадеева, аспирант кафедры «Проектирование и строительство железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ)**

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРОВ РОССИИ В СООБЩЕНИИ ЕВРОПА — АЗИЯ

**Yuriy Alexandrovich Bykov, DSc in Engineering, Professor, Department of Railway Design and Construction, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT),**  
**Anatoliy Borisovich Vasilyev, PhD in Engineering, Professor, Department of Railway Design and Construction, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT),**  
**Valentina Andreyevna Fadeeva, graduate student, Department of Railway Design and Construction, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)**

## Prediction of development of Russian transport corridors between Europe and Asia

### Аннотация

В статье предложен подход к оценке конкурентоспособности транспортных связей. Он позволяет на этапе прогнозирования (предпроектном) отсеять заведомо неконкурентные варианты. При этом учитываются различные показатели, имеющие как количественную, так и качественную форму выражения.

**Ключевые слова:** транспортный коридор, оценка конкурентоспособности варианта, метод идеальной точки.

### Summary

This paper proposes an approach to assessment of competitiveness of transport links. It allows to eliminate obviously non-competitive options at prediction (pre-design) phase, taking into account various characteristics that are represented both in quantitative and qualitative form.

**Keywords:** transport corridor, option competitiveness assessment, ideal point method.

Сложившаяся к настоящему времени схема транспортных сообщений между Европой, Россией, Японией и большинством стран Азиатско-Тихоокеанского региона основана на перевозках по Транссибирской железнодорожной магистрали и дальнейшей перевалке грузопотока на море через порты Дальневосточного бассейна (в Приморском крае — Владивосток, Находка, Восточный, на севере Хабаровского края — Ванино, Советская Гавань).

Существующие объемы грузопотоков на этих направлениях, а главное, перспектива их роста в ближайшее десятилетие по транзитным перевозкам на Транссибе и на море в каботаже потребуют значительного повышения пропускных и провозных способностей Транссибирской магистрали, развития железнодорожных подходов к портам и увеличения перерабатывающих мощностей самих портов всего Дальневосточного бассейна России. Решение указанных задач в рамках сложившейся транспортной схемы сопряжено со значительными капитальными вложениями, а порой практически неосуществимо в отношении портового хозяйства Владивостока, Находки и Советской Гавани.

В то же время совершенно не используются возможности развития и переработки грузопотоков в транзитных и каботажных перевозках через порты Сахалина из-за отсутствия прямого железнодорожного сообщения с материком. По существу, порты Сахалина (Корсаков, Хомск, Невельск), оставаясь внутриобластными, не получали должного развития, а их потенциал до настоящего времени недоиспользован. Решение задачи транспортного перехода через пролив Невельского и Лаперуза открывает возможности для формирования нового транзитного транспортного коридора «материк — о. Сахалин — Япония».

В качестве существующих и перспективных альтернатив чаще всего рассматриваются пять вариантов международных транспортных коридоров (МТК) в сообщении Европа — Азия:

МТК 1 — морской маршрут вокруг Евразийского материка через Суэцкий канал (существующий и ныне основной);

МТК 2 — Северный морской путь;

МТК 3 — железнодорожный маршрут TRACECA через страны Средней и Центральной Азии;

МТК 4 — железнодорожный маршрут Транссиб;

МТК 5 — новый железнодорожный маршрут Севсиб.

Транспортный коридор Севсиб общей протяженностью около 10 тыс. км сформирован из ряда существующих и новых железнодорожных линий. В частности, на дальневосточном участке Северо-Сибирской магистрали должен быть реализован проект железнодорожной линии Селихино — Ныш протяженностью 650 км с мостовым (тоннельным) переходом через пролив Невельского на Сахалин и окончанием перешивки Сахалинской железной дороги с японской колеи 1067 мм на общероссийскую стандарта 1520 мм [1]. На материке в состав Севсиба включается весь главный ход Байкало-Амурской магистрали — от Комсомольска-на-Амуре до Усть-Илимска протяженностью 3,5 тыс. км. В Восточно-Сибирском и Западно-Сибирском регионах от Усть-Илимска до Нижневартовска строятся соединительные участки между конечными тупиковыми станциями рокадных меридиальных железнодорожных линий: Хребтовая — Усть-Илимская, Решеты — Богучаны, Ачинск — Абалаково, Асино — Белый Яр, таким образом, образуется главный ход будущей магистрали протяженностью 1990 км [2, 3]. Далее от Нижневартовска до западной границы магистраль должна проходить по линиям существующей железнодорожной сети дорог ОАО «РЖД».

На этапе прогнозирования развития транспортных коридоров России необходимо оценить их конкурентоспособность по сравнению с другими вариантами МТК.

Конкурентоспособность варианта транспортной связи следует рассматривать как его преимущество по отношению к другим вариантам и внутри страны, и за ее пределами, т. е. конкурентоспособность можно выявить только сравнением вариантов с точки зрения потребителя транспортных услуг.

В этом смысле каждый вариант транспортных связей должен отвечать таким основным требованиям, как соизмеримость: возможностей выполнения транспортных услуг (реализация одинаковых по объему размеров перевозок грузов и их номенклатуры);

сегментов рынка, для которых выполняются транспортные услуги;

фазы жизненного цикла, в которой функционирует вариант транспортной связи.

С учетом необходимости выполнения этих требований, в первую очередь сопоставимости вариантов МТК, процедуру оценки конкурентоспособности вариантов представляется целесообразным разбить на два этапа.

I этап предполагает их наличие (существование) и готовность к выполнению транспортных услуг.

II этап выполняется за период всего их жизненного цикла, предусматривающего учет потребных инвестиций и сроков

их реализации для создания устойчивой транспортной связи (новое железнодорожное строительство, реконструкция существующей транспортной инфраструктуры и т. д.) по каждому варианту и, как правило, многовидовую транспортную инфраструктуру (железнодорожный, морской, автомобильный транспорт, которые должны работать в едином технологическом комплексе).

На I этапе для оценки конкурентоспособности учитываются показатели (критерии), которые в первую очередь отражают особенности варианта с точки зрения выполнения транспортных услуг, оказываемых потребителю (отправителю и получателю грузов):

длина варианта транспортной связи;

продолжительность доставки грузов;

стоимость доставки грузов;

надежность доставки грузов;

сохранность грузов в период транспортировки;

количество перевалочных операций (с одного вида транспорта на другой) по мере прохождения грузов по маршруту следования;

возможность отслеживания прохождения грузов по маршруту;

соответствие существующим техническим условиям и стандартам обеспечения транспортных услуг;

уровень рекламно-информационного обеспечения;

обеспечение безопасности прохождения грузов по маршруту следования;

влияние природно-климатических условий на перемещение грузов;

политико-экономическая ситуация в районе (регионе, стране) прохождения маршрута и т. д.

Количество таких показателей может быть уменьшено или, наоборот, увеличено в зависимости от целей оценки конкурентоспособности вариантов транспортных связей, их числа и специфических особенностей использования различных видов транспорта.

Перечисленные показатели могут быть выражены в натуральном виде (например, км, ч, руб. и т. д.) или оценены только качественно. В любом случае речь идет о многокритериальной оценке конкурентоспособности вариантов транспортных связей.

На данном этапе может быть использован метод идеальной точки, позволяющий оценить конкурентоспособность каждого варианта по принятым показателям и выстроить ранжированную последовательность по полученному обобщенному показателю.

Это информация для лица, принимающего решение (ЛПР), при помощи которой он видит преимущества и недостатки каждого варианта по рассматриваемым показателям [4].

Идеальная точка в данном методе — идеальный вариант в многомерном пространстве критериев (показателей), имеющий экстремальные значения всех рассматриваемых критериев.

Алгоритм используемого метода может быть изложен в следующем виде.

1. Рассматриваются варианты транспортных связей, каждому из них присваивается порядковый номер ( $i = 1, \dots, N$ ).



2. Отбираются показатели для оценки конкурентоспособности, каждому из них присваивается порядковый номер ( $j = 1, \dots, K$ ).

3. Для показателей, имеющих натуральную форму выражения, определяются численные значения  $j$ -го показателя для каждого  $i$ -го варианта  $R_{ij}$  (например, длина  $i$ -го варианта  $L_i$  км).

4. Для показателей, отражающих качественную оценку, может быть использована степень их предпочтения (высокая, средняя, низкая). При этом целесообразно применять также шкалу оценки, например, от 1 до 5 с интервалом через один. Так, высокой качественной оценке соответствует цифра 5, средней — 3, низкой — 1. Это позволяет представить качественную оценку в виде численного значения  $R_{ij}$ .

5. Формируется табл. 1, в которой для каждого из вариантов приведено значение полученных показателей.

Таблица 1

Показатели оценки конкурентоспособности вариантов транспортных связей  $R_{ij}$

Варианты	Показатели оценки			
	1	2	...	$K$
1	$R_{11}$	$R_{12}$	...	$R_{1K}$
2	$R_{21}$	$R_{22}$	...	$R_{2K}$
...	...	...	...	...
$N$	$R_{N1}$	$R_{N2}$	...	$R_{NK}$

6. Метод предлагает определение «расстояния»  $\rho_i$  между идеальной точкой, в которую помещается условно лучший вариант по всем показателям, и альтернативной точкой ( $i$ -й вариант):

$$\rho_i = \sqrt{\sum_{j=1}^K r_{ij}^2}.$$

Для максимизируемых показателей:

$$r_{ij} = \frac{R_{\max_{ij}} - R_{ij}}{R_{\max_{ij}} - R_{\min_{ij}}}.$$

Для минимизируемых показателей:

$$r_{ij} = \frac{R_{ij} - R_{\min_{ij}}}{R_{\max_{ij}} - R_{\min_{ij}}}.$$

Здесь  $R_{ij}$  — значение  $j$ -го показателя для  $i$ -го варианта;  $R_{\max_{ij}}$  — максимальное значение  $j$ -го показателя для  $i$ -го варианта;

$R_{\min_{ij}}$  — минимальное значение  $j$ -го показателя для  $i$ -го варианта;

$r_{ij}$  — нормализованное значение  $j$ -го показателя для  $i$ -го варианта;

$K$  — число показателей,  $j = 1, \dots, K$ ;

$N$  — число вариантов,  $i = 1, \dots, N$ .

7. С использованием приведенных формул заполняется табл. 2.

Таблица 2

Значения нормализованных показателей  $r_{ij}$  и обобщенных показателей  $\rho_i$

Варианты	Нормализованные показатели				Обобщенные показатели $\rho_i$
	$r_1$	$r_2$	...	$r_K$	
1	$r_{11}$	$r_{12}$	...	$r_{1K}$	$\rho_1$
2	$r_{21}$	$r_{22}$	...	$r_{2K}$	$\rho_2$
...	...	...	...	...	...
$N$	$r_{N1}$	$r_{N2}$	...	$r_{NK}$	$\rho_N$

8. Полученные результаты позволяют оценить конкурентоспособность рассматриваемых вариантов по каждому из предложенных показателей и выбрать наиболее конкурентоспособный.

Необходимо отметить, что данный метод не определяет оптимальный вариант, а позволяет ЛПР оценить конкурентоспособность варианта относительно его близости к идеальному.

**Пример.** Рассмотрим три варианта транспортных связей между заданными пунктами А и Б. Для оценки конкурентоспособности используем четыре показателя: протяженность варианта  $L$ , время перевозки по маршруту следования  $t$ , стоимость перевозки  $C$ , сохранность грузов во время следования по маршруту СХГ. Качественный показатель СХГ оценивается как низкая, средняя и высокая степень сохранности или по шкале оценки 1–5 через единицу.

Рассматриваемые показатели приведены в табл. 3.

Таблица 3

Натуральные показатели по вариантам

Вариант	Протяженность $L$ , км	Время доставки грузов $t$ , ч	Стоимость перевозки груза $C$ , руб./т	Сохранность грузов СХГ	
				Качественная оценка	Бальная оценка
1	1622	74	598,4	Высокая	5
2	1822	69	700,8	Средняя	3
3	1750	58	526,5	Низкая	1

Используя для многокритериальной оценки конкурентоспособности рассмотренных вариантов метод идеальной точки, определим значения  $r_{ij}$  и обобщенные показатели вариантов  $\rho_i$  (табл. 4).

Таблица 4

Обобщенные показатели  $\rho_i$

Вариант	Значение $r_{ij}$				Обобщенный показатель $\rho_i$
	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	
1	0,0	1,0	0,413	0,0	1,082
2	1,0	0,687	1,0	0,5	1,647
3	0,640	0,0	0,0	1,0	1,187

Идеальным считаем вариант, имеющий минимальные значения показателей  $L$ ,  $t$  и  $C$  и наибольший показатель СХГ.

Наиболее близок к идеальному 1-й вариант ( $\rho_1 = 1,082$ ), ему конкурентоспособен 3-й вариант ( $\rho_3 = 1,187$ ), им обоим заметно уступает 2-й вариант ( $\rho_2 = 1,647$ ).

Следует подчеркнуть, что предлагаемый метод идеальной точки в наибольшей степени отвечает принципу оценки конкурентоспособности: оценка конкурентоспособности варианта должна осуществляться на основе сравнения его показателей с вариантом-лидером в сфере транспортных услуг в стране и за ее пределами, в нашем случае — с «идеальным» вариантом.

Для оценки сильных и слабых сторон каждого из конкурирующих вариантов, а также возможностей и угроз со стороны внешней среды целесообразно использовать и SWOT-анализ [5].

На II этапе, когда речь идет о рассмотрении всего жизненного цикла варианта (проект — строительство — эксплуатация), величина которого может достигать 100 лет и более, необходимо определить денежные показатели (потребные инвестиции, доходы и расходы), т. е. выйти на технико-экономическую оценку инвестиционных показателей с использованием известных экономических показателей сравнительной и общественной эффективности [6].

Таким образом, предлагаемый подход к оценке конкурентоспособности позволяет на этапе прогнозирования (предпроектном) отсеять заведомо неконкурентные варианты транспортных связей. При этом учитываются различные показатели, имеющие как количественную, так и качественную форму выражения.

## Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года / утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.08 № 877-р [Электронный ресурс]. URL: [http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=13009](http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13009) (дата обращения: 29.10.2013).
2. Северные и восточные районы России — важнейший полигон расширения сети железных дорог страны в XXI веке / В. А. Копыленко, Ю. А. Быков, В. М. Круглов и др. // Транспортное строительство. 2008. № 4. С. 2–4. ISSN 0131-4300.
3. Расширение сети железных дорог в малоосвоенных регионах России — одна из важных задач развития железнодорожного транспорта страны в XXI веке / В. А. Копыленко, Ю. А. Быков, И. В. Турбин и др. // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта : спецвыпуск. 2008. С. 4–7.
4. Гавриленков А. В., Шолин В. В. Формирование множества вариантов железных дорог на стадии аванпроектирования // Транспортное строительство. 1990. № 7. С. 11–13. ISSN 0131-4300.
5. Котлер Ф. Маркетинг, менеджмент. Экспресс-курс : 2-е изд. / Пер. с англ. ; под ред. С. Г. Божук. СПб. : Питер, 2006. 464 с.
6. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. М. : Теринвест, 1994. 80 с.

## References

1. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda / utv. rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 17.06.08 № 877-r [Strategy for Developing Rail Transport in the Russian Federation up to 2030 / ratified by Resolution of the Federal Government of 17.06.08 No. 877-r]. [Electronic resource]. URL: [http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=13009](http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13009) (date accessed: 29.10.2013).
2. Severnye i vostochnnye rayony Rossii — vazhneyshiy poligon rasshireniya seti zheleznykh dorog strany v XXI veke [Northern and eastern regions of Russia as a major site for expansion of national railway network in the XXI century] / V. A. Kopylenko, Yu. A. Bykov, V. M. Kruglov i dr. // Transportnoe stroitelstvo. 2008. № 4. P. 2–4. ISSN 0131-4300.
3. Rasshirenie seti zheleznykh dorog v maloosvoennykh regionakh Rossii — odna iz vazhnykh zadach razvitiya zheleznodorozhnogo transporta strany v XXI veke [Expansion of railway network in underdeveloped regions of Russia is one of the important tasks of national railway transport development in the XXI century] / V. A. Kopylenko, Yu. A. Bykov, I. V. Turbin i dr. // Nauka i transport. Modernizatsiya zheleznodorozhnogo transporta : spetsvypusk. 2008. P. 4–7.
4. Gavrilenkov A. V., Sholin V. V. Formirovaniye mnozhestva variantov zheleznykh dorog na stadii avanproektirovaniya [Development of multiple railway options at pre-design stage] // Transportnoe stroitelstvo. 1990. № 7. P. 11–13. ISSN 0131-4300.
5. Kotler F. Marketing, menedzhment. Ekspress-kurs : 2-e izd. [Marketing management. Express course : 2nd ed.] / Per. s angl. ; pod red. S. G. Bozhuk. SPb. : Piter, 2006. 464 p.
6. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov i ikh otboru dlya finansirovaniya [Guidelines for evaluating the effectiveness of investment projects and their selection for funding]. M. : Terinvest, 1994. 80 p.

УДК 629.014.7

**Александр Борисович Левин, генеральный директор ООО «Уральское конструкторское бюро вагоностроения», Нижний Тагил,**  
**Александр Васильевич Смольянинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,**  
**Александр Эдуардович Павлюков, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург**

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИЛИНЕЙНОГО РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**Alexander Borisovich Levin, General Director of LLC Uralskoye Konstruktorskoye Buro Vagonostroeniya, Nizhny Tagil,**  
**Alexander Vasiliyevich Smolyaninov, DSc in Engineering, Professor, Department of Railway Cars, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,**  
**Alexander Eduardovich Pavlyukov, DSc in Engineering, Professor, Department of Railway Cars, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg**

### Design of bilinear spring suspension of freight car bogies

#### Аннотация

Выбор схемы рессорного подвешивания определяется требованиями к обеспечению плавности хода, устойчивости и динамических качеств вагона, которые зависят от статического прогиба упругих элементов.

Перспективной является конструкция рессорного подвешивания с билинейной силовой характеристикой, обеспечивающая увеличенный статический прогиб в порожнем режиме и позволяющая оптимизировать силы трения в подвешивании вагона в порожнем состоянии и в состоянии частичной загрузки.

Разработанная методика проектирования билинейного подвешивания тележек грузового вагона дает возможность определять все необходимые параметры подвешивания в соответствии с техническими требованиями.

Компьютерное моделирование динамических характеристик тележек показало преимущество билинейного рессорного подвешивания по сравнению с линейным.

**Ключевые слова:** рессорное подвешивание, билинейное рессорное подвешивание, тележка грузового вагона, компьютерное моделирование.

#### Summary

Selection of spring suspension design is determined by the requirements to smoothness of movement, stability and dynamic qualities of the car, which depend on static deflection of elastic elements.

A promising design is analyzed — a spring suspension with bilinear force characteristic which provides increased static deflection when empty and allows optimizing friction force in car suspension when empty and at partial load.

The developed method of designing bilinear suspension of freight car bogies allows to define all the necessary parameters of suspension in accordance with the specifications.

Computer simulation of dynamic characteristics of bogie showed the advantage of bilinear spring suspension as compared to linear.

**Keywords:** spring suspension, bilinear spring suspension, freight car bogie, computer simulation.

**И**звестно, что конструкция рессорного подвешивания определяет основные динамические параметры вагона, в том числе его динамическое воздействие на путь. Стратегии развития железнодорожного транспорта предусматривают производство грузовых вагонов с осевыми нагрузками 25 тс (245 кН) и последующим ростом до 27–30 тс (265–294 кН) конструкционной скоростью 120–140 км/ч. В связи с возрастающим перепадом масс вагонов в порожнем и груженом состояниях существующая жесткость рессорного подвешивания не обеспечивает «спокойного» хода вагона на порожнем или малозагруженном режиме работы. В порожнем режиме движения грузовых вагонов на тележках типа мод. 18-100, имеющих одинарное линейное рессорное подвешивание, гасители колебаний практически не работают до скорости 60 км/ч. С другой стороны, новые вагоны по динамическому воздействию на путь не должны превышать величину воздействия существующих тележек [1, 2].

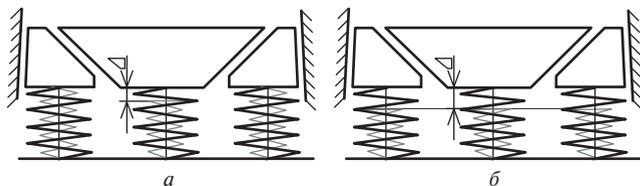
Важнейший фактор увеличения скорости движения вагонов — улучшение их динамических качеств, зависящих от рационального выбора типа и параметров рессорного подвешивания и гасителей колебаний. Эти параметры оказывают существенное влияние на устойчивость колеса от схода с рельсов, на сохранность перевозимых грузов, силы взаимодействия между колесом и рельсом и др.

Нормативные документы определяют ряд требований, которым должны удовлетворять тележки новых вагонов. Так, тележки вагона с минимальной расчетной массой должны иметь: расчетный статический прогиб подвешивания не менее 8 мм при расчетной статической нагрузке от колесной пары на рельсы 23,5–25 тс и 10 мм — при 27–30 тс; коэффициент относительного трения фрикционных гасителей колебаний в рессорном подвешивании не менее 0,09; разность полных статических прогибов рессорного подвешивания тележки не более

55 мм. Расчетные прогибы должны соответствовать условиям надежного сцепления и безопасного движения новых незагруженных вагонов с груженными вагонами, имеющими предельно изношенные ходовые части.

При проектировании рессорного подвешивания особое внимание необходимо уделить виду подвешивания и его компоновочной схеме. Выбор схемы рессорного подвешивания определяется требованиями по обеспечению плавности хода, устойчивости и динамических качеств вагона, которые зависят от статического прогиба упругих элементов [3].

Перспективной является конструкция рессорного подвешивания с билинейной силовой характеристикой, которая обеспечивает увеличенный статический прогиб в порожнем режиме и дает возможность оптимизировать силы трения в подвешивании вагона в порожнем состоянии и в состоянии частичной загрузки. Конструктивные схемы известных билинейных рессорных комплектов сводятся к трем вариантам исполнения (рис. 1).



**Рис. 1. Принципиальные конструктивные схемы рессорного подвешивания с билинейной силовой характеристикой:**

*a* — варианты с билинейными пружинами только под наддрессорной балкой; *б* — полностью билинейный рессорный комплект

В первом варианте (см. рис. 1а) рессорный комплект состоит из двухрядных пружин с билинейной силовой характеристикой, расположенных под наддрессорной балкой, и двух двухрядных подклиновых пружин с линейной силовой характеристикой. Под наддрессорной балкой и под клиньями используются однотипные наружные пружины. Внутренние пружины под наддрессорной балкой и под клиньями разные.

Во втором варианте в рессорном комплекте, так же как и в первом варианте, пружины с билинейной характеристикой предусмотрены только под наддрессорной балкой, однако под наддрессорной балкой и под клиньями используются однотипные внутренние пружины. Наружные пружины под наддрессорной балкой и под клиньями разные.

В третьем варианте (см. рис. 1б) рессорный комплект состоит из одинаковых билинейных пружин под клиньями и наддрессорной балкой.

Таким образом, в подвешивании с билинейной характеристикой применяются две схемы: одна с полностью билинейными двухрядными пружинами, другая — с билинейными пружинами только под наддрессорной балкой. Последняя схема является предпочтительной по сравнению с первой.

По мнению многих авторов, линейная силовая характеристика подклиновых пружин обеспечивает увеличение поджатия клина в порожнем режиме, предотвращает отрыв от фрик-

ционных планок на боковых рамах, а также повышает стабильность демпфирования при износах клиновой системы.

Поэтому рассмотрим алгоритм проектирования на примере подвешивания по схеме рис. 1а. К остальным видам исполнения билинейного подвешивания можно применить те же расчетные формулы, переработанные для конкретного случая.

После выбора вида рессорного подвешивания необходимо определить жесткости каждой из пружин, которые удовлетворяют величинам прогибов, указанным в технических требованиях на разработку тележки.

Статический прогиб вагона под тарой рассчитывается по формуле

$$f_{\text{пор}} = \frac{P_{\text{т}}}{C_{\Sigma\text{пор}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{т}}$  — статическая нагрузка на рессорный комплект для тары вагона, кН;

$C_{\Sigma\text{пор}}$  — суммарная вертикальная жесткость пружин рессорного комплекта для вагона в порожнем состоянии, кН/м.

При  $f_{\text{пор}} \leq \Delta$  точка перегиба силовой характеристики определяется как

$$P_{\text{пер}} = C_{\Sigma\text{пор}} \cdot \Delta, \quad (2)$$

где  $\Delta$  — разность высот наружной и внутренней пружин под наддрессорной балкой в свободном состоянии, м.

Для вагона с билинейным рессорным комплектом первого варианта исполнения (см. рис. 1а) суммарная вертикальная жесткость пружин в порожнем состоянии вычисляется по формуле

$$C_{\Sigma\text{пор}} = n_{\text{н}} C_{\text{н}} + 2C_{\text{кл}}, \quad (3)$$

где  $n_{\text{н}}$  — число наружных пружин;

$C_{\text{н}}$  — вертикальная жесткость наружной пружины, кН/м;

$C_{\text{кл}}$  — вертикальная жесткость внутренней подклиновой пружины, кН/м.

Статический прогиб вагона в груженом состоянии определяется по формуле

$$f_{\text{гр}} = \frac{P_{\text{гр}} + n_{\text{вб}} C_{\text{вб}} \Delta}{C_{\Sigma\text{гр}}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{гр}}$  — статическая нагрузка на рессорный комплект для груженого вагона, кН;

$n_{\text{вб}}$  — число внутренних пружин под наддрессорной балкой;

$C_{\text{вб}}$  — вертикальная жесткость внутренней пружины под наддрессорной балкой, кН/м;

$\Delta$  — разность высот наружной и внутренней пружин под наддрессорной балкой в свободном состоянии, м;

$C_{\Sigma\text{гр}}$  — суммарная вертикальная жесткость пружин рессорного комплекта для вагона в груженом состоянии, кН/м, определяется суммой жесткостей всех пружин комплекта.



Обязательным условием является проверка разности статических прогибов под тарой и брутто:

$$f_{\Delta} = f_{гр} - f_{пор}, \quad (5)$$

где  $f_{гр}$  — статический прогиб вагона в груженом состоянии, м;  
 $f_{пор}$  — статический прогиб вагона под тарой, м.

Для билинейного рессорного комплекта важный параметр — эквивалентный прогиб груженого вагона, допустимая величина которого оговаривается в технических требованиях. Эквивалентный прогиб груженого вагона может быть определен по зависимости

$$f_{\text{экв}} = \tilde{\Delta} + \frac{\tilde{\Delta} \cdot P'_T}{P_{бр} - P'_T}, \quad (6)$$

где  $\tilde{\Delta}$  — изменение прогиба от точки перегиба до брутто, м;  
 $P'_T$  — нагрузка, действующая на рессорный комплект при нахождении в точке перегиба, кН;

$P_{бр}$  — статическая нагрузка на рессорный комплект для груженого вагона, кН.

В качестве примера выполнен расчет параметров билинейного подвешивания тележки (см. рис. 1а) со следующими исходными данными: нагрузка на рессорный комплект от тары  $P'_T = 39,24$  кН; нагрузка на рессорный комплект брутто  $P_{гр} = 225,63$  кН; разница высоты центральных пружин комплекта  $\Delta = 0,03$  м; жесткость наружной пружины комплекта  $C_{н} = 307,319$  кН/м; вертикальная жесткость внутренней подклиновой пружины  $C_{кл} = 240,421$  кН/м.

В табл. 1 приведены расчетные параметры рессорного подвешивания, а на рис. 2 — силовая характеристика рессорного комплекта тележки.

Таблица 1

Расчетные параметры рессорного подвешивания вагона

Параметр	Значение параметра
Суммарная вертикальная жесткость пружин в порожнем состоянии, кН/м	2632,075
Статический прогиб рессорного подвешивания под тарой, не менее, мм	14,91
Статический прогиб рессорного подвешивания под брутто, не более, мм	68,25
Эквивалентный статический прогиб рессорного подвешивания под максимально допустимой нагрузкой брутто, не более, мм	58,8
Разность статических прогибов рессорного подвешивания под тарой и максимально допустимой нагрузкой брутто, не более, мм	53,34
Точка перегиба силовой характеристики, кН	78,96
Изменение прогиба от точки перегиба до брутто, мм	38,25

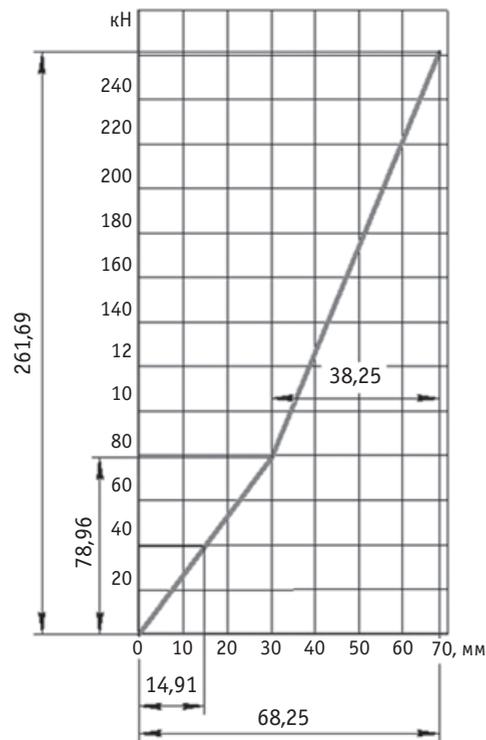


Рис. 2. Силовая характеристика рессорного комплекта

Для сравнения динамических характеристик тележек с билинейным и линейным рессорным подвешиванием, а также для выбора и уточнения параметров билинейного подвешивания выполнено компьютерное моделирование движения вагона на тележках с расчетными параметрами (см. табл. 1), предназначенных для нагрузки от оси на рельсы 245 кН (25 тс). Параллельно проведено моделирование тележки, предназначенной для нагрузки от оси на рельсы 245 кН (25 тс) с типовым подвешиванием, а также моделирование тележки мод. 18-100 (прототип тележки мод. 18-578). Моделирование выполнено в программном комплексе «Универсальный механизм» [4] на моделях тележек, разработанных в [5]. Параметры пружин этих трех тележек приведены в табл. 2.

Существенное значение при создании билинейного подвешивания имеет выбор разности высот пружин внутренних и наружных ( $\Delta$ ). Чтобы определить рациональное значение данного параметра применительно к схеме билинейного подвешивания по варианту рис. 1б, проведены предварительные исследования: на математической модели выполнен многовариантный расчет, в котором варьировался этот параметр. Оценивалось изменение коэффициента динамики по изменению данного размера. При этом моделировался порожний режим движения в прямом участке в режиме установившейся скорости движения при различных ее значениях. Возмущением колебаний при моделировании служило задание движения вагона с различными постоянными скоростями по пути с неровностями, сформированными в виде случайных функций в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Таблица 2

Параметры пружин сравниваемых тележек

Условное обозначение	Тип подвешивания (осевая нагрузка)	Жесткость наружной пружины, Н/м	Жесткость внутренней пружины (основная), Н/м	Жесткость внутренней пружины (подклиновья), Н/м	Разность высот пружин в свободном состоянии, мм
1-Л-23,5	Линейное, мод. 18-100 (23,25 тс/ось)	430182	201818	201818	—
2-Л-25,0	Линейное, мод. 18-131 (25 тс/ось)	422740	218773	218773	—
3-Б-25,0	Билинейное (25 тс/ось)	307319	240421	240421	30

На рис. 3 приведены фрагменты расчетных временных осциллограмм изменения коэффициента динамики обрессоренной части тележки, полученные на скорости 33,3 м/с при различных величинах разницы высот внутренних и наружных пружин в свободном состоянии.

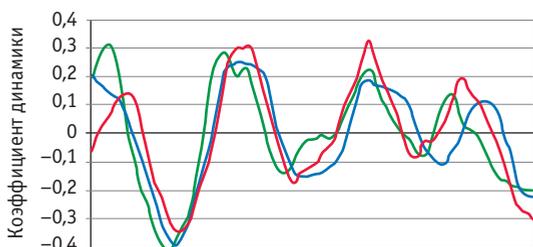


Рис. 3. Осциллограммы коэффициентов динамики порожних вагонов:  
—  $\Delta = 0,025$ ; —  $\Delta = 0,015$ ; —  $\Delta = 0,030$

Полученные осциллограммы показали, что предположительно значение параметра  $\Delta = 30$  мм является рациональным выбором для нашей схемы подвешивания и параметров пружин.

Из предположения, что процессы изменения динамических характеристик при движении вагона подчинены нормальному закону распределения, на каждой скорости вычислялось максимальное значение процесса, определяемое по известному правилу трех сигм:

$$x_{\max} = m + 3\sqrt{\sigma^2}, \quad (7)$$

где  $m$  — математическое ожидание величины;  
 $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение.

По максимальным значениям строился график в трехмерных координатах (рис. 4), где на осях в горизонтальной плоскости откладывались значения параметра  $\Delta$  и скорости движения, а зависимая величина (коэффициент динамики) — по вертикальной оси. На основе полученных на трехмерном графике точек строилась поверхность. Анализ поверхности показал, что с увеличением размера  $\Delta$  от 15 мм уменьшается значение коэффициента динамики. Начиная с 30 мм дальнейшее увеличение размера  $\Delta$  не оказывает влияния на коэффициент динамики, поэтому в последующих исследованиях целесообразно принять для данного параметра значение 30 мм.

Влияние билинейного подвешивания с выбранным значением разницы высоты наружных и внутренних пружин на динамические качества тележки повышенной грузоподъемности изучалось далее при движении загруженного и порожнего вагонов в прямых участках пути на различных скоростях в режиме установившейся скорости.

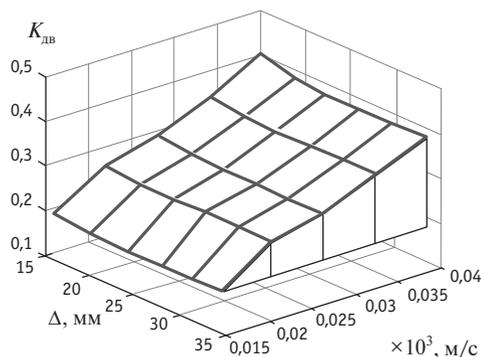


Рис. 4. График зависимости коэффициента вертикальной динамики от скорости движения порожнего вагона и разницы высот в свободном состоянии внутренней и наружной пружин

При исследованиях оценивались следующие динамические показатели:

- коэффициенты вертикальной динамики обрессоренной и необрессоренной масс;
- вертикальное и горизонтальное ускорение кузова в районе пятника;
- вертикальная реакция «колесо — рельс» (воздействие на путь);
- реакции «ребень колеса — боковая поверхность рельса»;
- рамная сила;
- угол набегания колеса на рельс;
- относительное смещение боковых рам (забегание);
- интегральный фактор износа (работа силы трения при контакте гребня с боковой поверхностью рельса).

Анализу подвергались осциллограммы оцениваемых динамических характеристик и зависимости их изменения от скорости движения. Значения характеристик на каждой скорости определялись из осциллограмм по формуле (7). Использова-

ние билинейного рессорного подвешивания с рассматриваемыми параметрами положительно сказывалось на динамических качествах тележки в вертикальной плоскости. На рис. 5 и 6 показано изменение основных показателей вертикальной динамики в зависимости от скорости для различных конструкций тележек и тележки с билинейным подвешиванием. При анализе полученных результатов и приведенных графиков были сделаны следующие выводы по значениям показателей вертикальной динамики тележки с билинейным подвешиванием (3-Б-25,0) в сравнении с тележками с линейным подвешиванием (1-Л-23,5/2-Л-25,0):

коэффициент вертикальной динамики по обрессоренным частям (см. рис. 5) принимает меньшие значения со скорости 20 м/с при груженом режиме и на всех скоростях при порожнем режиме, максимальное расхождение при груженом режиме составляет 30 % для варианта 1-Л-23,5 и 28 % — для варианта 2-Л-25,0, при порожнем — 29 и 22 % соответственно;

коэффициент вертикальной динамики по необрессоренным частям (график не приводится) принимает меньшие значения со скорости 20 м/с при груженом режиме и на скоростях выше 30 м/с — при порожнем режиме, максимальное расхождение для груженого режима составляет 30 и 16 %, для порожнего — 15 и 8 %;

вертикальные ускорения кузова (см. рис. 6) принимают меньшие значения со скорости 20 м/с при груженом режиме и на скорости 27 м/с и выше — при порожнем, максимальное расхождение для груженого режима составляет 34 и 40 %, для порожнего — 16 и 17 %;

реакция (воздействие на путь — график не приводится) в точке контакта «колесо — рельс» принимает меньшие значения со скорости 20 м/с при груженом режиме и более высокие значения — при порожнем, максимальное расхождение для груженого режима составляет 8 и 10 %, для порожнего — 4 и 11 %.

Значения показателей горизонтальной динамики для тележки с билинейным подвешиванием в сравнении с тележками вариантами 1-Л-23,5 и 2-Л-25,0 с линейным подвешиванием не имеют выраженных отличий и тенденций.

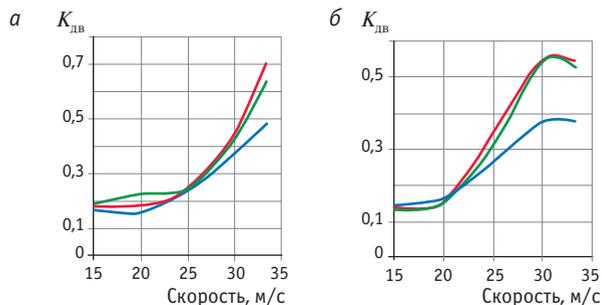


Рис. 5. Зависимость коэффициента вертикальной динамики от скорости движения вагона по прямому участку пути при порожнем (а) и груженом (б) режимах: — 1-Л-23,5; — 2-Л-25,0; — 3-Б-25,0

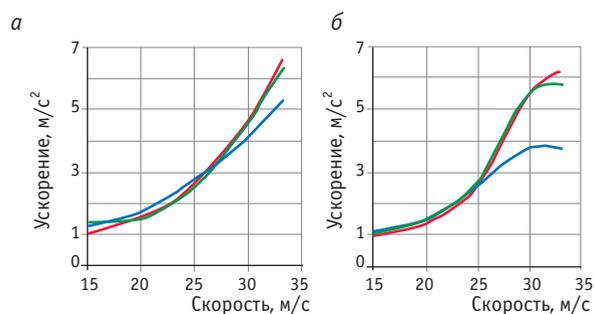


Рис. 6. Зависимость вертикальных ускорений кузова от скорости движения вагона по прямому участку пути при порожнем (а) и груженом (б) режимах: — 1-Л-23,5; — 2-Л-25,0; — 3-Б-25,0

Таким образом, можно резюмировать, что билинейное подвешивание имеет ряд преимуществ перед линейным подвешиванием в вертикальном направлении при рациональном выборе разницы высот наружных и внутренних пружин. При этом выбор производится для конкретной модели тележки с заданными и присущими только ей параметрами жесткости пружин, что было показано в статье.

## Литература

1. Давыдов А. Н., Смольянинов А. В. Боковые опоры вагона и нагрузки, действующие на путь // Транспорт Урала. 2013. № 4 (39). С. 38–40. ISSN 1815-9400.
2. Давыдов А. Н., Смольянинов А. В. Влияние продольных горизонтальных зазоров в боковых опорах непрерывного контакта на величину критической скорости грузового вагона // Вестник УрГУПС. 2013. № 1 (17). С. 43–49. ISSN 2079-0392.
3. Левин А. Б., Павлюков А. Э., Смольянинов А. В. Оценка демпфирующих свойств буксового подвешивания многоосных тележек грузовых вагонов // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 27–32. ISSN 1815-9400.
4. Динамический анализ и синтез механизмов с использованием программы UM / Д. Ю. Погорелов, А. К. Толстошеев, Р. В. Ковалев и др. Брянск : Изд-во БГТУ, 1997. 16 с.
5. Павлюков А. Э. Прогнозирование нагруженности ходовых частей вагонов методами имитационного моделирования : монография. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 293 с.

## References

1. Davydov A. N., Smolyaninov A. V. Bokovye opory vagona i nagruzki, deystvuyushchie na put [Side bearers of rail car and loads acting on tracks] // Transport of the Urals. 2013. № 4 (39). P. 38–40. ISSN 1815-9400.
2. Davydov A. N., Smolyaninov A. V. Vliyanie prodolnykh gorizontalnykh zazorov v bokovykh oporakh nepreryvnogo kontakta na velichinu kriticheskoy skorosti gruzovogo vagona [Influence of longitudinal horizontal gaps in constant contact side bearers on the critical speed of freight car] // Herald of USURT. 2013. № 1 (17). P. 43–49. ISSN 2079-0392.
3. Levin A. B., Pavlyukov A. E., Smolyaninov A. V. Otsenka dempfiyushchikh svoystv buksovogo podveshivaniya mnogoosnykh telezhok gruzovykh vagonov [Evaluation of damping properties of axle-box suspension of multi-axle bogies of freight cars] // Transport of the Urals. 2014. № 2 (41). P. 27–32. ISSN 1815-9400.
4. Dinamicheskiy analiz i sintez mekhanizmov s ispolzovaniem programmy UM [Dynamic analysis and synthesis of mechanisms using UM program] / D. Yu. Pogorelov, A. K. Tolstosheev, R. V. Kovalev i dr. Bryansk : Izd-vo BG TU, 1997. 16 p.
5. Pavlyukov A. E. Prognozirovaniye nagruzhennosti khodovykh chastey vagonov metodami imitatsionnogo modelirovaniya : monografiya [Forecasting loading of rail car undercarriage using simulation methods : a monograph]. Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 293 p.

УДК 629.46:629.4.015

Алексей Николаевич Давыдов, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Челябинского института путей сообщения — филиала Уральского государственного университета путей сообщения (ЧИПС УрГУПС), Александр Васильевич Смольянинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОКОВЫХ СКОЛЬЗУНОВ ПОСТОЯННОГО КОНТАКТА ДЛЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Alexey Nikolayevich Davydov, PhD in Engineering, Deputy Director for Science, Chelyabinsk Institute of Railway Transport — a branch of Ural State University of Railway Transport (CIRT USURT), Alexander Vasilyevich Smolyaninov, DSc in Engineering, Professor, Department of Railway Cars, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

## PARAMETERIZATION OF CONSTANT CONTACT SIDE BEARER FOR FREIGHT CARS

### Аннотация

Статья посвящена разработке методики выбора конструктивных параметров боковых скользунов постоянного контакта, обеспечивающих регламентированные динамические характеристики эксплуатации грузовых вагонов, установленные нормативно-технической документацией. Для этой цели рассмотрено влияние параметров боковых скользунов постоянного контакта на момент сопротивления повороту тележки под вагоном. Использование предлагаемой методики проиллюстрировано на примере выбора параметров боковых скользунов постоянного контакта для шестиосного грузового вагона.

**Ключевые слова:** грузовой вагон, боковой скользящий, момент сопротивления повороту, методика выбора параметров боковых скользунов.

### Summary

The article is dedicated to the development of parameterization procedure for the design of constant contact side bearers to ensure dynamic characteristics of freight cars operation as specified by regulatory and technical documentation. For this purpose, the impact of constant contact side bearers parameters on curve resistance of car bogie is analyzed. The use of the proposed method is illustrated by the example of parameterization of constant contact side bearers for a six-axle freight car.

**Keywords:** freight car, side bearer, curve resistance, side bearer parameterization method.

**В**веденный в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июля 2014 г. ГОСТ 9246-2013 определяет понятие «боковой скользящий постоянного контакта» как «скользящий боковой, прижатый своей рабочей поверхностью к ответной поверхности на кузове вагона и оборудованный упругими элементами» [1].

Опыт мировых производителей показывает, что использование боковых скользунов постоянного контакта позволяет сократить затраты жизненного цикла вагона, связанные с восстановлением и заменой узлов и деталей из-за эксплуатационных износов, так как исключает возможность его извилистого движения и снижает динамическую нагруженность элементов конструкции вагона. В наших работах на основе моделирования динамических процессов движения вагона, оборудованного боковыми опорами, дана оценка устойчивости движения и изучено влияние продольных горизонтальных зазоров в боковых опорах непрерывного контакта на величину критической скорости грузового вагона [2, 3].

Для улучшения условий эксплуатации подвижного состава Ассоциацией американских железных дорог (AAR) принят стандарт, в соответствии с которым начиная с 2002 г. все строящиеся вагоны должны быть оборудованы боковыми опорами непрерывного контакта с металлическими контактирующими (фрикционными) частями [4, 5].

Однако совершенно открытым остается вопрос о проектировании боковых скользунов постоянного контакта с требуемыми параметрами и/или их выбора из предлагаемых модельных рядов.

В соответствии с рекомендациями ведущих мировых производителей и требованиями ГОСТа 9246-2013 [1] отношение суммарной статической нагрузки на боковые скользуны постоянного контакта к весу кузова вагона с минимальной расчетной массой должно быть не более 85 %.

С учетом этого определим следующие параметры.

Долю нагрузки, приходящейся на подпятник  $N_{\text{п}}$ , от общей нагрузки на тележку  $N$  вычислим по формуле

$$N_{\text{п}} = 0,15N. \quad (1)$$

Долю нагрузки, приходящейся на один боковой скользун тележки  $N_{\text{ск}}$ , от общей нагрузки на тележку определим как

$$N_{\text{ск}} = \frac{0,85N}{2}. \quad (2)$$

Нагрузку, приходящуюся на одну тележку, рассчитаем по выражению

$$N = \frac{T - n \cdot m_{\text{т}} \cdot g}{n}, \quad (3)$$

где  $T$  — тара вагона, Н;

$n$  — количество тележек;

$m_{\text{т}}$  — масса одной тележки, кг;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Обозначим долю нагрузки, приходящейся на боковые скользуну, через  $k$ , тогда формулы (1) и (2) будут иметь вид:

$$N_{\text{п}} = (1 - k)N; \quad (4)$$

$$N_{\text{ск}} = \frac{kN}{2}. \quad (5)$$

При этом совершенно очевидно, что введение упругих боковых скользуну в конструкцию приведет к изменению момента сил сопротивления повороту тележки относительно кузова вагона. В качестве примера на рис. 1 представлена расчетная схема для определения момента сопротивления повороту соединительной балки трехосной тележки.

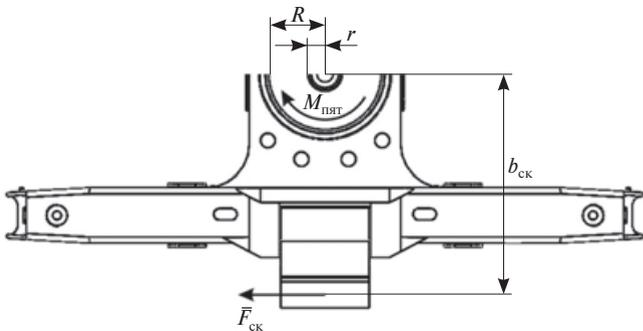


Рис. 1. Расчетная схема для определения момента сопротивления повороту шкворневой балки

В случае опирания кузова только на подпятник момент сопротивления, возникающий в процессе поворота шкворневой балки относительно кузова, при отсутствии перевалки кузова на боковые скользуну может быть определен по выражению [6]

$$M_{\text{пят}} = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \mu_{\text{п}}^{\text{сц}} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}, \quad (6)$$

где  $N$  — нагрузка от веса кузова, приходящаяся на одну тележку, Н;

$\mu_{\text{п}}^{\text{сц}}$  — коэффициент трения подпятника по пятнику;

$R$  — наружный радиус опорной поверхности подпятника, м;

$r$  — внутренний радиус опорной поверхности подпятника, м.

При опирании кузова на подпятник и упругие боковые скользуну суммарный момент сопротивления будет складываться из момента сил трения в узле «пятник — подпятник» и момента сил трения в боковых скользуну.

В случае отсутствия перевалки кузова (деформация упругих элементов скользуну одинакова) величина момента сил сопротивления повороту кузова может быть определена как

$$\sum M(F_{\text{тр}}) = M_{\text{пят}}^* + 2F_{\text{ск}} \cdot b_{\text{ск}}, \quad (7)$$

где  $M_{\text{пят}}^*$  — момент сил трения, возникающий от доли нагрузки кузова, приходящейся на подпятник тележки, Нм;

$F_{\text{ск}}$  — сила трения, возникающая между боковыми скользуну кузова с одной стороны вагона, Н;

$b_{\text{ск}}$  — расстояние от центра подпятника до центра бокового скользуну, м.

Момент сил трения, возникающий от доли нагрузки кузова, приходящейся на подпятник тележки, может быть рассчитан по выражению, аналогичному (6), с учетом формулы (4):

$$M_{\text{пят}}^* = \frac{2}{3} \cdot N \cdot (1 - k) \cdot \mu_{\text{п}}^{\text{сц}} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}. \quad (8)$$

Силу трения, возникающую между боковыми скользуну кузова с одной стороны вагона, можно описать кулоновской моделью:

$$F_{\text{ск}} = N_{\text{ск}} \cdot \mu_{\text{ск}}^{\text{сц}}, \quad (9)$$

где  $\mu_{\text{ск}}^{\text{сц}}$  — коэффициент трения на опорных поверхностях боковых скользуну.

С учетом выражения (5) формула (9) будет иметь вид

$$F_{\text{ск}} = \frac{k \cdot N \cdot \mu_{\text{ск}}^{\text{сц}}}{2}. \quad (10)$$

С использованием (8) и (10) формулу (7) можно записать как

$$\sum M(F_{\text{тр}}) = \frac{2}{3} \cdot N \cdot (1 - k) \cdot \mu_{\text{п}}^{\text{сц}} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} + k \cdot N \cdot \mu_{\text{ск}}^{\text{сц}} \cdot b_{\text{ск}}. \quad (11)$$

Рассчитаем момент сил сопротивления повороту тележки для вагона, имеющего массу тары 40 тс и опирающегося на две трехосные тележки массой 8,3 тс каждая, для случая опирания на подпятник (6) и опирания на подпятник и упругие боковые скользуну (11), когда на последние приходится 85% общей нагрузки на тележку. Принимаем, что  $b_{\text{ск}} = 0,762$  м,  $R = 0,152$  м,  $r = 0,04$  м,  $\mu_{\text{п}}^{\text{сц}} = \mu_{\text{ск}}^{\text{сц}} = 0,15$ .

Тогда:

$$T = 392,4 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

$$N = 114,777 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

$$N_{\text{СК}} = 48,78 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

$$M_{\text{пнт}} = 1,84 \text{ кНм};$$

$$\Sigma M(F_{\text{тр}}) = 11,42 \text{ кНм}.$$

Результаты расчета показывают, что при оборудовании вагона упругими боковыми скользунми, воспринимающими 85% нагрузки на тележку, момент сопротивления увеличивается в 6,2 раза и не превышает максимально установленного значения, равного 12 кНм [1].

Для анализа полученных результатов обратимся к формуле (11). На рис. 2 представлены зависимости моментов сил трения, возникающих в подпятнике и боковых скользунми [соответственно первое и второе слагаемое в формуле (11)], от доли нагрузки, приходящейся на боковые скользунми.

Как видно из рис. 2, при увеличении доли нагрузки на боковые скользунми наибольший вклад в суммарный момент сил сопротивления повороту начинает вносить момент сил трения, возникающий именно в боковых скользунми. При этом из формулы (11) следует, что существует зависимость суммарного момента сил сопротивления повороту тележки от коэффициента сил трения.

На рис. 3 показаны зависимости суммарного момента сил сопротивления повороту тележки для различных значений коэффициентов трения, а на рис. 4 — зависимость момента сил сопротивления повороту тележки от величины коэффициента трения для схемы опирания только на подпятник, полученная на основании формулы (6).

Из рис. 3 и 4 следует, что коэффициент сил трения оказывает существенное влияние на суммарный момент сил сопротивления повороту тележки. При этом очевидно, что до нагрузки, приходящейся на боковые скользунми, равной 23% от общей нагрузки на тележку, суммарный момент сил сопротивления повороту не превышает 12 кНм во всем диапазоне изменения значений коэффициента трения. При большей нагрузке на скользунми необходимо ограничивать максимальное значение коэффициента сил трения в опорных узлах по условию не превышения моментом трения максимально допустимой величины.

На рис. 5 представлена зависимость максимального значения коэффициента сил трения, при котором для данной доли нагрузки на боковые скользунми суммарный момент сил сопротивления повороту не превышает 12 кНм.

На основании результатов проведенных исследований могут быть рекомендованы два подхода к выбору параметров упругих боковых скользунми для рассматриваемого вагона.

1. Выбор бокового скользунми по условию, что суммарный момент сопротивления не превышает 12 кНм во всем диапазоне изменения значений коэффициентов сил трения для данной доли нагрузки, приходящейся на боковые скользунми. Резуль-

таты расчетов показывают, что для рассматриваемого вагона максимальное значение доли нагрузки на боковые скользунми не должно превышать 23% от общей нагрузки на тележку. Этой величине будет соответствовать упругий боковой скользун с усилием начальной затяжки 1345,5 кг.

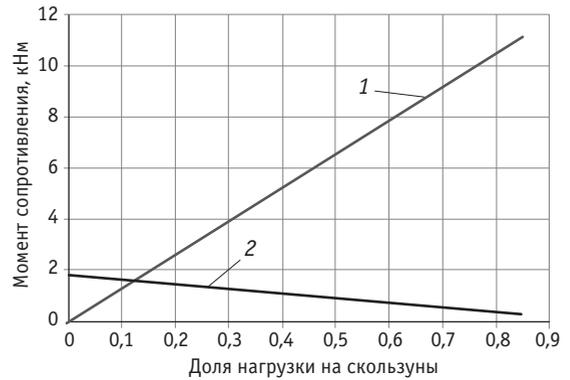


Рис. 2. Зависимости моментов сил трения в узлах опирания кузова на тележку от доли нагрузки, приходящейся на боковые скользунми:

- 1 — момент трения в скользунми;
- 2 — момент трения в подпятнике

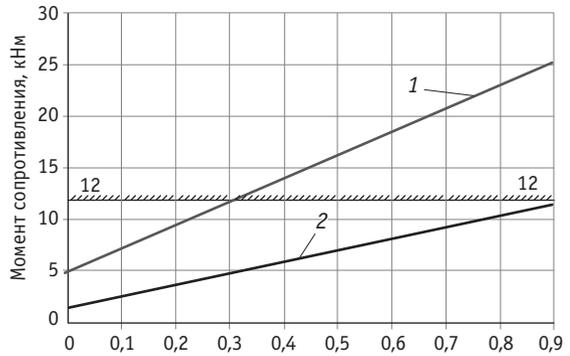


Рис. 3. Зависимость суммарного момента сил сопротивления повороту тележки от доли нагрузки, приходящейся на боковые скользунми:

$$1 - \mu_{\text{п}}^{\text{сц}} = \mu_{\text{ск}}^{\text{сц}} = 0,40; 2 - \mu_{\text{п}}^{\text{сц}} = \mu_{\text{ск}}^{\text{сц}} = 0,15$$

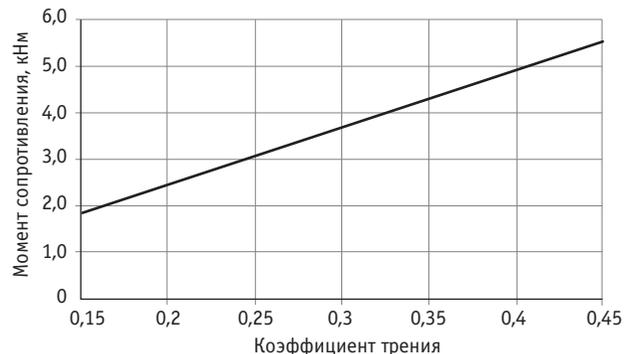
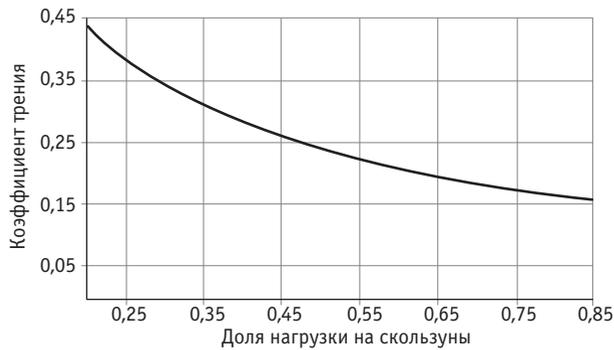


Рис. 4. Зависимость момента сил сопротивления повороту тележки от величины коэффициента трения для схемы опирания только на подпятник



**Рис. 5. Зависимость максимального значения коэффициента сил трения от доли нагрузки, приходящейся на боковые скользуны**

Полученная величина является нестандартной для модельного ряда производителей упругих боковых опор [7]. Соответственно при дальнейшем выборе используются такие методы: оценка нескольких стандартных моделей упругих боковых скользунов, параметры которых близки найденному значению, и последующий выбор наиболее рационального варианта по результатам сравнительного анализа их влияния на момент сил сопротивления и динамические показатели вагона. Решение данной задачи возможно с применением численных экспериментов на имитационной модели движения рассматриваемого вагона;

разработка новой конструкции упругого бокового скользуна, параметры которой соответствуют требуемым.

2. Выбор типовой модели упругого бокового скользуна по условию передачи 85% от массы кузова через упругие боковые скользуны и проведение дополнительных исследований, цель которых — достижение таких значений, возникающих в узлах опирания сил трения, чтобы суммарный момент сил сопротивления повороту тележки не превышал 12 кНм.

Рассмотрим пример. При условии что коэффициент трения в узле «пятник — подпятник» равен 0,15, а на скользунах он изменяется от 0,15 до 0,40, проанализируем, как будет меняться нагрузка на скользуны, если суммарный момент не превышает 12 кНм.

Как следует из выражения (5), доля нагрузки, приходящаяся на боковые скользуны, равна

$$k = \frac{2 \cdot N_{ск}}{N}. \quad (12)$$

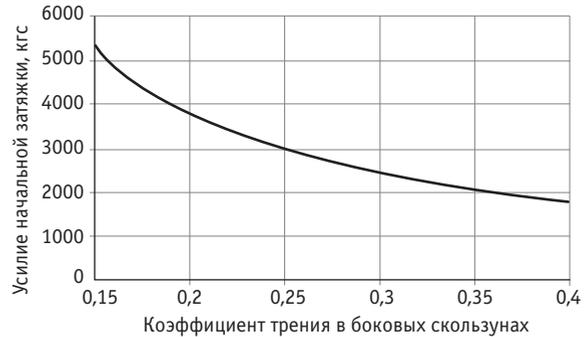
Подставив (12) в (11), после преобразований получим

$$\sum M(F_{тр}) = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot N_{ск}}{N}\right) \cdot \mu_{п}^{сш} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} + 2 \cdot N_{ск} \cdot \mu_{ск}^{сш} \cdot b_{ск}. \quad (13)$$

Из выражения (13) может быть выведена формула для определения нагрузки, приходящейся на скользуны,

$$N_{ск} = \frac{\sum M(F_{тр}) - \frac{2}{3} \cdot N \cdot \mu_{п}^{сш} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}}{2 \cdot \mu_{ск}^{сш} \cdot b_{ск} - \frac{4}{3} \cdot \mu_{п}^{сш} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}}. \quad (14)$$

На рис. 6 представлены результаты расчета по формуле (14) для следующих начальных условий:  $\sum M(F_{тр}) = 120000$  Нм,  $N = 114777$  Н,  $b_{ск} = 0,762$  м,  $R = 0,152$  м,  $r = 0,04$  м,  $\mu_{п}^{сш} = 0,15$ . Значения  $\mu_{ск}^{сш}$  варьируются в пределах 0,15–0,40.



**Рис. 6. Зависимость максимального усилия затяжки упругого бокового скользуна от коэффициента трения в опорных поверхностях**

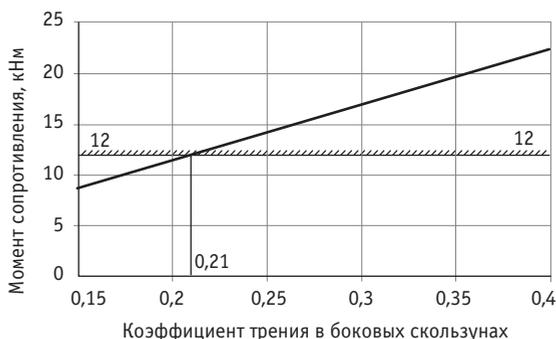
Из рис. 6 видно, что нагрузка, приходящаяся на скользуны, изменяется в значительном диапазоне в зависимости от величины коэффициента трения. Следовательно, при использовании данного подхода необходимы дополнительные исследования по возможным в эксплуатации границам изменения величины коэффициента трения в опорных поверхностях боковых скользунов.

В случае применения второго подхода, т. е. когда 85% нагрузки передается через боковые скользуны (в соответствии с выполненными расчетами  $N_{ск} = 4972,5$  кг), в качестве бокового скользуна может быть выбрана модель ТСС-IV-80 ЛТ, имеющая наибольшее усилие начальной затяжки из всего модельного ряда выпускаемых фирмой Miner упругих боковых скользунов [5]. При установке боковой опоры с вертикальным расстоянием между поверхностью скользуна кузова и монтажной поверхностью на надрессорной балке тележки  $5\frac{1}{16}$  дюйма (0,1316 м) оно будет равно 8000 фунтов (3628,74 кг = 35597,93 Н).

В этом случае, как следует из формулы (12), доля нагрузки, приходящаяся на боковую опору, составит

$$k = \frac{2 \cdot 3628,74}{114777} = 0,62.$$

На рис. 7 приведена зависимость момента сопротивления повороту тележки от коэффициента трения опорных поверхностей упругих боковых скользунов, полученная в результате расчета по формуле (11) при следующих начальных условиях:  $N = 114777$  Н,  $N_{ск} = 35597,93$  Н,  $b_{ск} = 0,762$  м,  $R = 0,152$  м,  $r = 0,04$  м,  $\mu_{п}^{сш} = 0,15$ .



**Рис. 7. Зависимость момента сопротивления повороту тележки от коэффициента трения опорных поверхностей упругих боковых скользунов**

Как видно из рис. 7, при оборудовании вагона упругими боковыми опорами ТСС-IV-80 LT (Miner), для того чтобы момент сил сопротивления повороту тележки не превышал величины 12 кНм, коэффициент трения в опорных поверхностях боковых скользунов в условиях эксплуатации должен быть не более 0,21.

## Литература

- ГОСТ 9246-2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. М. : Стандартинформ, 2014. 28 с.
- Смольянинов А. В., Давыдов А. Н. Оценка устойчивости движения грузовых вагонов, оборудованных боковыми опорами // Транспорт Урала. 2011. № 4 (30). С. 45–47. ISSN 1815-9400.
- Давыдов А. Н., Смольянинов А. В. Влияние продольных горизонтальных зазоров в боковых опорах непрерывного контакта на величину критической скорости грузового вагона // Вестник УрГУПС. 2013. № 1 (17). С. 43–49. ISSN 2079-0392.
- TecsPak® Long Travel Constant Contact Side Bearings [Электронный ресурс]. URL: [http://www.minerent.com/pdf/spec\\_sheets/TCC-III\\_IV.pdf](http://www.minerent.com/pdf/spec_sheets/TCC-III_IV.pdf) (дата обращения: 22.02.2015).
- Long Travel Constant Contact Side Bearings [Электронный ресурс]. URL: [http://www.minerent.com/products/ccsb\\_Long-Travel-IV.php](http://www.minerent.com/products/ccsb_Long-Travel-IV.php) (дата обращения: 22.02.2015).
- Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин : учебник для вузов ; 4-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1988. 640 с.
- Давыдов А. Н., Петров Г. И., Смольянинов А. В. Анализ конструкций боковых опор грузовых вагонов // Инновационный транспорт. 2013. № 4 (10). С. 6–11. ISSN 2311-165X.

## References

- GOST 9246-2013. Telezhki dvukhosnye trekhlementnye gruzovykh vagonov zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Two-axle three-piece bogies for freight cars of 1520 mm gauge railways. General specifications]. M. : Standartinform, 2014. 28 p.
- Smolyaninov A. V., Davydov A. N. Otsenka ustoychivosti dvizheniya gruzovykh vagonov, oborudovannykh bokovymi oporami [Assessment of motion stability of freight cars equipped with side bearers] // Transport of the Urals. 2011. № 4 (30). P. 45–47. ISSN 1815-9400.
- Davydov A. N., Smolyaninov A. V. Vliyanie prodolnykh gorizontalnykh zazorov v bokovykh oporakh nepreryvnogo kontakta na velichinu kriticheskoy skorosti gruzovogo vagona [Influence of longitudinal horizontal gaps in constant contact side bearers on the critical speed of the freight car] // Herald of USURT. 2013. № 1 (17). P. 43–49. ISSN 2079-0392.
- TecsPak® Long Travel Constant Contact Side Bearings [Electronic resource]. URL: [http://www.minerent.com/pdf/spec\\_sheets/TCC-III\\_IV.pdf](http://www.minerent.com/pdf/spec_sheets/TCC-III_IV.pdf) (date accessed: 22.02.2015).
- Long Travel Constant Contact Side Bearings [Electronic resource]. URL: [http://www.minerent.com/products/ccsb\\_Long-Travel-IV.php](http://www.minerent.com/products/ccsb_Long-Travel-IV.php) (date accessed: 22.02.2015).
- Artobolevskiy I. I. Teoriya mekhanizmov i mashin : uchebnik dlya vtuzov ; 4-e izd., pererab. i dop. [Theory of mechanisms and machines : a textbook for technical universities ; 4th ed., rev. and complemented]. M. : Nauka, 1988. 640 p.
- Davydov A. N., Petrov G. I., Smolyaninov A. V. Analiz konstruksiy bokovykh opor gruzovykh vagonov [Analysis of design of freight car side bearers] // Innovatsionnyy transport. 2013. № 4 (10). P. 6–11. ISSN 2311-165X.

УДК 504.054

**Владимир Григорьевич Булаев, доктор технических наук, заведующий центром «Экологическая безопасность» Института дополнительного профессионального образования Уральского государственного университета путей сообщения (ИДПО УрГУПС), Екатеринбург,**  
**Эдуард Анатольевич Рябухин, начальник центра «Охрана окружающей среды» Свердловской железной дороги, Екатеринбург**

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММ ПАРЕТО И ИСИКАВЫ

**Vladimir Grigorievich Bulaev, DSc in Engineering, Head of Environmental Safety Centre, Institute of Further Professional Education, Ural State University of Railway Transport (IFPE USURT), Ekaterinburg,**  
**Eduard Anatolyevich Ryabukhin, Head of Environmental Protection Center of Sverdlovsk Railway, Ekaterinburg**

### Identification of environmental aspects using Pareto and Ishikawa diagrams

#### Аннотация

В статье приведены результаты анализа современного подхода к идентификации экологических аспектов при обращении с опасными отходами. Предложено использовать диаграммы Парето и Исикавы, которые позволяют выделить наиболее значимые экологические аспекты и определить приоритетные работы по управлению движением опасных отходов на предприятии с учетом наилучших доступных технологий.

Показано, что диаграмма Исикавы дает наглядное представление о факторах, которые влияют на обращение с опасными отходами, и о причинно-следственных связях.

**Ключевые слова:** идентификация, экологический аспект, балльная оценка, реестр.

#### Summary

The paper presents results of the analysis of the modern approach to identification of environmental aspects in hazardous waste treatment. It proposes to use Pareto and Ishikawa diagrams, which allow to identify the most significant environmental aspects and to determine priority areas for hazardous waste handling at an enterprise, taking into account the best available technologies.

It is shown that Ishikawa diagram gives a visual representation of the factors that affect hazardous waste handling, and cause-effect relationships.

**Keywords:** identification, environmental aspect, scoring, registry.

**Ж**изнедеятельность человека связана с появлением огромного количества промышленных и бытовых отходов, которые при бесконтрольном размещении часто наносят непоправимый вред окружающей среде.

Несмотря на отдельные успехи и достижения в природоохранной деятельности, общая неблагоприятная ситуация продолжает усугубляться, в том числе растет количество несанкционированных свалок отходов, что ведет к дальнейшему развитию мирового экологического кризиса.

В условиях постоянного ухудшения экологической ситуации требуется внедрение в производство максимально безвредных технологических процессов и безопасной утилизации отходов. Однако трудности такого внедрения объясняются необходимостью применения сложного капиталоемкого оборудования и отсутствием экономической обоснованности каждого конкретного проекта. Все более очевидным становится поиск новых путей решения экологических проблем при управлении движением отходов в производственной и в бытовой сфере.

Оптимальное решение заключается в том, чтобы разработать и внедрить в производство малоотходные процессы на основе наилучших доступных технологий (НДТ). Одно из основных направлений, обеспечивающих снижение негативного воздействия отходов на окружающую среду, — применение предприятиями экологически ориентированных систем управления в обращении с опасными отходами, т. е. внедрение технологий переработки отходов с целью их обезвреживания и рационального использования.

Важнейшее место здесь отводится нормативно-правовым документам, в частности Федеральному закону № 89 «Об отходах производства и потребления» [1]. Однако в решении вопросов, связанных с образованием и переработкой отходов, отсутствует четко проработанная политика, поэтому по отдельным статьям упомянутого закона принимают подзаконные документы различного уровня (постановления правительства

Российской Федерации, нормативно-правовые акты федеральных органов), которые содержат конкретные экологические ограничения в деятельности предприятий при обращении с отходами (табл. 1).

Таблица 1

Основные подзаконные нормативно-правовые акты  
(на примере ст. 12 Федерального закона  
«Об отходах производства и потребления» [1])

Статья закона	Постановление правительства Российской Федерации	Нормативно-правовые акты федеральных органов исполнительной власти
Ст. 12. Требования к объектам размещения	№ 827 от 22.12.04 (в ред. от 22.04.09 № 351, от 15.06.09 № 486)	Приказ Минприроды РФ от 23.02.10 № 49 СНиП 2.01.28-85 СанПиН 2.1.7.1038-01

С целью снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду и повышения экономической эффективности и конкурентоспособности предприятий возникла необходимость разработки и внедрения системы экологического менеджмента (СЭМ).

Для структурных подразделений ОАО «РЖД» наличие СЭМ в обращении с отходами свидетельствует о признании экологически безопасного и стабильного соответствия параметров и характеристик объектов, процессов, продукции природоохранным нормам и правилам, обеспечивающим безопасный уровень воздействия на окружающую среду и здоровье населения [2]. Как показывает практика, предупреждение всегда экономически более выгодно, чем ликвидация негативных последствий, влекущая за собой административную ответственность и штрафные санкции.

Основная цель внедрения системы обращения с опасными отходами — разработка принципиально новых способов управления экологической безопасностью (в рамках существующего менеджмента предприятия).

Большое внимание в СЭМ при обращении с опасными отходами уделяется идентификации экологических аспектов (ЭА). В настоящее время в ОАО «РЖД» разрабатывается единый подход к идентификации ЭА и связанных с ними воздействий на окружающую среду [3].

Экологический аспект — ключевое понятие СЭМ, позволяющее соотнести деятельность предприятия и ее взаимодействие с окружающей средой [4]. Использование этого понятия существенно облегчает применение подходов к предотвращению загрязнения окружающей среды (в нашем случае — при обращении с опасными отходами), которое заключается в контроле за ЭА, обеспечивающем минимизацию негативного воздействия при условии соблюдения производственных требований. Необходимо помнить, что понятие «экологический аспект» нейтрально: могут выделяться ЭА, оказывающие как положительное, так и отрицательное влияние на окружающую среду. Таким образом, между ЭА и воздействиями на окружающую среду установлена причинно-следственная связь. Поэтому целью системы управления движением опасных отходов

на предприятии является контроль за причинами и условиями воздействия ЭА и, как следствие, контроль за влиянием предприятия на окружающую среду. Идентификация ЭА позволяет контролировать или улучшать, а в дальнейшем — устанавливать приоритетность аспектов в действиях руководства предприятия. Согласно положениям ГОСТ Р ИСО 14001-2007, идентификации подлежат все ЭА [4].

Исходя из производственных особенностей для идентификации ЭА, возникающих при деятельности предприятия, и определения наиболее значимых из них применяют различные модели. В основном они сводятся к составлению реестров (документированию), к методу балльных оценок по критерию класса опасности или массе выбросов, сбросов отходов, а также к использованию так называемой цветовой матрицы экологических рисков [5, 6].

Важную роль в идентификации аспектов отводят составлению реестра, при анализе которого выделяют значительные и приоритетные ЭА (плановые). Именно на эти аспекты прежде всего должны быть направлены действия СЭМ предприятия и именно по ним следует формировать экологические цели и задачи.

Сам по себе реестр не дает ответа на вопрос об установлении важности аспекта, поскольку может быть составлен, например, по подразделениям. Подобный подход ограничивает возможности реестра. Включение в реестр таких показателей, как степень тяжести, частота возникновения, позволяет рассчитать уровень экологического риска (табл. 2), который широко применяется в сфере экологической безопасности при обращении с опасными отходами [6].

Таблица 2

Реестр экологических аспектов деятельности предприятия

Вид деятельности	Технологический процесс или операция	Экологический аспект	Степень тяжести (Ст)	Частота возникновения (Ч)	Уровень риска (Р)
1	...	...	...	...	...

Экологические риски дают возможность оценить приемлемость и чрезмерную опасность деятельности при обращении с отходами, особенно в случае возникновения нештатных ситуаций, приводящих к неблагоприятным последствиям для окружающей среды. Полученные значения риска позволяют провести ранжирование опасных отходов по их воздействию на окружающую среду, что, в свою очередь, может быть использовано для выбора приоритетных мероприятий по сокращению или профилактике возникновения риска при обращении с опасными отходами. В частности, с помощью ранжирования риска можно оценить необходимость разработки и выполнения целевых программ, направленных на защиту окружающей среды и здоровья людей.

Однако не всегда главным критерием отнесения аспекта к значимым служит степень его экологической опасности. Нередко важным называют тот ЭА, который, имея не столь высокую

экологическую значимость, превращается в конъюнктурную или социальную проблему.

В частности, на железнодорожном транспорте (ПЧ, ПМС и др.) при идентификации опасных экологических факторов наиболее значимым считают старогодние шпалы, несмотря на то что они относятся к 3-му классу опасности. В данном случае влияние оказывает социальная значимость аспекта. Следует отметить, что значимость — относительное понятие, ее невозможно определить в абсолютных величинах: то, что важно для одной организации, может быть несущественным для другой. Использование критериев должно помочь предприятию определить, какие ЭА и связанные с ними воздействия следует считать значимыми. Разработка и применение таких критериев позволит организации обеспечить согласованность и воспроизводимость оценок значимости.

Согласно другому подходу, при составлении реестра предлагается применять балльную оценку, при помощи которой количественно определяется важность ЭА (табл. 3 и 4) [5, 6]. Число баллов может колебаться от 1–5 до 1–100. Отметим, что метод балльной оценки часто носит субъективный характер и зависит от квалификации эколога, составляющего реестр. По нашему мнению, целесообразно использовать 100-балльную оценку, так как она позволяет дифференцированно подходить к анализу опасности исходя из величины ПДК входящих в состав отходов вредных веществ, как это принято в Р 2.2.2006-05 [7].

Таблица 3

Метод балльных оценок

Критерий	1 балл	2 балла	3 балла
Воздействие на окружающую среду выбросов, сбросов, отходов предприятия	Выброс (сброс) веществ (отходов) 4-го класса опасности	Выброс (сброс) веществ (отходов) 3-го класса опасности	Выброс (сброс) веществ (отходов) 1-го и 2-го класса опасности

Таблица 4

Цветовая матрица оценки рисков, баллы

Степень вредного воздействия	Воздействие		
	Слабое	Сильное	Неприемлемое
Маловероятно 1–5	Обычный риск 25	Приемлемый риск 50	Умеренный риск 100
Вероятно 6–10	Приемлемый риск 50	Умеренный риск 100	Значительный риск 200
Высокая вероятность 11–20	Умеренный риск 100	Значительный риск 200	Неприемлемый риск 400

При расчете баллов можно использовать психофизический закон С. Стивенса [8]

$$x = K \cdot S^n,$$

где  $x$  — балл риска;

$K$  — константа, зависящая от единиц измерения;

$S$  — величина опасности отхода (или раздражения);

$n$  — психофизический показатель степени, измеряется для разных раздражителей от 0,2 до 3,5.

Для установления наиболее значимых в деятельности предприятия экологических аспектов часто применяется диаграмма Парето. Она признана универсальным принципом и наилучшей практической математической моделью принятия управленческих решений [5, 9–11]. Согласно ключевому принципу Парето, источником 80 % проблем всегда является 20 % причин. Диаграмма Парето позволяет проранжировать ЭА по их значимости, что дает возможность выделить плановые (первоочередные) аспекты и рационально направить денежные средства для устранения прежде всего тех причин, которые вызывают наибольшее количество проблем.

На рис. 1 в качестве примера приведена диаграмма Парето, построенная на основе данных по обращению с опасными отходами в депо ТЧР-33 Свердловской железной дороги. На оси абсцисс приведены ЭА в порядке убывания значений коэффициента приоритетности, на оси ординат — расчетные значения коэффициентов приоритетности, причем как в фактическом (слева), так и в накопленном (кумулятивном) процентном выражении (справа).

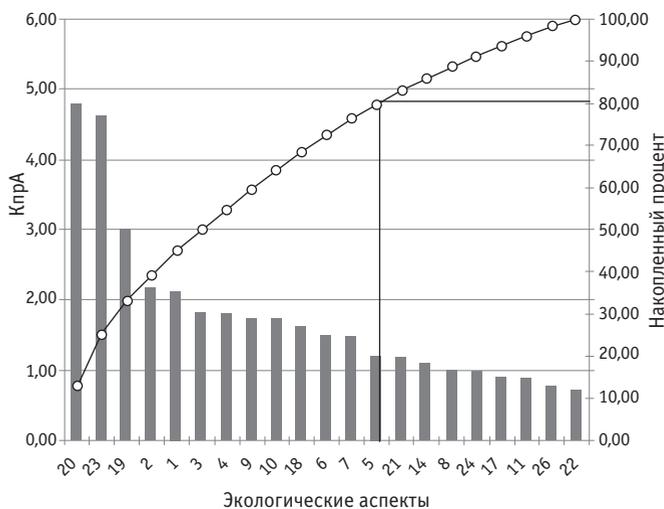


Рис. 1. Диаграмма Парето

Как видно из рис. 1, пересечение достигается на 13-й позиции — это область принятия решений, очерчивающая те ЭА (с 1-го по 13-й), которые вызывают наибольшее количество проблем в природоохранной сфере деятельности депо: 1 — строительный мусор (4-й класс опасности); 2 — лом черных металлов (5-й класс); 3 — мусор от бытовых помещений (4-й класс); 4 — аккумуляторная кислота (2-й класс); 5 — ртутные лампы (1-й класс); 6 — аккумуляторные щелочи (2-й класс);

7 — дизельные масла (3-й класс); 8 — свинцовые аккумуляторы (3-й класс); 9 — древесные опилки (4-й класс); 10 — отходы потребления, подобные коммунальным (4-й класс); 11 — всплывающая пленка из нефтеуловителей (3-й класс); 12 — обтирочный материал (3-й класс); 13 — смазочно-охлаждающие масла (3-й класс).

Диаграмма Парето (см. рис. 1) отчетливо демонстрирует, что отходы 4-го (строительный мусор, отходы потребления, древесные опилки) и 5-го класса (лом черных металлов) составляют 66,88% от общего количества значимых ЭА. Но и доля высокоопасных и умеренно опасных отходов (2-й и 3-й классы соответственно), которые представляют большую угрозу для окружающей среды и за размещение которых установлены повышенные нормативы платы в связи с их вредными свойствами, тоже весьма существенна — 33,22%.

Количество выделенных ЭА довольно обширно, но слишком подробная информация неудобна для анализа — точность должна быть минимально достаточной. Поэтому все 13 вышеперечисленных ЭА (см. рис. 1) необходимо сгруппировать по каким-либо общим признакам, в нашем случае оптимальным вариантом является класс опасности отходов. В результате объединения по классам опасности (рис. 2) наиболее значимыми ЭА по критерию их приоритетности в совокупном загрязнении можно считать отходы 4-го (строительный мусор и мусор от бытовых помещений, отходы потребления, древесные опилки), 5-го (лом черных металлов) и 1-го класса (ртутные лампы).

Таким образом, предлагаемая модель сочетает в себе методику балльных оценок ЭА деятельности предприятия и современный инструмент контроля качества — анализ Парето.

Значимость каждого идентифицированного ЭА, воздействующего на окружающую среду, предприятие определяет самостоятельно по собственным критериям и методам, поэтому и методология, и интегральный показатель такой значимости могут быть различными для разных организаций. Для выбора значимых аспектов рекомендуется рассматривать произведение баллов, присвоенных каждому из аспектов на основе оценки двух или большего числа факторов (обычно это значимость воздействия на окружающую среду и вероятность/частота возникновения воздействия).

В зависимости от вида производства вводятся дополнительные показатели: массовая характеристика аспекта (количество отходов), т/год; сумма природоохранных платежей и штрафов, приведенная к данному ЭА за отчетный период, тыс. руб./год; величина социальной проблемности аспекта, определяемая количеством негативных упоминаний (пресса, телевидение, зарегистрированные претензии, жалобы, иски, предписания надзорных органов, количество документов внутреннего происхождения, посвященных проблемности конкретного аспекта и т. п.); приписанное значение статуса

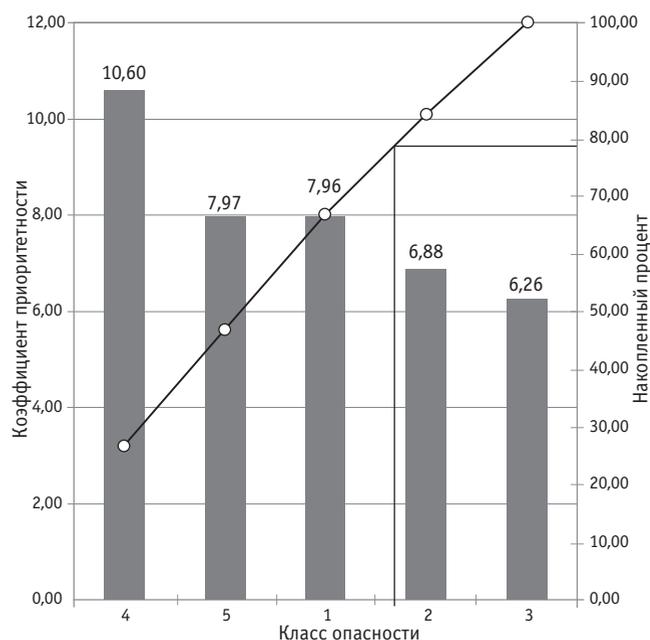


Рис. 2. Анализ Парето по классам опасности

законодательных требований к ЭА (интерпретированное значение нормирования законодательных и нормативных требований [10]).

В стандарте [10] четко указано, что аспект и воздействие связаны причинно-следственной связью, которая чрезвычайно важна не столько для формальной идентификации аспектов, сколько для результативности управления ими.

Оптимальным вариантом в данном случае является диаграмма Исикавы, которая дает наглядное представление не только о факторах, влияющих на изучаемый объект, но и о причинно-следственных связях этих факторов, т. е. в простой и доступной форме отражает и систематизирует причины, прямо или косвенно влияющие на исследуемую проблему. Все потенциальные причины группируются и ранжируются по смысловым и причинно-следственным блокам, в каждом из которых можно выделить наиболее существенные и провести поуровневый поиск первопричины (рис. 3).

Таким образом, диаграммы Парето и Исикавы позволяют: определять при обращении с опасными отходами наиболее значимые ЭА, на минимизацию которых в первую очередь должны быть направлены основные усилия и необходимые денежные ресурсы;

осуществлять на предприятии целенаправленную природоохранную деятельность.

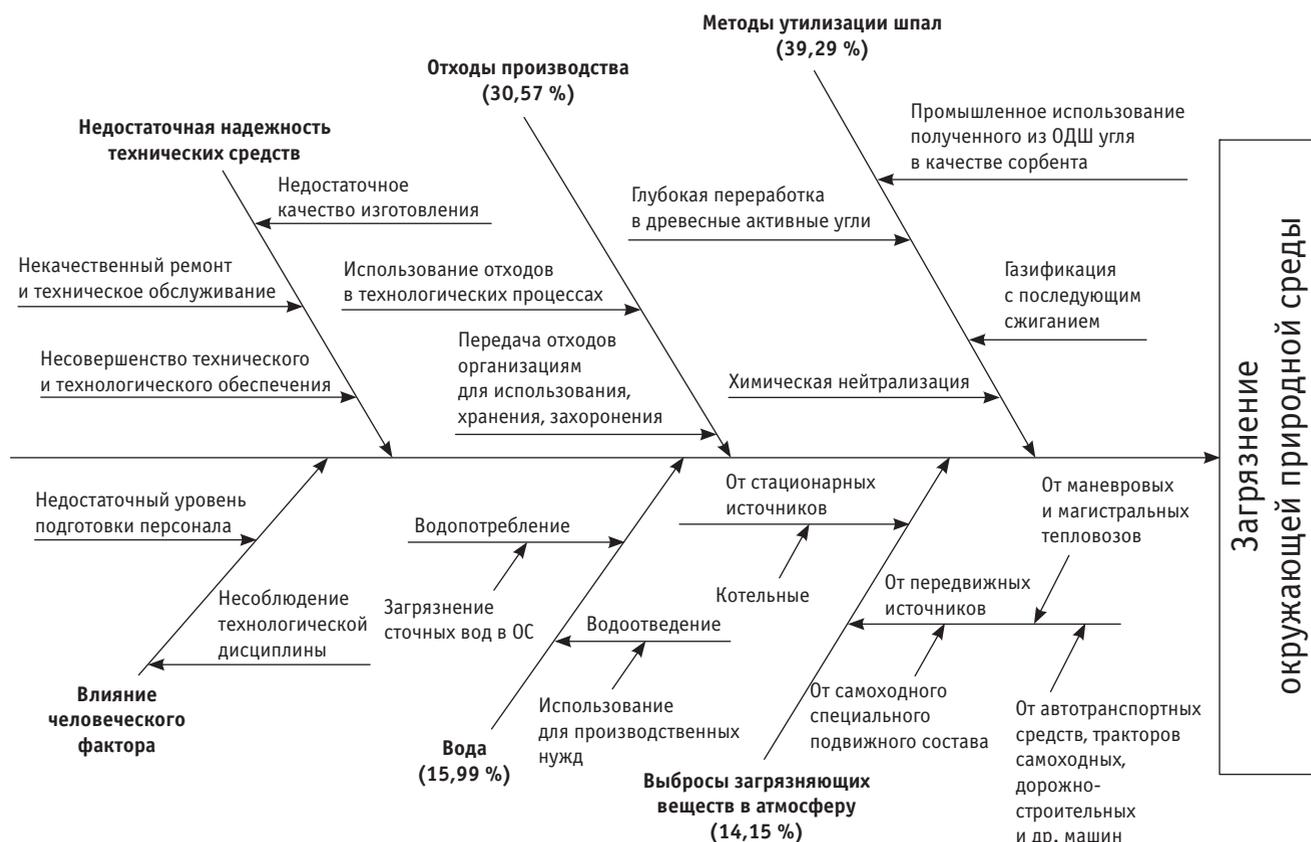


Рис. 3. Диаграмма Исикавы

## Литература

1. Об отходах производства и потребления : Федер. закон от 24.06.98 № 89-ФЗ // Собр. законодательства Рос. Федерации. 1998. № 26, ст. 3009.
2. Экологическая стратегия ОАО «РЖД» / утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 13.02.09 № 293р [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/regulatory\\_documents/07\\_293r.pdf](http://www.rzd-expo.ru/innovation/regulatory_documents/07_293r.pdf) (дата обращения: 16.10.2014).
3. Регламент идентификации требований законодательной и нормативно-технической документации в области охраны окружающей среды в ОАО «РЖД» / утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.12.13 № 2860р [Электронный ресурс]. URL: <http://scbist.com/scb/uploaded/docs/2013/dekabr-2013/5083-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-23-12-2013-n-2860r.htm> (дата обращения: 16.10.2014).
4. ГОСТ Р ИСО 14001-2007. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. М. : Стандартинформ, 2006. 25 с.
5. Булаев В. Г., Заплаткина Е. В. Применение диаграмм Парето и Исикавы для идентификации экологических аспектов при обращении с опасными отходами // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте : матер. III междунар. науч.-практ. конф. СПб. : ПГУПС, 2012.

## References

1. Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya : Feder. zakon Ros. Federatsii ot 24.06.98 № 89-FZ [On production and consumption waste : Feder. Law of the Russian Federation of 24.06.98 No. 89-FZ] // Sobr. zakonodatelstva Ros. Federatsii. 1998. № 26, st. 3009.
2. Ekologicheskaya strategiya OAO «RZD» / utv. rasporyazheniem OAO «RZD» ot 13.02.09 № 293r [Environmental Strategy of JSC «Russian Railways» / approved by order of JSC «Russian Railways» of 13.02.09 No. 293r]. [Electronic resource]. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/regulatory\\_documents/07\\_293r.pdf](http://www.rzd-expo.ru/innovation/regulatory_documents/07_293r.pdf) (date accessed: 16.10.2014).
3. Reglament identifikatsii trebovaniy zakonodatelnoy i normativno-tekhnicheskoy dokumentatsii v oblasti okhrany okruzhayushchey sredy v OAO «RZD» / utv. rasporyazheniem OAO «RZD» ot 23.12.13 № 2860r [Regulations for identification of legislative and normative-technical documentation requirements in the field of environmental protection at JSC «Russian Railways» / approved by order of JSC «Russian Railways» of 23.12.13 No. 2860r]. [ Electronic resource]. URL: <http://scbist.com/scb/uploaded/docs/2013/dekabr-2013/5083-rasporyazhenie-oao-RZD-ot-23-12-2013-n-2860r.htm> (date accessed: 16.10.2014).
4. GOST R ISO 14001-2007. Sistemy ekologicheskogo menedzhmenta. Trebovaniya i rukovodstvo po primeneniyu [Environmental management system. Requirements and implementation guidelines]. M. : Standartinform, 2006. 24 p.
5. Bulaev V. G., Zaplatkina E. V. Primenenie diagramm Pareto i Isikavy dlya identifikatsii ekologicheskikh aspektov pri obrashchenii s opasnymi otkhodami [Using Pareto and Ishikawa diagrams to identify environmental aspects of hazardous waste handling] // Tekhnosfernaya i ekologicheskaya bezopasnost na transporte : mater. III mezhdunar. nauch.-prakt. konf. SPb. : PGUPS, 2012.

6. Посвежинский В. Ф., Юрецкий С. В., Новосельцева Т. А. Выявление значимых экологических аспектов по критерию их приоритетности // Экология производства. 2008. № 5. С. 42. ISSN 2078-3981.
7. Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда [Электронный ресурс]. URL: [http://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/46/46047/index.php](http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/46/46047/index.php) (дата обращения: 16.10.2014).
8. Минько В. М. Математическое моделирование в управлении охраной труда. Калининград : Янтарный сказ, 2002. 184 с.
9. Булаев В. Г. Система экологического менеджмента — путь улучшения экологических параметров на железнодорожном транспорте // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте : матер. междунар. науч.-практ. конф. СПб. : ПГУПС, 2010. С. 126–129.
10. СТО РЖД 1.05.515.2-2009. Методы и инструменты улучшений. Анализ Парето / утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 02.06.09 № 1150р [Электронный ресурс]. URL: <http://oac.rgotups.ru/misc/files/40.45.9.pdf> (дата обращения: 16.10.2014).
11. СТО РЖД 1.05.515.3-2009. Методы и инструменты улучшений. Диаграмма Исикавы / утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 02.06.09 № 1150р [Электронный ресурс]. URL: <http://oac.rgotups.ru/misc/files/40.45.10.pdf> (дата обращения: 16.10.2014).
6. Posvezhinskiy V. F., Yuretskiy S. V., Novoseltseva T. A. Vyyavlenie znachimykh ekologicheskikh aspektov po kriteriyu ikh prioritetnosti [Identification of significant environmental aspects by criterion of priority] // Ekologiya proizvodstva. 2008. № 5. P. 42. ISSN 2078-3981.
7. R 2.2.2006-05. Rukovodstvo po gigienicheskoy otsenke faktorov rabochey sredy i trudovogo protsesssa. Kriterii i klassifikatsiya usloviy truda [Guidelines for hygienic evaluation of working environment and labor process factors. Criteria and classification of working conditions]. [Electronic resource]. URL: [http://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/46/46047/index.php](http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/46/46047/index.php) (date accessed: 16.10.2014).
8. Minko V. M. Matematicheskoe modelirovanie v upravlenii okhrany truda [Mathematical modeling in occupational safety management]. Kaliningrad : Yantarnyy skaz, 2002. 184 p.
9. Bulaev V. G. Sistema ekologicheskogo menedzhmenta — put uluchsheniya ekologicheskikh parametrov na zheleznodorozhnom transporte [Environmental management system — a way to improve environmental parameters in rail transport] // Tekhnosfernaya i ekologicheskaya bezopasnost na transporte : mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. SPb. : PGUPS, 2010. P. 126–129.
10. STO RZD 1.05.515.2-2009. Metody i instrumenty uluchsheniy. Analiz Pareto / utv. rasporyazheniem ОАО «RZD» ot 02.06.09 № 1150r [Methods and tools for improvement. Pareto analysis / approved by order of JSC «Russian Railways» of 02.06.09 No. 1150r]. [Electronic resource]. URL: <http://oac.rgotups.ru/misc/files/40.45.9.pdf> (date accessed: 16.10.2014).
11. STO RZD 1.05.515.3-2009. Metody i instrumenty uluchsheniy. Diagramma Isikavy / utv. rasporyazheniem ОАО «RZD» ot 02.06.09 № 1150r [Methods and tools for improvement. Ishikawa diagram / approved by order of JSC «Russian Railways» of 02.06.09 No. 1150r]. [Electronic resource]. URL: <http://oac.rgotups.ru/misc/files/40.45.10.pdf> (date accessed: 16.10.2014).

УДК 656.1

Юрий Васильевич Трофименко, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Владимир Сергеевич Ворожнин, младший научный сотрудник лаборатории атмосферы Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН), Екатеринбург

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УЧАСТНИКОВ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Yuriy Vasilyevich Trofimenko, DSc in Engineering, Head of Department of Technospheric Safety, Moscow Automobile and Road Construction University (MADI), Vladimir Sergeevich Vorozhnin, Junior Research Fellow, Atmosphere Laboratory, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IIE UB RAS), Ekaterinburg

### Method for environmental safety assessment of road users

#### Аннотация

Разработан показатель экологической безопасности участников дорожного движения, связанный с экспозицией городского населения загрязняющими веществами, выбрасываемыми автомобильным транспортом. На основе этого показателя дана оценка качества атмосферного воздуха для пешеходов, пассажиров и водителей общественного и индивидуального транспорта на 19-летнюю перспективу. С учетом обновления парка автомобилей, изменения степени их использования, а также снижения выбросов загрязняющих веществ за счет фотокаталитических нейтрализаторов в салонах автомобилей, фотокаталитических покрытий на объектах обустройства городских дорог и очищающих свойств деревьев рассчитана концентрация оксидов углерода и азота. Установлено, что совместное внедрение предлагаемых мер обеспечит достижение допустимой экологической безопасности средневзвешенного участника дорожного движения по оксиду углерода на 4–5-й, по оксидам азота — на 17–18-й год.

**Ключевые слова:** автомобильный транспорт, экологическая безопасность, участники дорожного движения, улично-дорожная сеть, очистка воздуха.

#### Summary

An indicator of environmental safety of road users has been developed, associated with exposure of the urban population to pollutants emitted by road transport. Based on this indicator, ambient air quality for pedestrians, passengers and drivers of public and private transport is assessed for 19-year perspective. Taking into account renewal of car fleet, changes in car utilization level, as well as reduction of emissions of pollutants due to photocatalytic converters installed in vehicles, as well as photocatalytic coatings on urban road side structures facilities and purification properties of trees, a concentration of carbon and nitrogen oxides is calculated. It is established that joint implementation of the proposed measures will ensure achievement of acceptable environmental safety of the average road user in 4–5 years in terms of carbon monoxide, and in 17–18 years in terms of nitrogen oxide.

**Keywords:** road transport, environmental safety, road users, street and road network, air purification.

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы для крупных городов характерно увеличение количества транспортных средств на улично-дорожной сети (УДС), что приводит к задержкам, перепробегам и повышенному загрязнению окружающей среды. Эта тенденция привлекла внимание специалистов к проблеме обеспечения качества жизни человека. В частности, согласно Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. [1], ведущее место в формировании транспортных систем занимает социальный фактор. Установленные приоритеты заставляют рассматривать человека не только как обязательный элемент функционирования транспортной системы, но и как ограничение для развития транспорта.

Соответственно необходим подход, который сможет предложить обоснованные решения по формированию комфортной и экологически благополучной городской среды, использованию подвижного состава и развитию улично-дорожной сети.

Одним из перспективных решений представляется разработка методики, позволяющей оценить экологическую безопасность транспорта по степени влияния на качество воздуха для участников дорожного движения (УДД).

В основу настоящей работы положен природно-совместимый подход, в котором городская транспортная система рассматривается в составе природно-технической системы, включающей дорожно-транспортный комплекс, окружающую среду и человека. При этом степень обеспечения приемлемых уровней загрязнения воздуха для средневзвешенного жителя города служит показателем экологической безопасности УДД.

В статье рассматривается метод оценки экологической безопасности участников дорожного движения, формируемой в процессе обновления экологической структуры автомобильного парка города под воздействием таких защитных мероприятий, как:

изменение степени использования транспортных средств (ТС) на городской дорожной сети;

повышение защитных свойств городской древесной растительности (за счет ежегодного прироста фитомассы);

внедрение фотокаталитических очистителей в салонах (кабинах) автомобилей, а также фотокаталитически активных покрытий на поверхностях объектов обустройства городских улиц и дорог.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования, которое проводилось в течение 2012 г., выбрана улично-дорожная сеть Екатеринбурга. В структуре общей площади города (около 490 км<sup>2</sup>) застроенные промышленные и селитебные территории составляют 38,3%, водоемы — 10,4%, улично-дорожная сеть — 6%, растительность — 45,3%. Большая часть промышленных, торговых, социальных объектов расположена вблизи центра Екатеринбурга, в значительной степени занятого застройкой (около 70% от площади центра города). Меньшая доля приходится на улично-дорожную сеть (около 16%) и на зеленые насаждения (11%).

Численность автомобильного парка на 1 января 2012 г. насчитывала около 690 тыс. зарегистрированных ТС. Причем в Екатеринбурге представлены практически все виды общественного транспорта — метрополитен, трамваи, троллейбусы, автобусы, маршрутные такси, городской электропоезд.

Население Екатеринбурга составляло на исследуемый период порядка 1377 тыс. человек [2]. Структура передвижения по городской УДС представлена на рис. 1 [3].

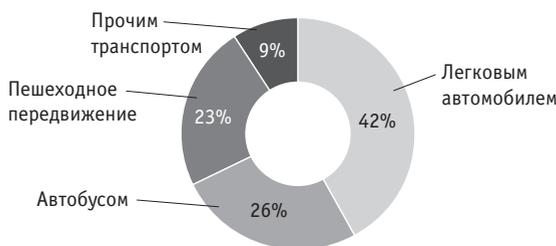


Рис. 1. Структура передвижений в Екатеринбурге

Экологическая безопасность транспорта формализована в виде показателя, связанного с определением степени воздействия вредных химических загрязняющих веществ (ЗВ) на средневзвешенного участника дорожного движения за время его перемещения  $A$ :

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l C_{ijk} \cdot X_{ijk} \cdot t_{ijk}}{Rf \cdot X_{tot} \cdot t_{tot}} \leq [A]_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где  $C_{ijk}$  — концентрация загрязняющего вещества по  $i$ -му типу на участниках дорожного движения  $j$ -й группы, находящихся в  $k$ -й транспортной зоне, мг/м<sup>3</sup>;

$X_{ijk}$  — количество участников дорожного движения  $j$ -й группы, находящихся в  $k$ -й транспортной зоне и подвергающихся  $i$ -му воздействию, чел.;

$t_{ijk}$  — время передвижения участников дорожного движения  $j$ -й группы в  $k$ -й транспортной зоне с  $i$ -м воздействием, ч;

$n$  — количество рассматриваемых компонентов, ед.;

$[A]_{\text{доп}}$  — допустимый коэффициент экологической безопасности для участников дорожного движения;

$m$  — количество групп УДД, ед.;

$l$  — количество выделенных транспортных зон, ед.;

$X_{tot}$  — общее количество участников дорожного движения, чел.;

$t_{tot}$  — время за рассматриваемый период (24 ч), ч;

$Rf$  — референтный уровень концентрации загрязняющих веществ, мг/м<sup>3</sup>.

Под транспортной зоной понималась городская территория с однородными условиями воздушной среды в пространственно-временном масштабе, предназначенная для передвижения участников дорожного движения.

На основе выражения (1) с использованием расчетной методики [4] оценивались следующие параметры, определяющие экологическую безопасность:

транспортные маршрутные характеристики участников дорожного движения (время, расстояние, скорость перемещения) по данным натурного обследования;

количественное распределение участников движения по улично-дорожной сети (использовалась информация о характеристиках дорожной сети, автомобильного парка и поведения населения);

текущие концентрации загрязняющих веществ в воздухе (применялись методы расчета выбросов автомобильного транспорта [5] и модели рассеивания [6, 7]).

Участники дорожного движения объединены в группы по сходным условиям места нахождения и времени передвижения. Для полного учета воздействия транспорта рассматривалось все городское население, которое выделено в четыре группы: водители и пассажиры индивидуального транспорта (ИТ), водители и пассажиры общественного транспорта (ОТ), пешеходы (ПУ), жители селитебных территорий в зоне влияния УДС (ПР). Время и режим перемещения людей согласовывались с суточным режимом движения автомобильного транспорта на улично-дорожной сети.

Поскольку анализ всех выделяемых транспортом компонентов (более 200 ЗВ [8]) затруднителен, в качестве основных выбраны оксид углерода и оксиды азота, которые учитываются при мониторинге загрязнения атмосферного воздуха. Доля этих компонентов достигает 90% от массы всех токсичных загрязняющих веществ, выбрасываемых автотранспортом в воздух. Кроме того, достаточно легко оценить выбросы оксида углерода и оксидов азота с помощью расчетных методик (например, методики НИИАТ [5]) и сравнить эти результаты с данными измерений (в частности, с постов сети мониторинга).

Выполнялась почасовая оценка пространственного распределения концентраций ЗВ в воздухе городской среды на основе предположения о том, что качество воздуха формируется за счет взаимодействия природных и техногенных составляющих природно-технической системы, к которым относятся: поток поступления загрязнения в окружающую среду (источники ЗВ), сток транспортного загрязнения в природную среду в зоне влияния автомобильных дорог (стоки ЗВ) с учетом погодных (т. е. внешних) условий.

Качество воздуха для участников дорожного движения оценивалось с использованием гауссовой модели рассеяния GFLSM загрязняющих веществ от автомагистрали для городских условий [7]. Кроме того, учитывалось прохождение загрязненного на автомагистрали воздушного потока через очистные сооружения (систему стоков). Из-за отсутствия адекватных моделей оценки концентраций в кабинах ТС осуществлялся пересчет концентраций ЗВ в воздушную среду групп УДД с помощью регрессионных моделей, полученных по результатам измерений на улично-дорожной сети [9]. При оценке концентраций учитывалась текущая стратификация атмосферы и измеренные значения фоновой концентрации (без учета вклада автомобилей).

Очистка загрязненного воздуха поверхностями фотокатализаторов и удаление ЗВ при помощи городских растений оценивались с использованием расчетных методик, основные положения которых приведены в [9].

В настоящей работе приняты следующие ограничения и допущения.

1. Транспортный спрос на УДС города сохраняется.
2. Численность городского населения в перспективе сохраняется.
3. Изменение степени использования автомобилей на УДС рассматривается в общем виде (без учета конкретных мероприятий) согласно закономерностям, установленным на основе официально опубликованных данных [10].
4. Экологические характеристики автомобилей с увеличением возраста ТС сохраняются.
5. В качестве активного материала фотокаталитических нейтрализаторов рассматривается  $TiO_2$ , содержащий 0,2% платины.
6. Фотокаталитическими нейтрализаторами оборудуются системы вентиляции всех вновь поступающих в парк автомобилей.
7. Ввод новых фотокаталитических поверхностей в районе пешеходных зон наиболее загрязненных улиц составляет около  $20000 \text{ м}^2/\text{год}$  с каждой стороны улицы с сохранением свойств уже установленных поверхностей.
8. Время передвижения участников движения сохраняется.
9. В качестве референтного уровня рассматривается среднесуточная предельно допустимая концентрация.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При комплексном обследовании определены и спрогнозированы состав и численность парка автомобилей в Екатеринбурге, в том числе количество ТС, одновременно передвигающихся по участкам УДС, а также рассчитан выброс ЗВ в атмосферный воздух при их эксплуатации. На основе этих данных получены средние концентрации ЗВ на перспективу при обновлении экологического класса парка автомобилей (рис. 2), средневзвешенное значение которого на базовый расчетный период соответствовало Евро-2.

Рассчитан эффект, получаемый от использования фотокаталитического очистителя в салоне (кабине) автомобиля (группы ИТ и ОТ) и фотокаталитически активных покрытий на поверхностях объектов обустройства городских улиц и дорог (рис. 3).

Удаление загрязняющих веществ растительностью оказывает положительное воздействие на качество воздуха, но, по-

скольку вносит незначительный вклад, может рассматриваться в качестве дополнительных мер очистки. Пример оценки влияния ежегодного прироста фитомассы городских деревьев на концентрацию ЗВ приведен на рис. 4.

Отдельно рассматривалась динамика концентраций ЗВ при изменении степени использования транспорта (рис. 5).

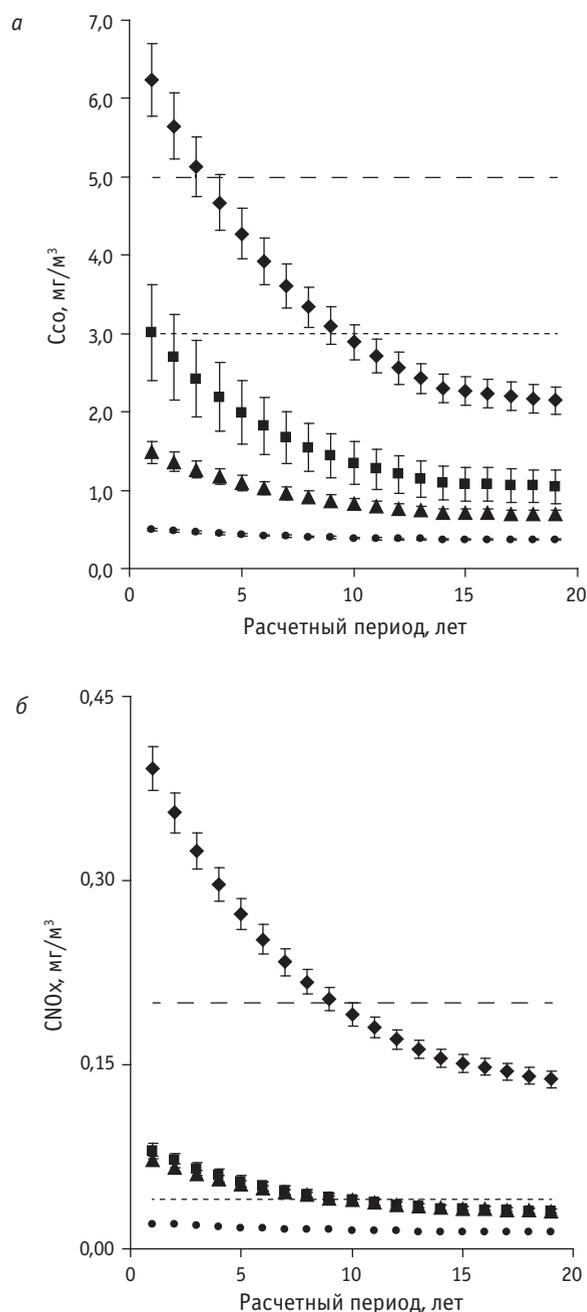
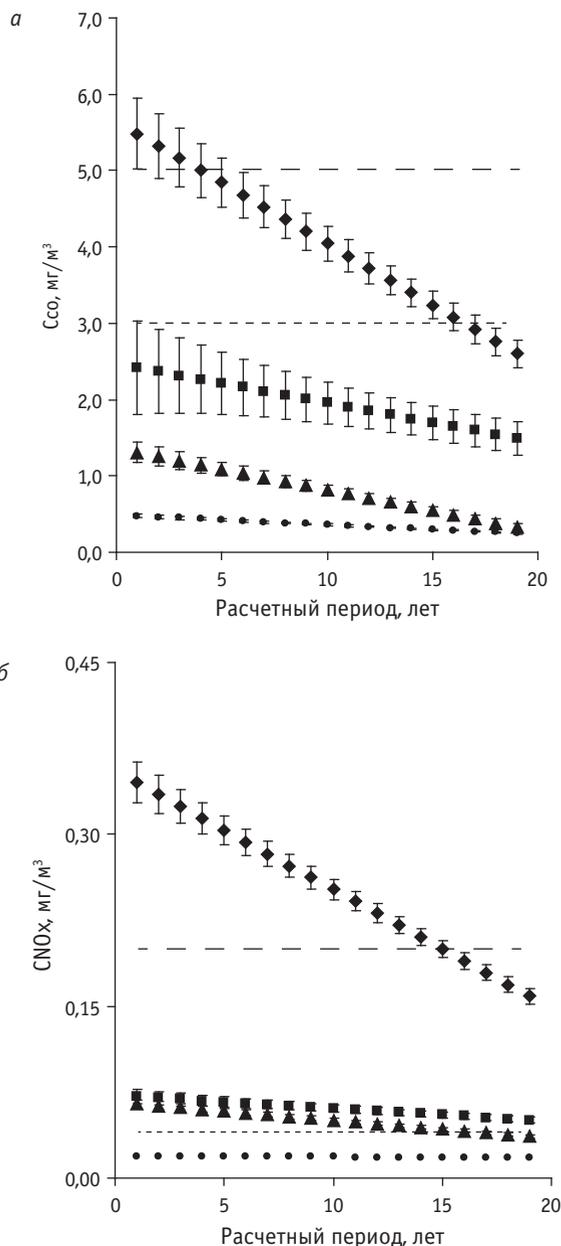


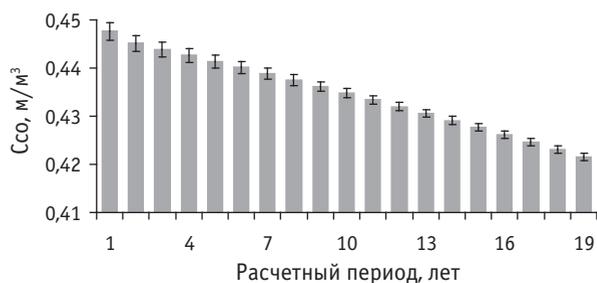
Рис. 2. Изменение концентраций оксида углерода (а) и оксидов азота (б) при обновлении парка автомобилей:

ПДК<sub>ср</sub> — предельно допустимая концентрация среднесуточная;  
 ПДК<sub>сс</sub> — предельно допустимая концентрация максимально разовая;  
 ◆ — ИТ; ■ — ОТ; ▲ — ПУ; ● — ПР; - - - - ПДК<sub>ср</sub>; - - - - ПДК<sub>сс</sub>

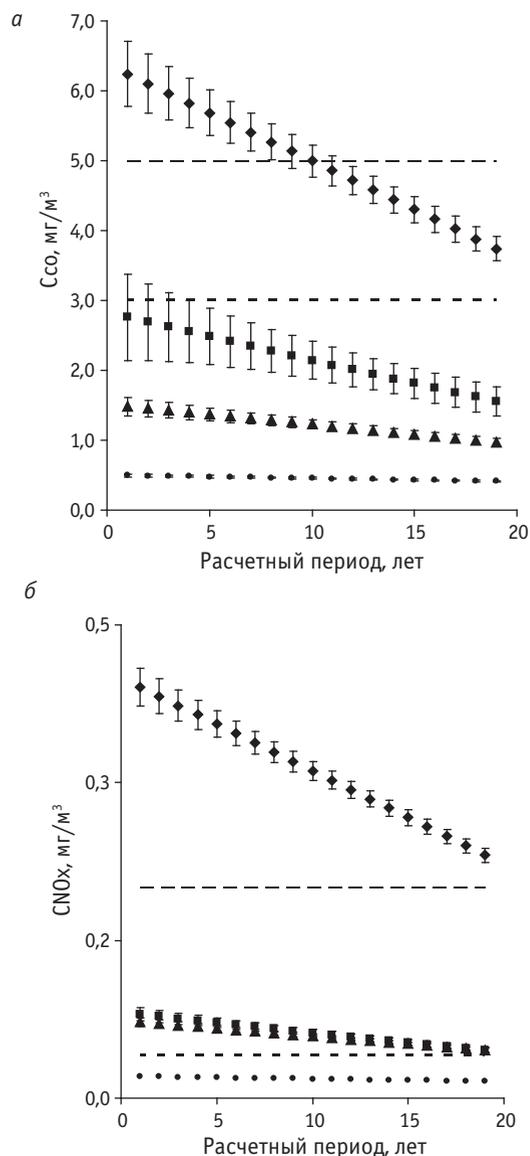
Рассчитаны концентрации загрязняющих веществ на перспективу при совместном воздействии таких факторов, как обновление парка автомобилей, изменение степени использования ТС на улично-дорожной сети, снижение стока ЗВ за счет очищающих свойств растительности, применения фотокаталитических нейтрализаторов в салонах автомобилей и фотокаталитических покрытий на объектах обустройства городских улиц и дорог (рис. 6).



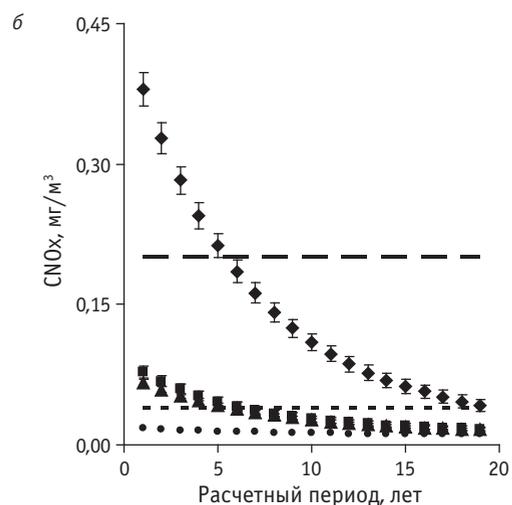
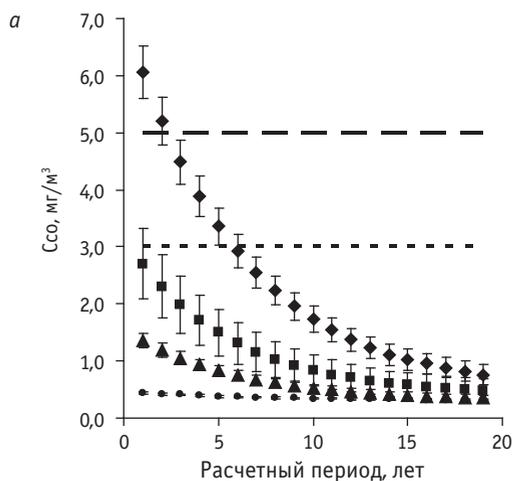
**Рис. 3.** Изменение концентраций оксида углерода (а) и оксидов азота (б) при использовании фотокаталитических нейтрализаторов:  
 ◆ — ИТ; ■ — ОТ; ▲ — ПУ; ● — ПР; - - - - - ПДК<sub>СС</sub>; — — — — — ПДК<sub>МР</sub>



**Рис. 4.** Средняя концентрация оксида углерода в воздухе города при изменении прироста растительности



**Рис. 5.** Динамика концентраций оксида углерода (а) и оксидов азота (б) при изменении степени использования парка автомобилей:  
 ◆ — ИТ; ■ — ОТ; ▲ — ПУ; ● — ПР; - - - - - ПДК<sub>СС</sub>; — — — — — ПДК<sub>МР</sub>



**Рис. 6. Изменение концентраций оксида углерода (а) и оксидов азота (б) при совместном использовании предложенных мероприятий:**

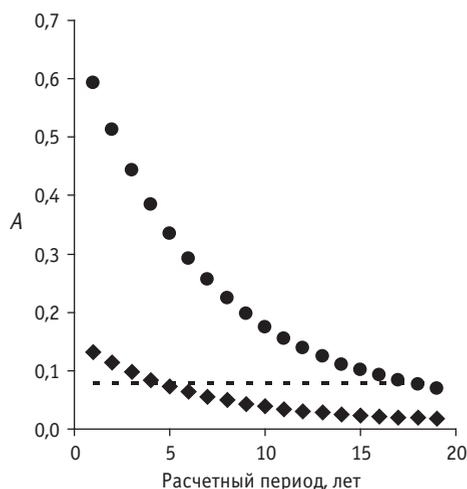
◆ — ИТ; ■ — ОТ; ▲ — ПУ; ● — ПР; ----- ПДК<sub>сс</sub>; ----- ПДК<sub>мр</sub>

На основе оценки концентраций ЗВ определены допустимые уровни (табл. 1) экологической безопасности и ее динамика (рис. 7).

Таблица 1

Допустимые значения коэффициентов экологической безопасности

Группа участников дорожного движения	$A_{\text{доп}}$
Водители и пассажиры индивидуального транспорта (ИТ)	0,0828
Водители и пассажиры общественного транспорта (ОТ)	0,0678
Пешеходы (ПУ)	0,0625
Средневзвешенное значение для всех групп УДД	0,0777



**Рис. 7. Изменение экологической безопасности:**

----- 1; ◆ — 2; ● — 3;  
1 —  $A_{\text{доп}}$ ; 2 —  $A_{\text{CO}}$ ; 3 —  $A_{\text{NOx}}$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований разработан показатель экологической безопасности участников дорожного движения на УДС города. Он основан на оценке экспозиции средневзвешенного участника дорожного движения в условиях транспортного загрязнения воздушной среды.

Расчетным путем спрогнозирована динамика экологической безопасности на перспективу под влиянием таких факторов, как обновление парка автомобилей, изменение степени использования ТС на улично-дорожной сети, снижение стока ЗВ за счет применения фотокаталитических нейтрализаторов в салонах автомобилей, фотокаталитических покрытий на объектах обустройства городских улиц и дорог, а также за счет очищающих свойств деревьев.

Установлено, что совместное использование рассмотренных мер по снижению загрязнения воздуха в городской среде обеспечит достижение допустимой экологической безопасности средневзвешенного участника дорожного движения по оксиду углерода на 4–5-й, по оксидам азота — на 17–18-й год.

## Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года / утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.08 № 1734-р [Электронный ресурс]. URL: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer\\_id=5104&STRUCTURE\\_ID=704](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704) (дата обращения: 14.05.2014).
2. Численность населения регионов Уральского федерального округа по муниципальным образованиям на 1 января 2013 года : статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Свердловской области. Екатеринбург, 2013. 68 с.
3. Ворожнин В. С. Изучение автотранспортного воздействия на участников дорожного движения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13 (39). № 1 (8). С. 1848–1852.
4. Трофименко Ю. В., Якимов М. Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов : монография. М. : Логос, 2013. 464 с.
5. Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ от автотранспортных средств на территории крупнейших городов. М. : Автополис-плюс, 2008. 80 с.
6. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
7. Luhar A. K., Patil R. S. A general finite line source model for vehicular pollution prediction // Atmospheric Environment. 1989. Vol. 23. P. 555–562.
8. Kuhlwein J., Friedrich R. Uncertainties of modelling emissions from road transport // Atmospheric Environment. 2000. Vol. 34. P. 4603–4610.
9. Оценка эффективности очистки воздуха на улично-дорожной сети крупного города зелеными насаждениями и фотокаталитическими очистителями / Ю. В. Трофименко, В. С. Ворожнин, В. Б. Давыдов и др. // Безопасность в техносфере. 2014. № 6. С. 53–60.
10. Стратегический план развития муниципального образования «город Екатеринбург» до 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ekburg.ru/officially/strategy\\_plan/newproject/](http://www.ekburg.ru/officially/strategy_plan/newproject/) (дата обращения: 14.05.2014).

## References

1. Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda / utv. rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 22.11.08 № 1734-r [Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 / approved by order of the Government of the Russian Federation of 22.11.08 No. 1734-r]. [Electronic resource]. URL: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer\\_id=5104&STRUCTURE\\_ID=704](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704) (date accessed: 14.05.2014).
2. Chislennost naseleniya regionov Uralskogo federalnogo okruga po munitsipalnym obrazovaniyam na 1 yanvarya 2013 goda : statisticheskiy sbornik [Population of the Urals Federal District regions by municipalities as of January 1, 2013 : statistical yearbook] / Territorialnyy organ Federalnoy sluzhby gosudarstvennoy statistiki po Sverdlovskoy oblasti. Ekaterinburg, 2013. 68 p.
3. Vorozhnin V. S. Izuchenie avtotransportnogo vozdeystviya na uchastnikov dorozhnogo dvizheniya [A study of the impact of road transport on road users] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2011. T. 13 (39). № 1 (8). P. 1848–1852.
4. Trofimenko Yu. V., Yakimov M. R. Transportnoe planirovanie: formirovanie effektivnykh transportnykh sistem krupnykh gorodov : monografiya [Transport planning: creation of efficient transport systems in large cities : a monograph]. M. : Logos, 2013. 464 p.
5. Raschetnaya instruksiya (metodika) po inventarizatsii vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv ot avtotransportnykh sredstv na territorii krupneyshikh gorodov [Calculation instruction (method) for inventory of pollutant emissions from motor vehicles in the territory of major cities]. M. : Avtopolis-plyus, 2008. 80 p.
6. Berlyand M. E. Sovremennye problemy atmosfery i zagryazneniya atmosfery [Modern problems of atmospheric diffusion and air pollution]. L. : Gidrometeoizdat, 1975. 448 p.
7. Luhar A. K., Patil R. S. A general finite line source model for vehicular pollution prediction // Atmospheric Environment. 1989. Vol. 23. P. 555–562.
8. Kuhlwein J., Friedrich R. Uncertainties of modelling emissions from road transport // Atmospheric Environment. 2000. Vol. 34. P. 4603–4610.
9. Otsenka effektivnosti ochistki vozdukh na ulichno-dorozhnoy seti krupnogo goroda zelenymi nasazhdeniyami i fotokataliticheskimi ochistitelyami [Evaluation of air purification along road network of a large city by green spaces and photocatalytic air purifiers] / Yu. V. Trofimenko, V. S. Vorozhnin, V. B. Davydov i dr. // Bezopasnost v tekhnosfere. 2014. № 6. P. 53–60.
10. Strategicheskiiy plan razvitiya munitsipalnogo obrazovaniya «gorod Ekaterinburg» do 2020 g. [Strategic Development Plan of the municipality «City of Ekaterinburg» to 2020]. [Electronic resource]. URL: [http://www.ekburg.ru/officially/strategy\\_plan/newproject/](http://www.ekburg.ru/officially/strategy_plan/newproject/) (date accessed: 14.05.2014).

УДК 629.113

**Сергей Александрович Войнаш, инженер кафедры «Наземные транспортные системы» Рубцовского индустриального института — филиала Алтайского государственного технического университета (РИИ АлтГТУ), Александр Станиславович Войнаш, доцент кафедры «Наземные транспортные системы» Рубцовского индустриального института — филиала Алтайского государственного технического университета (РИИ АлтГТУ), Александр Станиславович Демидов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты и транспортные тоннели» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург**

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФЕРМЕРСКОГО МАЛОТОННАЖНОГО ГРУЗОВИКА

**Sergey Alexandrovich Voynash, engineer, Department of Land Transport Systems, Rubtsovsk Industrial Institute — a branch of Altai State Technical University (RII AltSTU), Alexander Stanislavovich Voynash, Associate Professor, Department of Land Transport Systems, Rubtsovsk Industrial Institute — a branch of Altai State Technical University (RII AltSTU), Alexander Stanislavovich Demidov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Bridges and Tunnels, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg**

### Specifics of agricultural light truck

#### Аннотация

Сформулирован комплекс требований к конструкции кузова фермерского малотоннажного грузовика.

Рассмотрена реализация этих требований за счет схемных решений, предложенных на патентном уровне (патенты РФ на изобретения № 2449902, 2469883, 2484987, 2486076 и на полезные модели № 103332, 111071, 111072, 134859), по оснащению устройствами, которые легко монтируются на элементы кузова (боковые стенки, днище и др.) и при помощи которых осуществляется не только самопогрузка-разгрузка затаренных и штучных грузов, но и внесение в почву органических удобрений, уборка урожая, раздача кормов и т. п. Выполнена аналитическая оценка эффективности конструкции фермерского грузовика, оснащенного самосвальным кузовом аппаратного типа и тяговой лебедкой. Результаты расчета усилий на канате лебедки, представленные графически, позволили сделать вывод о расширении технологических возможностей фермерского грузовика при использовании самосвального кузова аппаратного типа: грузовик может эффективно применяться в составе сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов, в том числе на энергоемких операциях.

**Ключевые слова:** фермерский грузовик, погрузка, транспортировка, тяговая лебедка, самосвальный кузов аппаратного типа, тяговые режимы.

#### Summary

A set of requirements has been formulated for the design of the body of agricultural light truck.

Implementation of these requirements is analyzed, based on the use of patent pending design solutions (RF patent Nos. 2449902, 2469883, 2484987, 2486076 and utility model Nos. 103332, 111071, 111072, 134859) allowing to install devices that are easily mounted on tailgate (side walls, the bottom etc), used not only for self-unloading and loading of bagged and piece goods, but also for application of organic fertilizers, harvesting, distribution of feed and etc. Analytical evaluation of the effectiveness of agricultural truck design equipped with ramp-type tipper body and pull winch is performed. The results of analysis of forces on winch rope, presented graphically, led to the conclusion of expanding technological capabilities of the agricultural truck using ramp-type tipper body: the truck can be used effectively as a part of agricultural tractor units, including for energy-intensive operations.

**Keywords:** agricultural truck, loading, transportation, pull winch, ramp-type tipper body, traction modes.

**Д**ля транспортного обеспечения ежедневных производственных процессов в хозяйствах малых форм — крестьянских/фермерских (КФХ) и личных подсобных (ЛПХ) — целесообразно использовать малотоннажные грузовики, техническая характеристика которых формируется значением номинальной рейсовой нагрузки 900–1200 кг.

Известны работы ряда организаций (НАМИ, МГАУ им. В. П. Горячкина, РИИ АлтГТУ и др.), посвященных тематике малотоннажных грузовиков сельскохозяйственного назначения [1–7].

Анализ выполненных конструкций и патентной информации показал, что кузов фермерского грузовика должен отвечать комплексу требований, среди которых помимо общих (малая масса, высокая надежность и др.) выделяются следующие:

приспособленность к транспортировке разнообразных по характеру грузов (сельскохозяйственной растениеводческой и животноводческой продукции, строительных материалов, древесины и т. д.), что достигается за счет самосвальности, легкоочищаемости, возможности закрепления на кузове различных погрузочных приспособлений (стрелы, погрузочных рычагов и т. п.);

возможность участия кузова в реализации тяговых режимов фермерского грузовика, например, при подтягивании штучных и затаренных грузов;

создание условий для снижения трудоемкости погрузочно-разгрузочных работ.

В ходе исследований, проведенных в РИИ АлтГТУ, был разработан, изготовлен и испытан в реальных эксплуатационных условиях фермерский малотоннажный грузовик ЭМ-0,6 с двигателем мощностью 21 кВт, оснащенный гидроуправляемым самосвальным кузовом аппаратного типа и тяговой лебедкой.

Термин «аппарельный тип» предложен в РИИ АлтГТУ для характеристики самосвального кузова, имеющего возможность упора задней кромкой днища в почву при крайнем положении поднятого кузова. Как известно, аппаратель — это наклонная плоскость, по которой перемещают грузы. В нашем случае аппарателью является днище самосвального кузова фермерского грузовика; упор задней кромки днища в почву создает условия для погрузки затаренных грузов путем их затаскивания с поверхности почвы в кузов при помощи каната тяговой лебедки, запасованного в блок, который установлен на передней стенке кузова.

Самосвальный кузов аппарательного типа в сочетании с тяговой лебедкой соответствует большинству сформулированных выше требований. Так, участие кузова в реализации тяговых режимов фермерского грузовика при подтягивании штучных и затаренных грузов значительно расширяет технологические возможности последнего. Для количественной оценки таких возможностей рассмотрим следующие расчетные случаи:

- 1) незаторможенный грузовик с самосвальным кузовом в транспортном положении канатом лебедки подтягивает груз (рис. 1а);
- 2) заторможенный грузовик с самосвальным кузовом в транспортном положении канатом лебедки подтягивает груз (рис. 1б);
- 3) грузовик с самосвальным кузовом, упертым в почву, канатом лебедки подтягивает груз (рис. 1в).

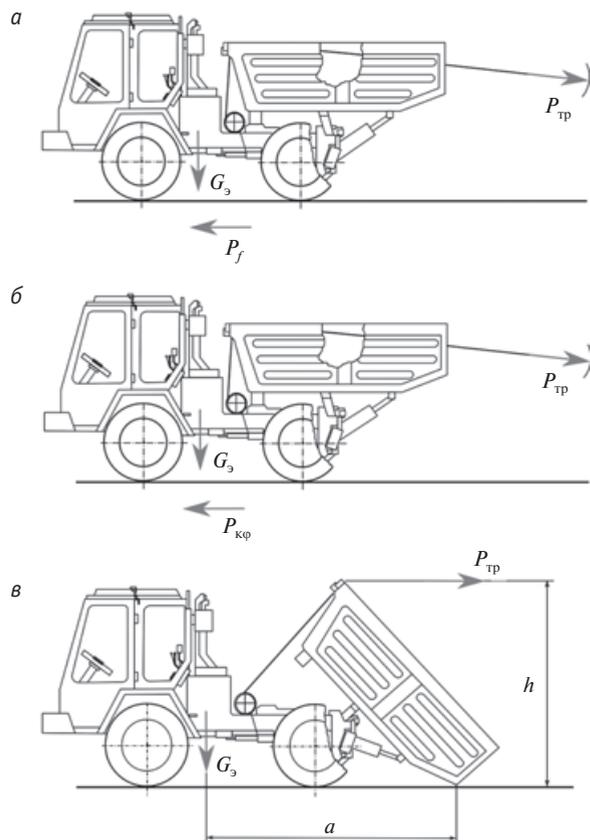


Рис. 1. Подтягивание груза фермерским грузовиком

Для всех расчетных случаев условно принято, что канат, сходящий с блока, установленного на передней стенке самосвального кузова, в начале подтягивания груза расположен горизонтально опорной поверхности автотрактора. Такое допущение с погрешностью, не превышающей 5%, правомочно при длине размотки каната более 15 м.

Формулы:

для первого расчетного случая

$$P_{тр} < P_f = f \cdot G_3; \quad (1)$$

для второго расчетного случая

$$P_{тр} < P_{кф} = \lambda \cdot \phi \cdot G_3; \quad (2)$$

для третьего расчетного случая

$$P_{тр} < G_3 \cdot a / h, \quad (3)$$

где  $P_{тр}$  — усилие на канате лебедки;  
 $P_f$  — сила сопротивления качению автотрактора;  
 $f$  — коэффициент сопротивления качению колес;  
 $G_3$  — полный вес грузовика;  
 $P_{кф}$  — максимальная касательная сила тяги по сцеплению с почвой;  
 $\lambda$  — коэффициент нагрузки задних ведущих колес;  
 $\phi$  — коэффициент сцепления;  
 $a$  и  $h$  — соответственно плечи сил  $G_3$  и  $P_{тр}$ .  
 Результаты расчетов по формулам (1)–(3) представлены на рис. 2.

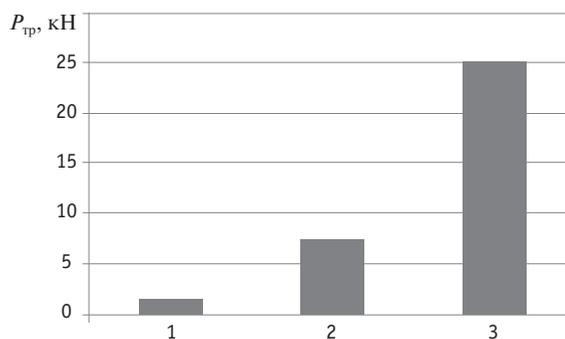


Рис. 2. Усилия в канате при подтягивании груза: 1 — по формуле (1); 2 — по формуле (2); 3 — по формуле (3)

Из расчетов следует, что при использовании самосвального кузова аппарательного типа фермерский грузовик реализует усилия, достаточные не только для подтягивания затаренных грузов, но и для работы сельхозмашин малой размерности. Например, для плуга с рабочей шириной захвата 0,35 м требуется усилие до 6 кН, для плуга с рабочей шириной захвата 0,7 м — усилие до 12 кН и т. д. Таким образом, фермерский грузовик, оснащенный самосвальным кузовом аппарательного типа и тяговой лебедкой, может эффективно использоваться в составе сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов, в том числе на энергоемких операциях.

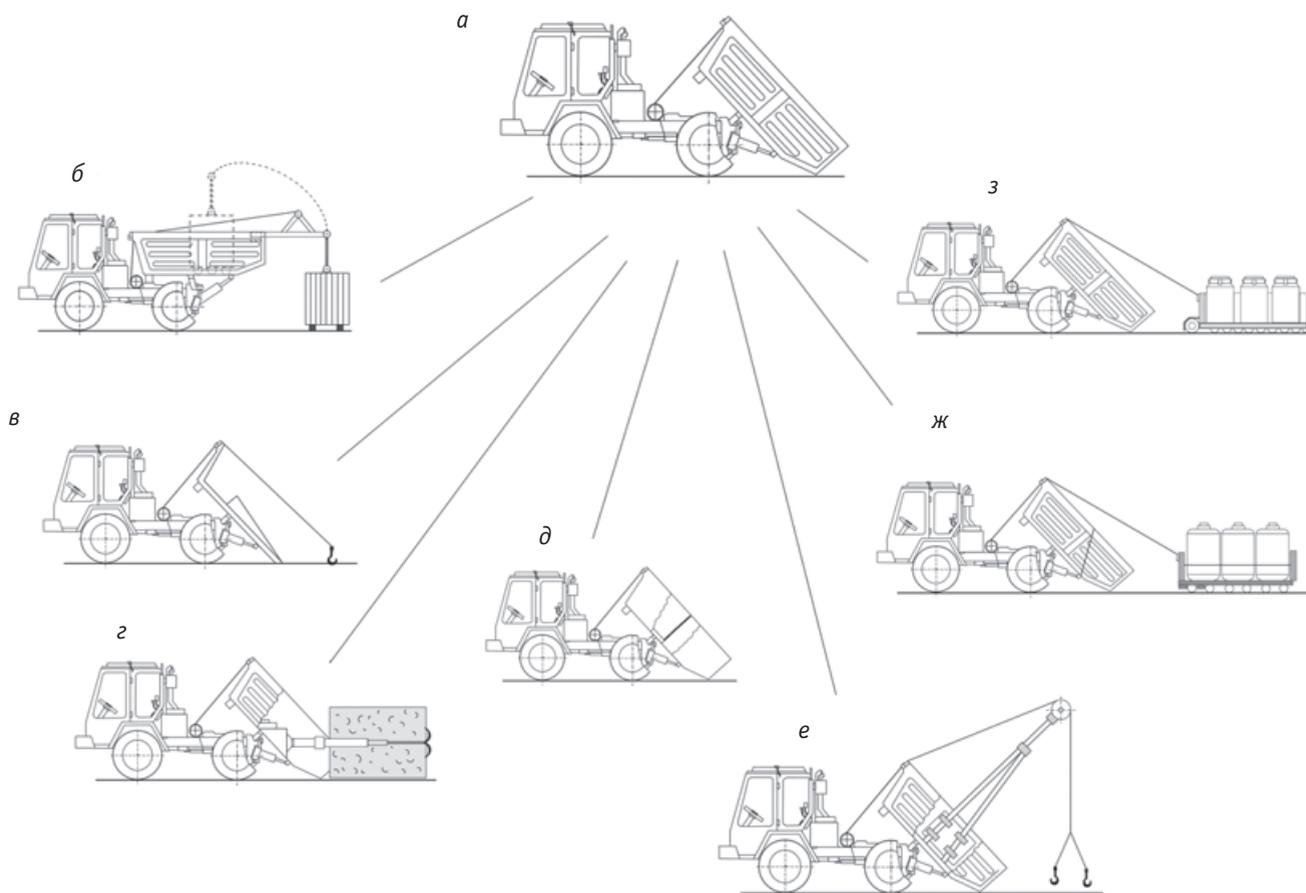
Для повышения приспособленности конструкции малотоннажного грузовика к погрузочно-транспортно-технологическим работам в растениеводстве и животноводстве были предложены схемные решения по устройствам, которые легко монтируются на элементы кузова (боковые стенки, днище и др.) и при помощи которых осуществляется не только самопогрузка-разгрузка затаренных и штучных грузов, но и внесение в почву органических удобрений, уборка урожая, раздача кормов и т. п. (рис. 3).

При помощи предлагаемых устройств можно получить необходимые погрузочно-транспортно-технологические комплекты фермерского грузовика, соответствующие производственным задачам, решаемым в растениеводстве, животноводстве и других сферах деятельности КФХ и ЛПХ. Так, механизм порционной разгрузки самосвального кузова (см. рис. 3д) позволяет использовать грузовик в качестве транспортного средства для порционного внесения органических удобрений или для раздачи кормов животным; погрузочно-транспортное устройство для перевозки рулонного сена (см. рис. 3г) и погрузоч-

ные устройства для штучных и затаренных грузов (см. рис. 3б, ж, з) практически полностью исключают использование ручного труда на погрузочно-транспортных операциях сельскохозяйственного производства.

Теоретическое обоснование предложенных схемных решений транспортно-технологических комплектов фермерского грузовика рассмотрено в работах [16–20].

На краевом конкурсе инновационных проектов «Новый Алтай — 2012» [21] фермерский грузовик РИИ АлтГТУ с комплектом навесных устройств для самопогрузки-разгрузки получил третье место в номинации «Лучшая инновационная идея», а в 2013 г. на Всероссийском конкурсе научно-исследовательских и проектных работ «Устойчивое будущее России» проект по использованию малотоннажного грузовика для механизации производственных процессов при малых формах хозяйствования занял второе место в номинации «Разработка, создание и продвижение на рынок продукции, соответствующей концепции устойчивого развития: как завоевать успех у потребителей».



**Рис. 3. Схемные решения приспособленности конструкции фермерского грузовика к погрузочно-транспортно-технологическим работам:**

- а* — самосвальный кузов аппаратного типа [8]; *б* — механизм для контейнерной погрузки-разгрузки [9];  
*в* — грузовая платформа, оснащенная коником [10]; *г* — сеноуборочный агрегат [11]; *д* — механизм порционной разгрузки кузова [12];  
*е* — механизм погрузки-разгрузки с навесной стрелой ферменного типа [13]; *ж* — механизм погрузки затаренных насыпных и навалочных грузов [14]; *з* — механизм кассетной погрузки-разгрузки молочных флагов [15]

## Литература

1. Дзотсенидзе Т. Д. Обоснование параметров малогабаритных транспортных средств сельскохозяйственного назначения с широкими функциональными возможностями : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М. : МГАУ, 2009. 33 с.
2. Автомобильный транспорт для малых форм хозяйствования. Конструкция и особенности эксплуатации : монография / Т. Д. Дзотсенидзе, М. А. Козловская, Д. А. Загарин и др. М. : Metallurgizdat, 2011. 288 с.
3. Загарин Д. А. Обоснование параметров и режимов работы малогабаритного транспортного средства для малых форм хозяйствования : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : МГАУ, 2010. 16 с.
4. Войнаш С. А., Войнаш А. С. Анализ концептуальных подходов к решению проблемы механизации работ в крестьянских (фермерских) хозяйствах // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 3. С. 51–55. ISSN 0235-8573.
5. Войнаш С. А. Малотоннажный грузовой автомобиль для подсобных хозяйств населения // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2014. № 31. С. 126–129. ISSN 1694-5557.
6. Фермерский грузовик с самосвальным кузовом аппаратного типа / С. А. Войнаш, А. С. Войнаш, Т. А. Жарикова и др. // Аграрная наука — сельскому хозяйству : сб. статей ; кн. 3. Барнаул : РИО АГАУ, 2013. С. 32–34.
7. Войнаш С. А., Войнаш А. С., Демидов А. С. Повышение проходимости и маневренности фермерского малотоннажного грузовика // Транспорт Урала. 2014. № 3 (42). С. 86–89. ISSN 1815-9400.
8. Транспортное средство / А. С. Войнаш, С. А. Войнаш : пат. на полезную модель 103332 RU В60P 1/00 Российская Федерация. № 2010148481/11 ; заявл. 26.11.10 ; опубл. 10.04.11, Бюл. № 10.
9. Погрузочно-транспортное средство / А. С. Войнаш, С. А. Войнаш : пат. на полезную модель 111071 RU В60P 1/00 Российская Федерация. № 2011111815/11 ; заявл. 29.03.11 ; опубл. 10.12.11, Бюл. № 34.
10. Транспортное средство / С. А. Войнаш, А. С. Войнаш : пат. 2484987 Российская Федерация. № 2012110274/11 ; заявл. 16.03.12 ; опубл. 20.06.13, Бюл. № 17.
11. Погрузочно-транспортное средство / А. С. Войнаш, С. А. Войнаш, Т. А. Жарикова : пат. 2486076 Российская Федерация. № 2012118445/11 ; заявл. 03.05.12 ; опубл. 27.06.13, Бюл. № 18.
12. Транспортное средство / С. А. Войнаш, А. С. Войнаш : пат. 2469883 Российская Федерация. № 2011131419/11 ; заявл. 28.07.11 ; опубл. 20.12.12, Бюл. № 35.
13. Погрузочно-транспортное средство / А. С. Войнаш, С. А. Войнаш : пат. 2449902 Российская Федерация. № 2011101851/11 ; заявл. 19.01.11 ; опубл. 10.05.12, Бюл. № 13.
14. Погрузочно-транспортное средство / А. С. Войнаш, С. А. Войнаш, Т. А. Жарикова : пат. на полезную модель 134859 RU В60P 1/00 Российская Федерация. № 2013113807/11 ; заявл. 27.03.13 ; опубл. 27.11.13, Бюл. № 33.
15. Транспортное средство / А. С. Войнаш, С. А. Войнаш : пат. на полезную модель 111072 RU В60P 1/00 Российская Федерация. № 2011111816/11 ; заявл. 29.03.11 ; опубл. 10.12.11, Бюл. № 34.

## References

1. Dzotsenidze T. D. Obosnovanie parametrov malogabaritnykh transportnykh sredstv selskokhozyaystvennogo naznacheniya s shirokimi funktsionalnymi vozmozhnostyami : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Substantiation of parameters of small vehicles for agricultural use with multiple functions : Synopsis of DSc in Engineering Thesis]. M. : MGAU, 2009. 33 p.
2. Avtomobilnyy transport dlya malykh form khozyaystvovaniya. Konstruktsiya i osobennosti ekspluatatsii : monografiya [Road transport for small farms. Design and operating features : a monograph] / T. D. Dzotsenidze, M. A. Kozlovskaya, D. A. Zagarin i dr. M. : Metallurgizdat, 2011. 288 p.
3. Zagarin D. A. Obosnovanie parametrov i rezhimov raboty malogabaritnogo transportnogo sredstva dlya malykh form khozyaystvovaniya : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Substantiation of parameters and operating modes of light vehicles for small farms : Synopsis of PhD in Engineering Thesis]. M. : MGAU, 2010. 16 p.
4. Voynash S. A., Voynash A. S. Analiz kontseptualnykh podkhodov k resheniyu problemy mekhanizatsii rabot v krestyanskikh (fermerskikh) khozyaystvakh [Analysis of conceptual approaches to the issue of mechanization at peasant farms] // Traktory i selkhoz mashiny. 2012. № 3. P. 51–55. ISSN 0235-8573.
5. Voynash S. A. Malotonnazhnyy gruzovoy avtomobil dlya podsobnykh khozyaystv naseleniya [Light-duty trucks for private farms] // Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova. 2014. № 31. P. 126–129. ISSN 1694-5557.
6. Fermerskiy gruzovik s samosvalnym kuzovom apparatnogo tipa [Agricultural truck with ramp-type tipper body] / S. A. Voynash, A. S. Voynash, T. A. Zharikova i dr. // Agrarnaya nauka — selskomu khozyaystvu : sb. statey ; kn. 3. Barnaul : RIO AGAU, 2013. P. 32–34.
7. Voynash S. A., Voynash A. S., Demidov A. S. Povyshenie prokhodimosti i manevrennosti fermerskogo malotonnazhnogo gruzovika [Improving cross-country capability and maneuverability of light farmer truck] // Transport of the Urals. 2014. № 3 (42). P. 86–89. ISSN 1815-9400.
8. Vehicle / A. S. Voynash, S. A. Voynash : utility model patent 103332 RU B60P 1/00 Russian Federation. № 2010148481/11 ; appl. 26.11.10 ; publ. 10.04.11, Bulletin № 10.
9. Cargo handling vehicle / A. S. Voynash, S. A. Voynash : utility model patent 111071 RU B60P 1/00 Russian Federation. № 2011111815/11 ; appl. 29.03.11 ; publ. 10.12.11, Bulletin № 34.
10. Vehicle / S. A. Voynash, A. S. Voynash : pat. 2484987 Russian Federation. № 2012110274/11 ; appl. 16.03.12 ; publ. 20.06.13, Bulletin № 17.
11. Cargo handling vehicle / A. S. Voynash, S. A. Voynash, T. A. Zharikova : pat. 2486076 Russian Federation. № 2012118445/11 ; appl. 03.05.12 ; publ. 27.06.13, Bulletin № 18.
12. Vehicle / S. A. Voynash, A. S. Voynash : pat. 2469883 Russian Federation. № 2011131419/11 ; appl. 28.07.11 ; publ. 20.12.12, Bulletin № 35.
13. Cargo handling vehicle / A. S. Voynash, S. A. Voynash : pat. 2449902 Russian Federation. № 2011101851/11 ; appl. 19.01.11 ; publ. 10.05.12, Bulletin № 13.
14. Cargo handling vehicle / A. S. Voynash, S. A. Voynash, T. A. Zharikova : utility model patent 134859 RU B60P 1/00 Russian Federation. № 2013113807/11 ; appl. 27.03.13 ; publ. 27.11.13, Bulletin № 33.
15. Vehicle / A. S. Voynash, S. A. Voynash : utility model patent 111072 RU B60P 1/00 Russian Federation. № 2011111816/11 ; appl. 29.03.11 ; publ. 10.12.11, Bulletin № 34.
16. Voynash A. S., Voynash S. A. Malotonnazhnoye transportnoye sredstvo [Light-duty vehicle] // Proektirovaniye spetsialnykh mashin dlya

16. Войнаш А. С., Войнаш С. А. Малотоннажное транспортное средство // Проектирование специальных машин для освоения горных территорий : матер. междунар. науч.-практ. конф. / Горский государственный аграрный университет. Владикавказ, 2011. С. 45–47.
17. Войнаш А. С., Войнаш С. А., Жарикова Т. А. Механизация транспортировки картофеля с поля при малых формах хозяйствования // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России : сб. науч. докл. междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. М. : ВИМ, 2013. С. 189–191.
18. Войнаш С. А., Войнаш А. С. Транспортно-технологическая машина для внесения органических удобрений // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 12. С. 12–14. ISSN 0235-8573.
19. Войнаш С. А., Войнаш А. С., Жарикова Т. А. Технологическое использование автотрактора на передачах заднего хода // Леса России и хозяйство в них. 2012. № 1–2 (42–43). С. 26–27. ISSN 2218-7545.
20. Механизация транспортировки рулонного сена / С. А. Войнаш, Т. А. Жарикова, А. С. Войнаш и др. // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы : матер. II Всерос. науч.-техн. конф. / Под ред. А. В. Шашка. Рубцовск : РИИ, 2012. С. 122–126.
21. Новый Алтай — 2012. Каталог проектов : в 7 ч. / Под общ. ред. М. П. Щетинина. Ч. 3. Машиностроение и металлообработка. Барнаул : Литера, 2012. 47 с.
- osvoeniya gornyykh territoriy : mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / Gorskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet. Vladikavkaz, 2011. P. 45–47.
17. Voynash A. S., Voynash S. A., Zharikova T. A. Mekhanizatsiya transportirovki kartofelya s polya pri malykh formakh khozyaystvovaniya [Mechanization of transportation of potato from field at small farms] // Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii : sb. nauch. dokl. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Ch. 2. M. : VIM, 2013. P. 189–191.
18. Voynash S. A., Voynash A. S. Transportno-tekhnologicheskaya mashina dlya vneseniya organicheskikh udobreniy [Transport and utility machine for application of organic fertilizers] // Traktory i selkhoz-mashiny. 2011. № 12. P. 12–14. ISSN 0235-8573.
19. Voynash S. A., Voynash A. S., Zharikova T. A. Tekhnologicheskoe ispolzovanie avtotraktora na peredachakh zadnego khoda [Using tractors on reverse gear during productive processes] // Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh. 2012. № 1–2 (42–43). P. 26–27. ISSN 2218-7545.
20. Mekhanizatsiya transportirovki rulonnogo sena [Mechanization of roll hay transportation] / S. A. Voynash, T. A. Zharikova, A. S. Voynash i dr. // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyanie i perspektivy : mater. II Vseros. nauch.-tekhn. konf. / Pod red. A. V. Shashka. Rubtsovsk : RII, 2012. P. 122–126.
21. Novyy Altay — 2012. Katalog proektov : v 7 ch. [New Altai — 2012. Projects catalogue : 7 parts] / Pod obshch. red. M. P. Shchetinina. Ch. 3. Mashinostroenie i metalloobrabotka. Barnaul : Litera, 2012. 47 p.

УДК 621.333.048

**Михаил Гелиевич Дурандин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Иван Геннадьевич Иванов**, ассистент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ 2ЭС6

**Mikhail Gelievich Durandin**, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Traction, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,  
**Ivan Gennadyevich Ivanov**, Assistant Lecturer, Department of Electric Machinery, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

### Analysis of potential stability of electric traction motors of 2ES6 electric freight locomotive

#### Аннотация

На основе статистики отказов тяговых электродвигателей ЭДП-810У1 выявлен высокий процент круговых огней и перебросов по коллектору. В целях исследования потенциальной устойчивости тягового электродвигателя ЭДП-810У1 разработана компьютерная модель распределения межламельных напряжений по коллектору для рабочих режимов в программной среде FlexPDE. Выявлены наиболее опасные режимы работы тягового электродвигателя ЭДП-810У1. Выполнен анализ причин снижения потенциальной устойчивости тягового электродвигателя ЭДП-810У1 в сравнении с тяговым электродвигателем ТЛ-2К1.

**Ключевые слова:** электровоз 2ЭС6, тяговый электродвигатель ЭДП-810У1, потенциальная устойчивость, межламельные напряжения, перебросы по коллектору, круговой огонь.

#### Summary

Analysis of failure statistics of EDP-810U1 traction motors revealed high percentage of ring fires, including flashover in collector. In order to study potential stability of the traction motor EDP-810U1, a computer model of distribution of bar-to-bar voltage on collector for operating modes has been performed in FlexPDE software environment. The most dangerous operation modes of the traction motor EDP-810U1 have been revealed. The analysis of the reasons for decline in potential stability of the traction motor EDP-810U1 as compared to the traction motor TL-2K1 is performed.

**Keywords:** electric locomotive 2ES6, traction motor EDP-810U1, stability, bar-to-bar voltage, flashover in collector, ring fire.

**Е**жегодно эксплуатационный парк локомотивов Свердловской железной дороги пополняется более чем на 100 единиц электровозами нового поколения 2ЭС6. Улучшенные тяговые свойства локомотива во многом связаны с повышением единичной мощности его тяговых электродвигателей серии ЭДП-810У1 и близких к ним аналогов.

В то же время в общую оценку рабочих качеств локомотива помимо технических характеристик его узлов и систем входят показатели надежности функционирования. Поэтому повышенный процент выхода из строя тяговых электродвигателей в первые годы эксплуатации локомотива хотя и обращал на себя внимание, но нередко объяснялся проявлением прирабочных отказов, неизбежных при внедрении любой новой техники. Однако с увеличением пробега локомотивов становилось все более очевидным, что новый тип тяговых электродвигателей имеет стабильно высокий уровень отказов коллекторного узла.

Так, в 2011 г. среди причин, повлекших выход из строя двигателей ЭДП-810У1 в эксплуатации, более 50% занимали круговые огни и перебросы по коллектору. Это почти в 3 раза больше числа пробоев якорной изоляции — традиционного лидера причин отказов тяговых электродвигателей у локомотивов старых серий. В предшествующей серии тяговых электродвигателей для грузовых электровозов ТЛ-2К1 доля круговых огней и перебросов по коллектору даже в экстремальные периоды не превышала 20–22%.

Общая статистика отказов по узлам тяговых электродвигателей серии ЭДП-810У1 за 2011–2014 гг. представлена на рис. 1.

Из гистограмм рис. 1 видно, что на сегодняшний день количество круговых огней и перебросов по коллектору хотя и снижается, но остается одним из преобладающих видов отказов тяговых электродвигателей новых локомотивов.

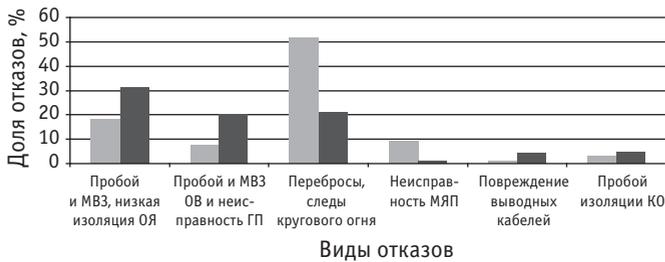


Рис. 1. Статистика отказов ТЭД ЭДП-810У1: ■ — 2011 г.; ■ — 2013–2014 гг.

С учетом продолжающихся отказов коллекторного узла тяговых электродвигателей ЭДП-810У1 становятся актуальными вопросы, связанные с выявлением причин возникновения большого числа круговых огней и перебросов в условиях эксплуатации и разработкой мер по их устранению.

Как известно, дуговые явления на коллекторе машин постоянного тока — это следствие неблагоприятного распределения межламельных напряжений и интенсивного щеточного искрения. Фактор щеточного искрения по механическим и коммутационным причинам вряд ли может быть преобладающим для всего объема эксплуатируемых двигателей, поскольку каждый из них проходил приемо-сдаточные испытания, а в процессе эксплуатации состояние коллектора и щеток регулярно контролируется на периодических осмотрах и ремонтах. Отсюда приходится признать, что наиболее вероятная причина формирования разрядных явлений на коллекторе — потенциальный вид искрения, возникающий при воздействии эксплуатационных нагрузений.

Главный фактор в формировании уровня межламельных напряжений — ЭДС вращения якорных секций в поле главных полюсов, поэтому для исследования характера распределения основного магнитного потока в тяговых электродвигателях ЭДП-810У1 была использована программная среда FlexPDE (также можно использовать и другие среды моделирования [1]).

Выбор среды FlexPDE в качестве средства моделирования электромагнитных процессов обусловлен ее функциональными возможностями, адаптированными к задачам исследовательского характера:

среда позволяет осуществлять поточечный расчет неоднородных магнитных и электрических полей методом конечных элементов и находить решение систем дифференциальных уравнений в частных производных с заданной точностью; возможно представление полученных решений и в числовой, и в графической форме;

граничные и другие условия могут задаваться в числовом виде, а также аппроксимироваться аналитическими выражениями;

среда применима для исследования нестационарных электромагнитных процессов;

среда поддерживает задание любого количества расчетных геометрических областей с возможностью учета нелинейности и анизотропности физических свойств расчетных сред;

интерфейс программной среды достаточно прост в использовании и не требует длительного изучения.

В основе расчета пространственного распределения основного магнитного потока в магнитопроводе двигателя ЭДП-810У1 использовалось фундаментальное уравнение Максвелла в форме

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j_z, \quad (1)$$

где  $H_y$  и  $H_x$  — проекции вектора напряженности магнитного поля на осях  $y$  и  $x$  соответственно;

$j_z$  — проекция вектора плотности тока на ось  $z$ .

Пример расчетной модели двигателя ЭДП-810У1 и результаты расчета распределения магнитного поля в графической форме приведены на рис. 2.

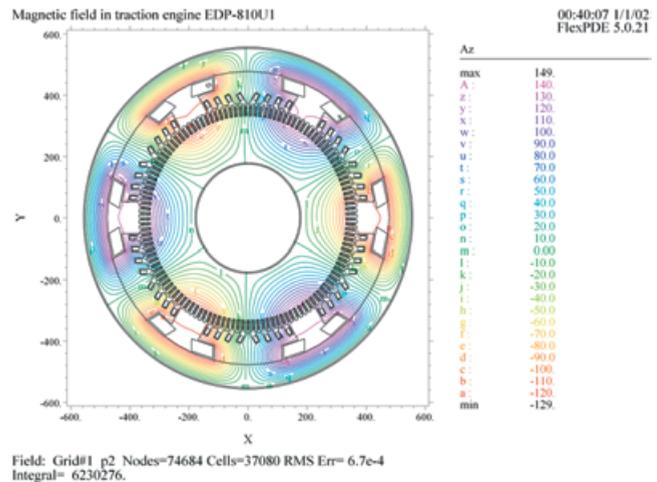


Рис. 2. Результат расчета распределения магнитного поля тягового электродвигателя ЭДП-810У1 в режиме длительной мощности

На представленной модели ЭДП-810У1 показаны траектории прохождения эквипотенциальных линий  $z$ -проекции вектора магнитного потенциала  $A_z$ . Цветовыми градиентами эквипотенциальных линий демонстрируются количественные уровни их магнитных потенциалов.

Поскольку среда FlexPDE позволяет находить распределение магнитной индукции по заданной траектории, то в соответствии с поставленной задачей определения значений межламельных напряжений рассчитывалась кривая распределения модуля вектора магнитной индукции в воздушном зазоре машины в пределах полюсного деления. Значения магнитной индукции пересчитывались на величины межламельных напряжений согласно выражению [2]

$$\Delta U_{\kappa} = 2B_{\delta} l_a v_a w_c + i_a 2r_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где  $l_a$  — длина якоря, м;

$v_a$  — окружная скорость якоря, м/с;

$w_c$  — число витков секции,  $w_c = 1$ .

Значения плотности тока в якорной, компенсационной и обмотках возбуждения в базовом выражении (1) задавались

в соответствии с расчетным токовым режимом и геометрическими размерами проводников.

Из описания следует, что расчетная модель тягового электродвигателя ЭДП-810У1 характеризуется следующими допущениями:

расчет производился в рамках двумерной модели для поперечного разреза исследуемого типа двигателя исходя из однородного характера распределения магнитного поля под главными полюсами в аксиальном направлении;

исследованию подлежали стационарные режимы работы тягового двигателя, поскольку ставилась задача выявить стабильно действующие факторы, провоцирующие образование дуговых явлений на коллекторе;

магнитные свойства изоляционных материалов и меди приравнивались к магнитным свойствам воздушной среды в силу незначительности их отличий;

нелинейность магнитной проницаемости стальных участков аппроксимировалась по форме магнитных характеристик тех марок сталей, которые использованы в конструкции исследуемого типа двигателя.

Принятые допущения не сказываются на достоверности разработанной модели, что подтверждается хорошей сходимостью расчетной кривой магнитной индукции в номинальном режиме работы двигателя ЭДП-810У1 и ее экспериментально полученным распределением [3].

По плану исследований в первую очередь изучению подлежали номинальные режимы работы двигателя ЭДП-810У1. Поскольку на уровень межламельных напряжений в сильной степени оказывает влияние величина питающего напряжения, то каждый режим рассчитывался для номинального напряжения в контактной сети 3000 В, а также для предельно возможного по техническим условиям эксплуатации локомотивов напряжения на токоприемнике 4000 В в режимах рекуперации. В пересчете на один двигатель при параллельной схеме их соединения это соответствует напряжениям питания 1500 и 2000 В.

На рис. 3 и 4 представлены расчетные кривые распределения межламельных напряжений тягового электродвигателя ЭДП-810У1 для режимов длительной ( $I_a = 540$  А) и часовой ( $I_a = 580$  А) мощности.

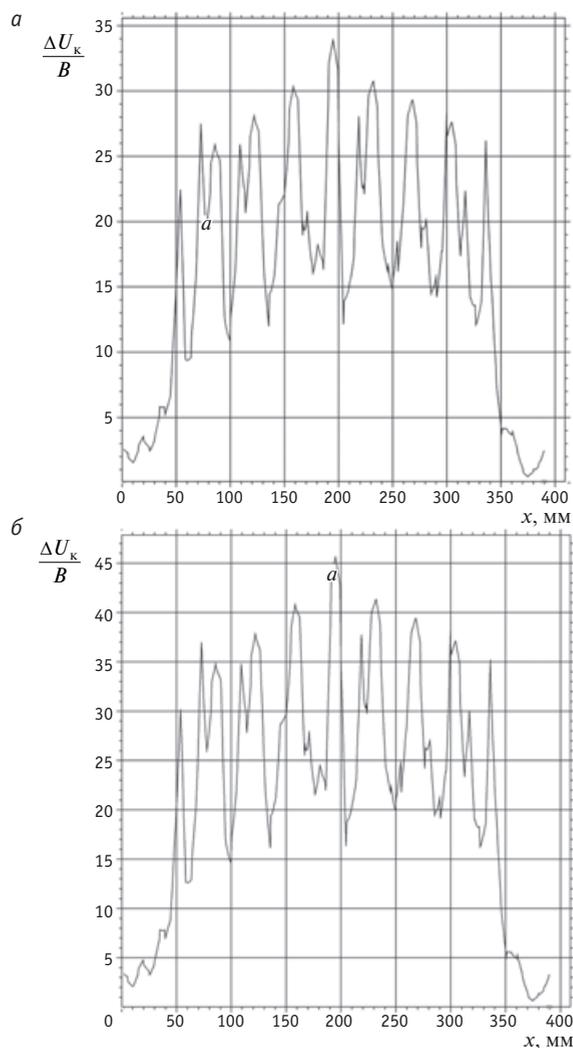
Нестабильный характер расчетных кривых обусловлен зубчатым строением якоря и наконечника главных полюсов. В области зубцов плотность силовых магнитных линий возрастает, что отражается в росте магнитной индукции и соответственно значений межламельных напряжений.

Несимметричность распределений относительно осевой линии главных полюсов связана с разбалансом магнитодвижущих сил (МДС) якорной и компенсационной обмоток. Нехарактерное для двигательного режима работы повышение межламельных напряжений со сбегающего края полюса объясняется 10%-й перекомпенсацией этого типа двигателя, т. е. превышением МДС компенсационной обмотки над МДС поперечной реакции якоря ( $v_{ко} = 1,1$ ).

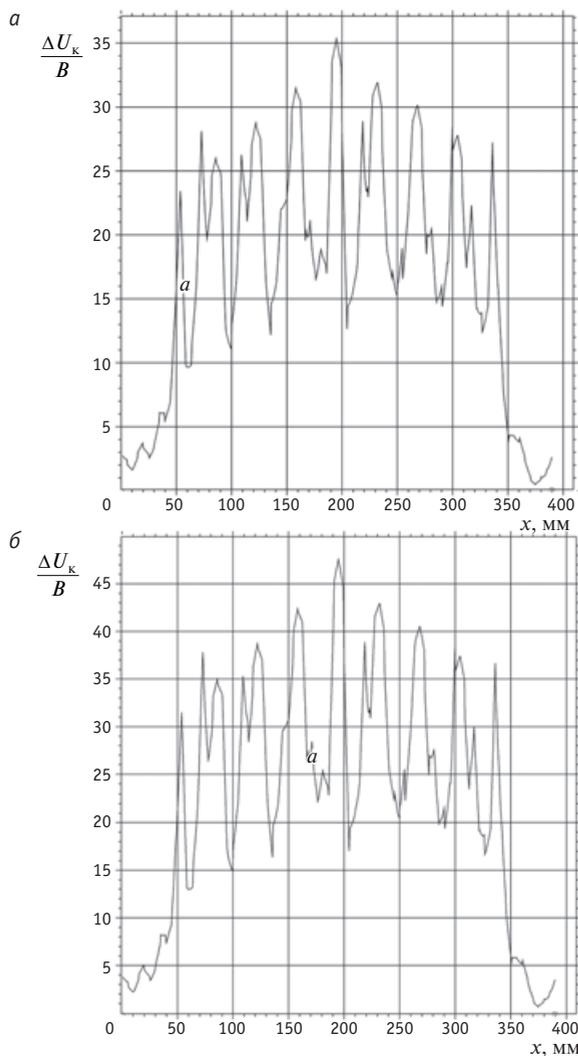
В связи с поставленной задачей исследования наибольший интерес в полученных распределениях вызывают точки экстремумов межламельных напряжений: при номинальном напряжении питания (1500 В) максимальные межламельные напря-

жения в режимах длительной и часовой мощности составили 34 и 35,5 В, при повышенном напряжении питания (2000 В) — 45,5 и 47,5 В соответственно.

Полученные данные в режиме номинальных токовых нагрузок не могут быть квалифицированы однозначным образом. Прежде всего это связано с разбросом мнений относительно безопасного уровня максимальных межламельных напряжений. Так, А. С. Курбасов [4] считает необходимым в тяговых электродвигателях ограничивать межламельные напряжения в пределах 33–34 В. По другим более оптимистичным суждениям [5] максимальные межламельные напряжения в зависимости от толщины межламельной изоляции необходимо ограничивать на уровне 38–43 В. Если исходить из наибольших значений этих рекомендаций, то с учетом толщины миканитовых прокладок  $\Delta_{из} = 1,1$  мм в конструкции коллектора двигателей ЭДП-810У1 верхний безопасный предел межламельных напряжений может быть конкретизирован на уровне 41–42 В.



**Рис. 3. Распределение межламельных напряжений тягового двигателя ЭДП-810У1 в режиме длительной мощности:**  
 а — при питающем напряжении 1500 В;  
 б — при питающем напряжении 2000 В

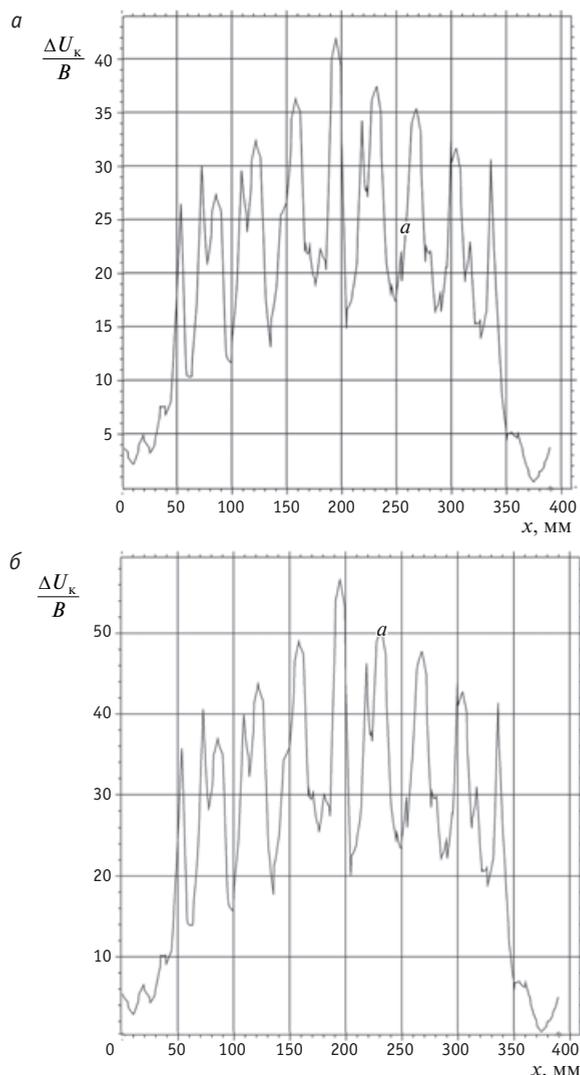


**Рис. 4. Распределение межламельных напряжений тягового двигателя ЭДП-810У1 в режиме часовой мощности:**  
*а* — при питающем напряжении 1500 В;  
*б* — при питающем напряжении 2000 В

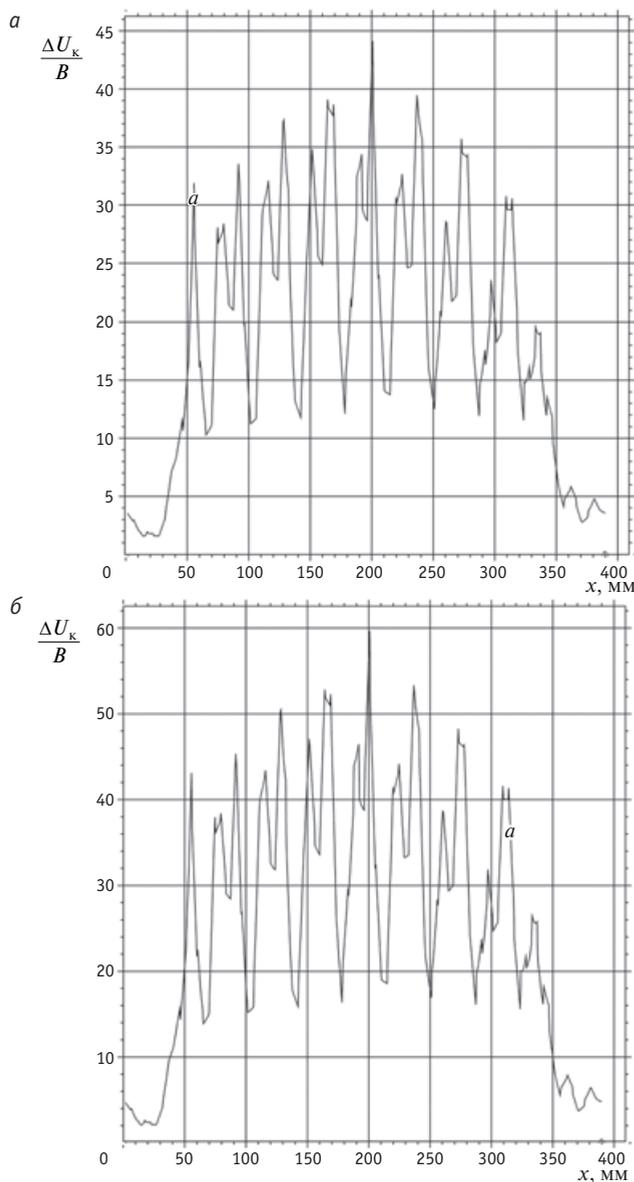
Отсюда следует, что в изучаемом типе двигателя ограничения по максимальным межламельным напряжениям выполняются в лучшем случае только при номинальном питающем напряжении 1500 В или близких к нему уровнях. Простая интерполяция показывает, что начиная с напряжений в контактной сети 3500 В потенциальная устойчивость тяговых двигателей электровозов 2ЭС6 не гарантируется по уровню максимальных межламельных напряжений даже при номинальных токовых нагрузках.

С учетом этих выводов показателен результат анализа записей автоматических регистраторов параметров движения (РПДА), которыми оснащаются современные локомотивы. Как следует из выборочных записей приборов РПДА с различных направлений оборота локомотивов 2ЭС6, фактические уровни напряжения контактной сети в среднем варьируются в диапазоне 3300–3600 В.

Необходимо также учитывать и другие факторы, влияющие на потенциальную загруженность коллектора. Согласно техническим условиям на эксплуатацию локомотивов 2ЭС6 максимальный ток якоря тяговых электродвигателей при трогании с места может достигать до 900 А при максимальном токе возбуждения порядка 800 А. Следует ожидать, что в режимах с максимальными токовыми нагрузками межламельные напряжения также увеличиваются, поскольку магнитная индукция во всех частях машины возрастает. С этой целью были рассчитаны распределения межламельных напряжений в предельных режимах токовых нагрузок для двигательного и генераторного режимов работы тяговых электродвигателей ЭДП-810У1. Результаты расчетов представлены на рис. 5 и 6.



**Рис. 5. Распределение межламельных напряжений в двигательном режиме с предельными токовыми нагрузками:**  
*а* — при питающем напряжении 1500 В;  
*б* — при питающем напряжении 2000 В



**Рис. 6. Распределение межламельных напряжений в генераторном режиме с предельными токовыми нагрузками:**  
 а — при питающем напряжении 1500 В;  
 б — при питающем напряжении 2000 В

Согласно представленным диаграммам предельные значения межламельных напряжений составили:

в двигательном режиме — 42 В (при напряжении питания 1500 В) и 56 В (при питающем напряжении 2000 В);

в генераторном режиме — 44 В (при напряжении питания 1500 В) и 60 В (при питающем напряжении 2000 В).

Расчетные данные не противоречат известному положению о том, что с ростом МДС поперечной реакции якоря потенциальная напряженность даже компенсированных машин возрастает. Значения максимальных межламельных напряжений, полученные в предельных режимах токового нагружения двигателей серии ЭДП-810У1, свидетельствуют об отсутствии

потенциальной устойчивости машины даже при номинальных уровнях питающего напряжения. В режимах повышенных напряжений питания значения межламельных напряжений приближаются к 60 В, при которых, согласно [2], практически любая искра на коллекторе может сформировать круговой огонь.

Отсюда можно сделать вывод: для исследуемого типа двигателя реализация максимальных токовых нагрузок (в пределах допустимых значений) в сочетании с повышенным уровнем питающего напряжения с большой долей вероятности ведет к образованию и развитию дуговых явлений по причине чрезмерно высоких значений межламельных напряжений.

Согласно расчетному выражению (2), рост межламельных напряжений можно ожидать не только при повышенных значениях магнитной индукции, но и при высокой частоте вращения якоря, характерной, как правило, для режимов предельного ослабления возбуждения. Исходя из электромеханических характеристик тяговых электродвигателей ЭДП-810У1 [6] максимальные обороты якоря (1800 об/мин) достигаются при токе якоря 475 А с током возбуждения 144 А (коэффициент регулирования возбуждения  $\beta_{\text{ов}} = 0,3$ ).

Результаты расчета кривой распределения межламельного напряжения в указанном режиме приведены на рис. 7.

Из представленных диаграмм видно, что в режимах глубокого ослабления возбуждения возрастают амплитуды зубцовых колебаний межламельных напряжений из-за снижения магнитного насыщения зубцов якоря и компенсационной обмотки.

Кроме того, наблюдается увеличение наклона кривых межламельных напряжений под набегающим и сбегающим краями полюса, связанное с усилением проявления несбалансированности МДС компенсационной обмотки и поперечной реакции якоря в условиях минимальных значений основного магнитного потока.

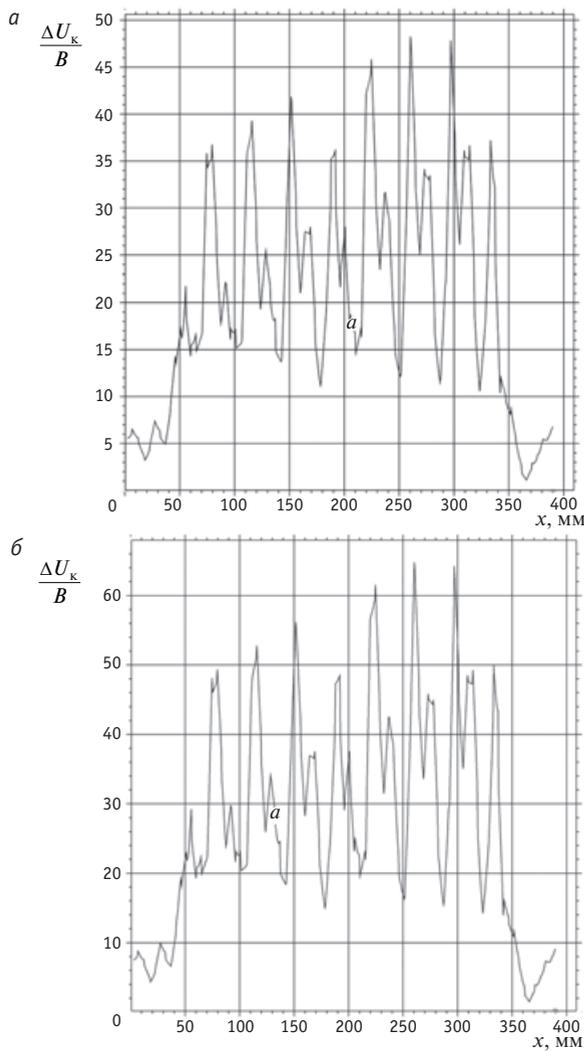
Максимальные значения межламельных напряжений в представленных распределениях составили 48 и 65 В при напряжении питания 1500 и 2000 В соответственно.

Таким образом, режимы глубокого ослабления возбуждения влияют на рост максимальных межламельных напряжений даже в большей степени, чем токовые нагрузки.

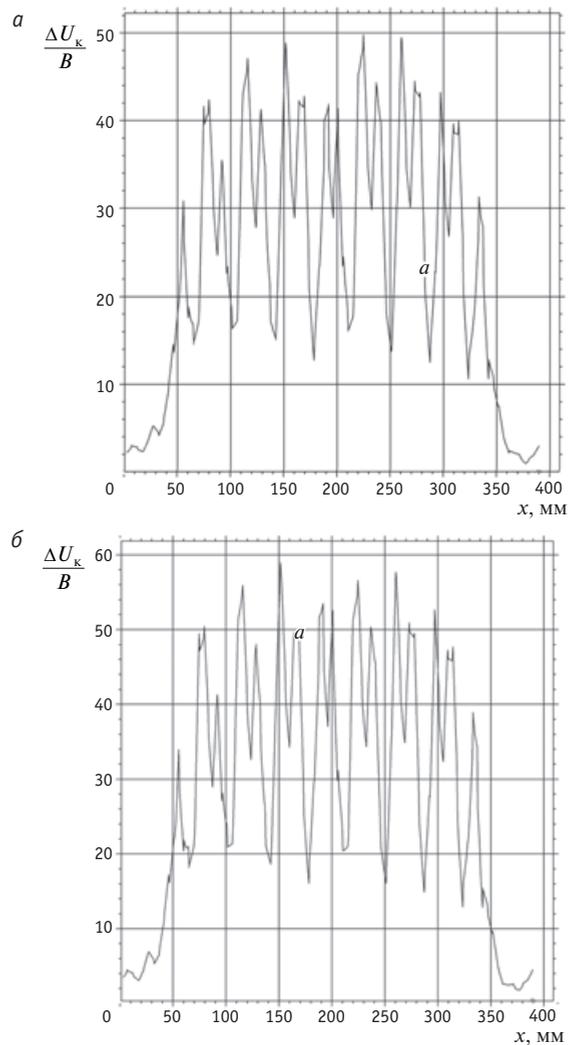
Работу двигателя с максимальной частотой вращения якоря можно было бы рассматривать в качестве примера и для режима боксования. Однако реальный процесс боксования представляет значительно большую опасность в образовании потенциального вида искрения на коллекторе, нежели режим предельного ослабления возбуждения. Это связано с тем, что по мере набора частоты вращения боксующей колесной парой на связанном с ней тяговом двигателе одновременно наблюдается рост питающего напряжения в пропорции

$$\frac{n_{a1}}{n_{a2}} = \frac{E_{a1}}{E_{a2}} \approx \frac{U_{d1}}{U_{d2}}. \quad (3)$$

Таким образом, при двукратном превышении частоты вращения боксующей колесной пары и параллельном соединении тяговых электродвигателей напряжение на «боксующем» двигателе поднимается до 2 кВ при номинальном уровне напряжения в контактной сети и до 2,67 кВ — при повышенном.



**Рис. 7. Распределение межламельных напряжений в режиме минимального возбуждения ( $\beta_{ов} = 0,3$ ):**  
 а — при питающем напряжении 1500 В;  
 б — при питающем напряжении 2000 В



**Рис. 8. Межламельные напряжения в режиме боксования (кратность 2):**  
 а — при питающем напряжении 2000 В;  
 б — при питающем напряжении 2670 В

На рис. 8 показаны диаграммы распределения межламельных напряжений для случая двукратного превышения частоты вращения боксующей колесной пары при номинальном (3 кВ) и максимальном (4 кВ) уровнях напряжения в контактной сети (ток якоря 250 и 410 А соответственно).

Данные рис. 8 свидетельствуют, что в режиме боксования (коэффициент кратности 2) максимальные межламельные напряжения достигают значений 50 В при номинальном (3 кВ) и 59 В — при повышенном (4 кВ) напряжениях в контактной сети. Это значительно превышает порог безопасной работы коллектора (41–42 В).

Согласно результатам исследования потенциальных условий на коллекторе тягового электродвигателя ЭДП-810У1, следует констатировать, что надежная работа его коллекторного узла гарантируется только при условии непревышения номинальных уровней питающего напряжения и токового нагружения, установленных для данного типа двигателей.

Обобщенная диаграмма расчетных уровней максимальных межламельных напряжений при воздействии исследованных факторов нагружения двигателей ЭДП-810У1 представлена на рис. 9.



**Рис. 9. Максимальные значения межламельных напряжений в различных режимах работы ТЭД**  
 ■ —  $U = 1,5$  кВ; ■ —  $U = 2$  кВ

Помимо выявленных закономерностей в реализации максимальных уровней межламельных напряжений следует также указать на ряд второстепенных факторов, способствующих формированию дуговых разрядов по коллектору в двигателях серии ЭДП-810У1.

В первую очередь к ним относится заниженный в двигателях ЭДП-810У1 относительно норм проектирования ( $t_k \geq 4$  мм) шаг по коллектору  $t_k = 3,83$  мм, что в сильной степени сказывается на градиенте коллекторных напряжений. По наиболее оптимистичным рекомендациям [5] для устойчивой работы коллекторных двигателей градиент не должен выходить за пределы  $\epsilon_k \leq 85-95$  В/см. При шаге  $t_k = 3,83$  мм в двигателе ЭДП-810У1 на границе безопасного уровня межламельных напряжений 42 В это соответствует градиенту коллекторного напряжения  $\epsilon_k = 110$  В/см.

Известно, что главной причиной искажения и, как следствие, образования экстремумов на кривой межламельных напряжений является МДС поперечной реакции якоря, достигающая максимального проявления на краях главных полюсов. Поэтому увеличение коэффициента полюсного перекрытия с  $\alpha_\delta = 0,7$  в предшествующей серии двигателей ТЛ-2К1 до  $\alpha_\delta = 0,765$  в тяговых двигателях ЭДП-810У1 усиливает это проявление в равной пропорции.

Повышению межламельных напряжений способствует и то, что в новых двигателях одновременно с ухудшением коэффициента компенсации с  $v_{ко} = 0,98$  ( $\Delta = 2\%$ ) в серии ТЛ-2К1 до  $v_{ко} = 1,1$  ( $\Delta = 10\%$ ) в двигателях ЭДП-810У1 снизилось число пазов компенсационной обмотки с 10 до 8. По совокупности воздействий оба этих фактора увеличивают значения небалансных МДС компенсационной и якорной обмоток, что приводит к повышению амплитудных уровней зубцовых колебаний на кривой межламельных напряжений.

Увеличенная по сравнению с нормами проектирования ( $v_{к\max} \leq 55$  м/с) максимальная окружная скорость коллектора  $v_{к\max} = 59,35$  м/с в серии двигателей ЭДП-810У1 также входит в группу факторов, способствующих снижению времени распространения дуги по коллектору в режимах повышенных скоростей движения и боксования.

Весьма спорным представляется и снижение нормы расхода охлаждающего воздуха в двигателе, мощность которого увеличена на 25 % в сравнении с предшествующим аналогом. Если в тяговых электродвигателях ТЛ-2К1 номинальный расход воздуха установлен на уровне 110 м<sup>3</sup>/мин, то в ЭДП-810У1 он снижен до 75 м<sup>3</sup>/мин. Как известно, условия дугообразования на коллекторе в сильной степени зависят от воздухообмена в коллекторной камере, интенсивность которого влияет на количество содержащихся в воздухе ионизированных частиц.

Наконец, при изучении условий возникновения и развития разрядных явлений нельзя обойти вниманием вопрос об изоляционных промежутках. В табл. 1 представлены результаты сравнительного анализа расстояний изоляционных зазоров в конструкции двигателей ТЛ-2К1 и ЭДП-810У1.

Нетрудно заметить общую тенденцию к снижению расстояний изоляционных промежутков в двигателях новой серии

ЭДП-810У1, что не может служить условием для повышения их эксплуатационной надежности.

Неоспоримо, что взятый по отдельности каждый из вышеперечисленных факторов не может рассматриваться в качестве первопричины неудовлетворительной работы коллекторного узла двигателей ЭДП-810У1. Однако трудно оспаривать и тот факт, что, собранные в одной конструкции и работающие совместно на повышение потенциальной напряженности машины, они облегчают условия формирования дуговых разрядов при возникновении первичного искрения на коллекторе не только потенциального характера, но и любой другой физической природы.

Таблица 1

Сравнительный анализ изоляционных промежутков в конструкции ТЭД серий ТЛ-2К1 и ЭДП-810У1

Изоляционный промежуток	ТЛ-2К1	ЭДП-810У1	Изменение
<i>Продольный разрез тягового электродвигателя</i>			
Щеткодержатель — подшипниковый щит	90 мм	87 мм	-3,5 %
Коллектор — подшипниковый щит	107 мм	97,5 мм	-8,9 %
Коллектор — нажимной конус	77,5 мм	61 мм	-21,3 %
Длина изолятора щеткодержателя	90 мм	85 мм	-5,5 %
<i>Поперечный разрез тягового электродвигателя</i>			
Обмотка ГП — сердечник ДП	42,5 мм	3 мм	-93 %
Обмотка ДП — сердечник ГП	8,75 мм	1,25 мм	-86 %

Обобщая результаты проведенного анализа по выявлению причин низкой потенциальной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-810У1, мы можем констатировать, что большинство факторов риска, способствующих повышенному образованию и развитию дуговых явлений на коллекторе машин данной серии, обусловлено проекторочными и конструкторскими решениями.

Главная причина большого числа круговых огней и перебросов на коллекторе тяговых электродвигателей грузовых электровзвов 2ЭС6 — превышение безопасных уровней межламельных напряжений в режимах повышенного напряжения питания и токовых нагрузок.

Факторами, повышающими вероятность формирования дуговых разрядов из первичного потенциального искрения на поверхности коллектора, являются:

- сниженный относительно норм проектирования шаг по коллектору;
- завышенная относительно норм проектирования максимальная окружная скорость по коллектору;
- ухудшение качественных показателей эффективности работы компенсационной обмотки;
- снижение нормы расхода охлаждающего воздуха;
- снижение расстояний изоляционных промежутков.

## Литература

1. Дурандин М. Г., Кузьминых И. А. Обобщенная методика расчета электрических и тепловых полей в пазовой изоляции тяговых электродвигателей локомотивов // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 102–108. ISSN 1815-9400.
2. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. Тяговые электрические машины : учебник для вузов ж.-д. трансп. М. : Транспорт, 1991. 343 с.
3. Лавринович В. А., Рапопорт О. Л., Цукублин А. Б. Комплексные исследования тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 : матер. IX Междунар. науч.-техн. конф. «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии». Омск, 2013. С. 221–225.
4. Курбасов А. С. Проектирование тяговых электродвигателей : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. М. : Транспорт, 1987. 535 с.
5. Проектирование тяговых электрических машин / Под ред. М. Д. Находкина ; 2-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1976. 624 с.
6. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями : руководство по эксплуатации. Верхняя Пышма : ОАО «УЗЖМ», 2008. 1202 с.

## References

1. Durandin M. G., Kuzminykh I. A. Obobshchennaya metodika rascheta elektricheskikh i teplovykh poley v pazovoy izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelay lokomotivov [Generalized method for calculating the electric and thermal fields in slot insulation of locomotive traction motors] // Transport of the Urals. 2014. № 2 (41). P. 102–108. ISSN 1815-9400.
2. Zakharchenko D. D., Rotanov N. A. Tyagovye elektricheskie mashiny : uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp. [Traction electric machines : a textbook for railway universities]. M. : Transport, 1991. 343 p.
3. Lavrinovich V. A., Rapoport O. L., Tsukublin A. B. Kompleksnyye issledovaniya tyagovykh elektrodvigatelay elektrovoza 2ES6 : mater. IX Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. «Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii kollektornykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii» [Integrated studies of traction motors of 2ES6 electric locomotive : proceedings of IX Intern. scientific and engineering conference «Improvement of operational efficiency of collector electromechanical energy converters»]. Omsk, 2013. P. 221–225.
4. Kurbasov A. S. Proektirovanie tyagovykh elektrodvigatelay : ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transp. [Traction motors design : a textbook for railway universities]. M. : Transport, 1987. 535 p.
5. Proektirovanie tyagovykh elektricheskikh mashin [Design of traction electric machines] / Pod red. M. D. Nakhodkina ; 2-e izd., pererab. i dop. M. : Transport, 1976. 624 p.
6. Elektrovoz gruzovoy postoyannogo toka 2ES6 s kollektornymi tyagovymi elektrodvigatelyami : rukovodstvo po ekspluatatsii [DC electric freight locomotive 2ES6 with collector traction motors : manual]. Verkhnyaya Pyshma : OAO «UZZhM», 2008. 1202 p.

УДК 621.313

**Евгений Борисович Азаров**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Андрей Валентинович Бабкин**, старший преподаватель кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Сергей Алексеевич Румянцев**, доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая и прикладная математика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Андрей Михайлович Шихов**, ассистент кафедры «Мосты и транспортные тоннели» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩИХ МАШИН ПРИ ВЫБЕГЕ

**Evgeny Borisovich Azarov**, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Machinery, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,  
**Andrey Valentinovich Babkin**, Senior Lecturer, Department of Electric Machinery, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,  
**Sergey Alexeyevich Rumyantsev**, DSc in Engineering, Professor, Department of Higher and Applied Mathematics, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,  
**Andrey Mikhailovich Shikhov**, Assistant, Department of Bridges and Tunnels, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

## Experimental study of electromechanical characteristics of vibration transport machines when coasting

### Аннотация

В статье приведены результаты электромеханических измерений, выполненных в ходе натурных экспериментов по исследованию динамики колебательных систем. Исследования проводились на лабораторном вибрационном стенде.

**Ключевые слова:** динамика, вибротранспортирующие машины, самосинхронизация, вибровозбудитель, натурный эксперимент, лабораторный стенд, коэффициент мощности.

### Summary

The paper presents the results of electromechanical measurements made during field experiments to study dynamics of oscillatory systems. The studies were conducted on laboratory vibration table.

**Keywords:** dynamics, vibration transport machines, self-synchronization, exciter, field experiment, laboratory bench, power factor.

**В** статье [1] дано описание экспериментов по исследованию динамики колебательных систем, их результаты и выявленные закономерности.

Эксперимент проводился с использованием экспериментальной модели вибрационного стенда — учебно-лабораторного комплекса «Динамика вибротранспортирующих машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями» ДВМ-014, описание которого дано в статье [2].

В работах [1, 2] исследуются в основном механические параметры колебательной системы, в настоящей статье авторы предлагают рассмотреть вибротранспортирующую машину (ВТМ) как единую электромеханическую систему.

Для работы любой электроустановки важным критерием служит ее энергоэффективность. Для асинхронного электродвигателя таким показателем является так называемый коэффициент мощности  $\cos\varphi$ . Диапазон изменения коэффициента мощности находится в пределах от 0 до 1, при этом значение 0,65–0,8 считается удовлетворительным, менее 0,5 — неудовлетворительным.

Наибольшая мощность асинхронного электродвигателя необходима в момент пуска для подъема вверх находящихся в состоянии покоя в нижнем положении под действием силы тяжести массивных вибровозбудителей (ВВ). После разгона мощность двигателей расходуется на преодоление сил сопротивления вращению, и большая мощность в данном случае

не требуется: двигатели работают в режиме, близком к холостому ходу. При этом коэффициент мощности каждого из двигателей и всей установки в целом значительно хуже удовлетворительного.

В работах С. А. Румянцева и Е. Б. Азарова [3–10] обосновано применение двигателей меньшей мощности, а проведенный эксперимент показал возможность использовать в установившемся режиме одного двигателя вместо двух и даже трех для синхронного вращения независимо вращающихся ВВ.

В эксперименте исследовались три ВВ, приводимых в движение соответствующими асинхронными электродвигателями (ЭД1–ЭД3) и установленных в следующих координатах: ЭД1 3–2; ЭД2 6–7; ЭД3 13–2, где первое значение — положение ВВ по горизонтали, второе — по вертикали (рис. 1).

Эксперимент проводился для конфигурации лабораторного стенда с основной массой (одномассная конфигурация), а также с жестко закрепленной верхней массой.

После выхода на установившийся режим работы отключался один либо два из трех приводных электродвигателей. При этом (если выполнялись определенные условия) продолжалось незатухающее синхронное вращение всех трех независимых ВВ практически с неизменной скоростью.

В ходе экспериментов при помощи специализированного программного обеспечения «ДВМ измерения» получен набор выходных форм в виде осциллограмм, описывающих движение рабочего органа ВТМ, значений электрических параметров электродвигателей, скоростей вращения ВВ. Примеры выходных форм приведены на рис. 2 и 3.

На рис. 4 и 5 представлены результаты экспериментов для случаев, когда синхронное вращение ВВ не прекращалось при отключении одного либо двух из трех приводных электродвигателей.

На основе анализа выходных форм выполнен расчет коэффициента мощности для каждого работающего двигателя по известной формуле [11]

$$P = UI \cos \varphi,$$

где  $P$  — активная мощность фазы;

$U$  — действующее значение напряжения фазы;

$I$  — действующее значение тока фазы.

Значения параметров ВТМ для экспериментов, представленных на рис. 4 и 5, приведены в табл. 1.

На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. В случае отключения одного или двух приводных электродвигателей ВТМ:

при соблюдении определенных условий возможно сохранить устойчивое синхронное вращение всех трех независимо вращающихся ВВ;

скорость вращения всех трех независимо вращающихся ВВ незначительно (в пределах 1%) снижается, рабочий орган машины продолжает совершать колебательные движения, т. е. полезная работа, совершаемая машиной, не изменяется; меняется траектория колебаний рабочего органа (см. рис. 2 и 3);

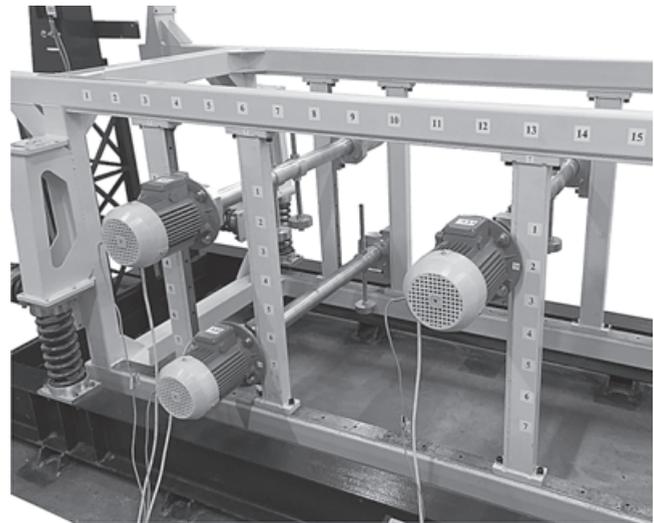


Рис. 1. Размещение вибровозбудителей

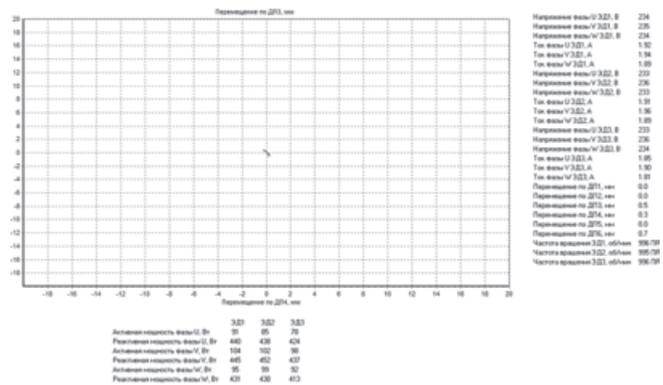


Рис. 2. Выходная форма для случая трех работающих вибровозбудителей, вращающихся в одном направлении (вправо)

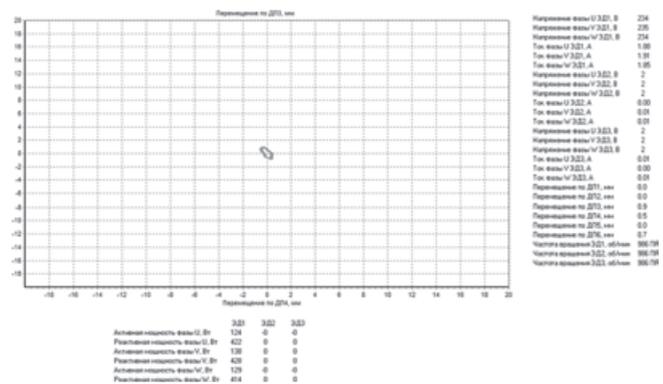


Рис. 3. Выходная форма для случая трех вибровозбудителей, вращающихся в одном направлении (вправо) при отключенных двигателях ЭД2 и ЭД3

2. При отключении двух приводных электродвигателей ВТМ: коэффициент мощности машины увеличивается примерно на 30%;

активная мощность машины в установившемся рабочем режиме уменьшается более чем на 50 %.

Таким образом, экспериментальные результаты исследования самосинхронизации независимо вращающихся вибровозбудителей, установленных на подвижном рабочем органе,

могут быть положены в основу конструктивных и технологических решений, позволяющих существенно улучшить энергетические характеристики вибротранспортирующих машин. Конкретные рекомендации будут сформулированы в ходе дальнейших исследований.

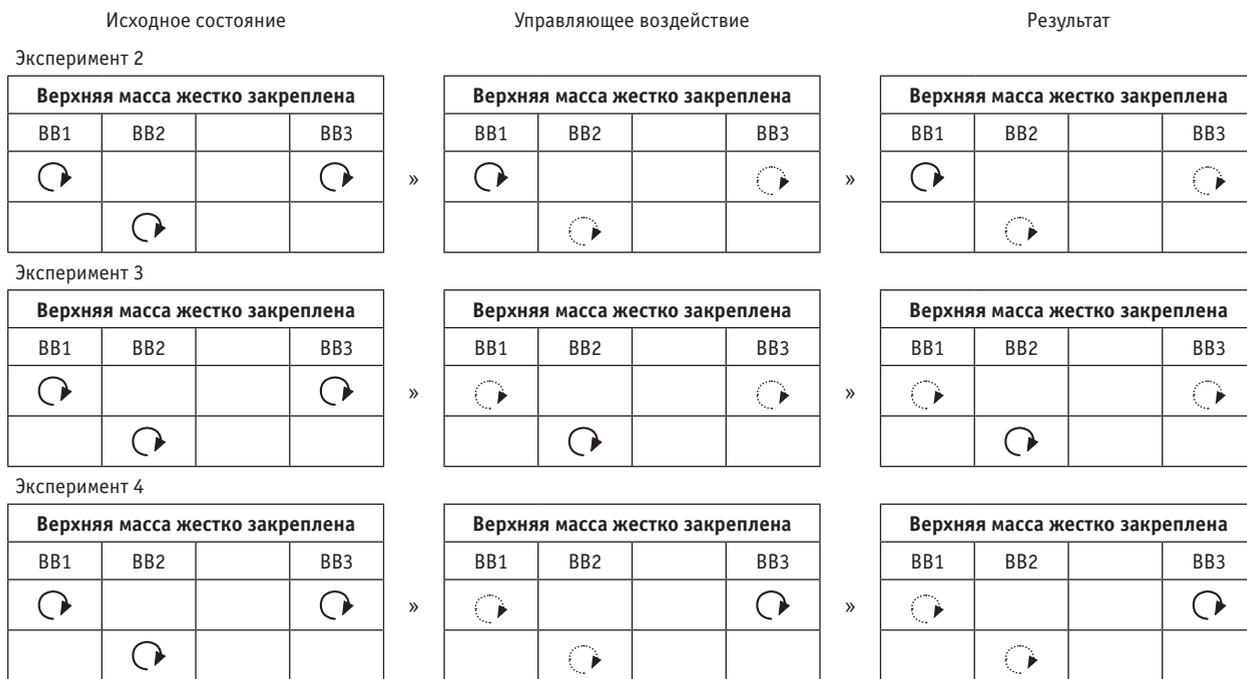


Рис. 4. Результаты эксперимента для рабочего органа с добавленной верхней массой при вращении вибровозбудителей в одном направлении:

↻ — вращение под воздействием приводного двигателя;  
 ↻ — незатухающее синхронное вращение при отключенном двигателе

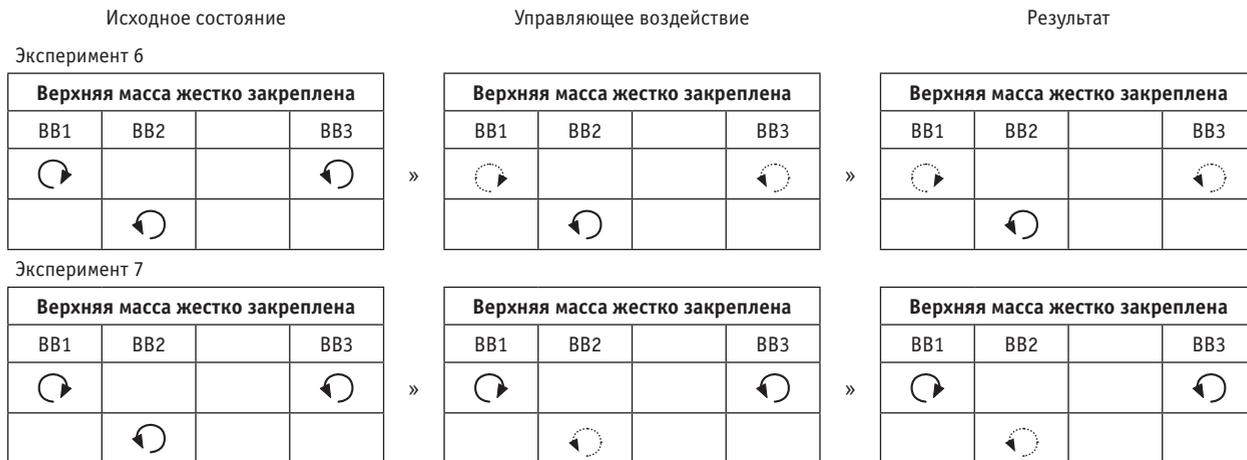


Рис. 5. Результаты эксперимента для рабочего органа с добавленной верхней массой при вращении вибровозбудителей в разных направлениях:

↻ — вращение под воздействием приводного двигателя;  
 ↻ — незатухающее синхронное вращение при отключенном двигателе

Таблица 1

Значения параметров ВТМ

Номер эксперимента	Направление вращения ВВ	Параметры					
		Частота вращения, об/мин	cosφ	Средний cosφ установки	Изменение cosφ	Суммарная активная мощность установки, Вт	Изменение суммарной активной мощности установки
1	ЭД1 ПР	996	0,215	0,209	—	844	—
	ЭД2 ПР	995	0,212				
	ЭД3 ПР	996	0,201				
2	ЭД1 ПР	986	0,296	0,296	+29 %	391	-54 %
	ЭД2 откл.	986	—				
	ЭД3 откл.	986	—				
3	ЭД1 откл.	988	—	0,298	+30 %	389	-54 %
	ЭД2 ПР	987	0,298				
	ЭД3 откл.	986	—				
4	ЭД1 откл.	986	—	0,295	+29 %	375	-56 %
	ЭД2 откл.	988	—				
	ЭД3 ПР	987	0,295				
5	ЭД1 ПР	996	0,214	0,216	—	849	—
	ЭД2 ЛВ	996	0,221				
	ЭД3 ЛВ	995	0,213				
6	ЭД1 откл.	987	—	0,300	28 %	388	-54 %
	ЭД2 ЛВ	986	0,300				
	ЭД3 откл.	987	—				
7	ЭД1 ПР	993	0,237	0,240	10 %	614	-28 %
	ЭД2 откл.	994	—				
	ЭД3 ЛВ	994	0,243				

Литература

1. Экспериментальная проверка устойчивости явления самосинхронизации вибровозбудителей на лабораторном вибростенде / Е. Б. Азаров, А. В. Бабкин, С. А. Румянцев и др. // Транспорт Урала. 2015. № 1 (44). С. 14–18. ISSN 1815-9400.
2. Азаров Е. Б., Румянцев С. А., Шихов А. М. Экспериментальный вибрационный стенд для исследований динамики колебательных систем // Транспорт Урала. 2014. № 4 (43). С. 3–7. ISSN 1815-9400.
3. Румянцев С. А., Азаров Е. Б. Математическая модель нестационарной динамики системы «вибромашина — электропривод» в случае привода от асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Транспорт Урала. 2005. № 1 (4). С. 2–7. ISSN 1815-9400.
4. Румянцев С. А., Азаров Е. Б. Исследование нестационарной динамики вибротранспортирующих машин с помощью математической модели // Транспорт Урала. 2005. № 4 (7). С. 45–50. ISSN 1815-9400.
5. Румянцев С. А., Азаров Е. Б. Математическая модель нестационарной динамики электромеханической системы «вибротранспортирующая машина — электродвигатели» // Изв. вузов. Горный журнал. 2006. № 6. С. 107–109. ISSN 0536-1028.
6. Numerical Simulation of Non-linear Dynamics of Vibration Transport Machines. Recent researches in Engineering and Automatic control / S. Romyantsev, E. Azarov, O. Alekseeva et al. Puerto De La Cruz, Tenerife, Spain, 2011. P. 88–92.

References

1. Eksperimentalnaya proverka ustoychivosti yavleniya samosinkhronizatsii vibrovobuditeley na laboratornom vibrostende [Experimental verification of stability of the phenomenon of vibration exciter self-synchronization on laboratory vibration table] / E. B. Azarov, A. V. Babkin, S. A. Romyantsev i dr. // Transport of the Urals. 2015. № 1 (44). P. 14–18. ISSN 1815-9400.
2. Azarov E. B., Romyantsev S. A., Shikhov A. M. Eksperimentalny vibratsionnyy stend dlya issledovaniy dinamiki kolebatelnykh sistem [Experimental vibration table for studying oscillatory system dynamics] // Transport of the Urals. 2014. № 4 (43). P. 3–7. ISSN 1815-9400.
3. Romyantsev S. A., Azarov E. B. Matematicheskaya model nestatsionarnoy dinamiki sistemy «vibromashina — elektroprivod» v sluchae privoda ot asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom [Mathematical model of transient dynamics of «vibrator — electric drive» system driven by induction motors with squirrel-cage rotor] // Transport of the Urals. 2005. № 1 (4). P. 2–7. ISSN 1815-9400.
4. Romyantsev S. A., Azarov E. B. Issledovanie nestatsionarnoy dinamiki vibrotransportiruyushchikh mashin s pomoshchyu matematicheskoy modeli [Study of transient dynamics of vibration transport machines using a mathematical model] // Transport of the Urals. 2005. № 4 (7). P. 45–50. ISSN 1815-9400.
5. Romyantsev S. A., Azarov E. B. Matematicheskaya model nestatsionarnoy dinamiki elektromekhanicheskoy sistemy «vibrotransportiruyushchaya mashina — elektrodvigateli» [Mathematical model of transient dynamics of electromechanical system «vibration transport machine — electric motor»] // Izv. vuzov. Gornyy zhurnal. 2006. № 6. P. 107–109. ISSN 0536-1028.
6. Numerical Simulation of Non-linear Dynamics of Vibration Transport Machines. Recent researches in Engineering and Automatic control / S. Romyantsev, E. Azarov, O. Alekseeva et al. Puerto De La Cruz, Tenerife, Spain, 2011. P. 88–92.

7. Нелинейная динамика новых перспективных типов вибротранспортирующих машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями / С. А. Румянцев, Е. Б. Азаров, О. Н. Алексеева и др. // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 2. С. 302–304. ISSN 1993-1778.
8. Румянцев С. А., Азаров Е. Б., Алексеева О. Н. Математическая модель электромеханической системы «двухмассная вибротранспортирующая машина — асинхронные электродвигатели» // Транспорт Урала. 2011. № 3 (30). С. 36–39. ISSN 1815-9400.
9. Румянцев С. А., Азаров Е. Б., Богданова О. Н. Исследование на математической модели нестационарной динамики электромеханической системы «двухмассная вибротранспортирующая машина — электрические двигатели» // Вестник УрГУПС. 2012. № 4 (16). С. 13–20. ISSN 2079-0392.
10. Rumyantsev S., Azarov E., Bogdanova O. Numerical Simulation of Non-linear Dynamics of Electromechanical System «Vibrational Transport Machine — Electric Motors» // Recent Advances in Engineering Mechanics, Structures & Urban Planning: Proceedings of the 6 International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG'13); Proceedings of the 6 International Conference on Urban Planning and Transportation (UPT'13); Proceedings of the 1 International Conference on Structural Engineering (STENG'13). Cambridge, UK, 2013. P. 31–34.
11. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины : в 2-х т. Т. 1. М. : Изд-во МЭИ, 2004. 652 с.
7. Nelineynaya dinamika novykh perspektivnykh tipov vibrotransportiruyushchikh mashin s samosinkhroniziruyushchimisya vibrovozbuditelyami [Non-linear dynamics of promising new types of vibration transport machines with self-synchronizing exciters] / S. A. Rumyantsev, E. B. Azarov, O. N. Alekseeva i dr. // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. 2011. № 4. Ch. 2. P. 302–304. ISSN 1993-1778.
8. Rumyantsev S. A., Azarov E. B., Alekseeva O. N. Matematicheskaya model elektromekhanicheskoy sistemy «dvukhmassnaya vibrotransportiruyushchaya mashina — asinkhronnye elektrodvigateli» [Mathematical model of electromechanical system «dual mass vibration transport machine — induction motors»] // Transport of the Urals. 2011. № 3 (30). P. 36–39. ISSN 1815-9400.
9. Rumyantsev S. A., Azarov E. B., Bogdanova O. N. Issledovanie na matematicheskoy modeli nestatsionarnoy dinamiki elektromekhanicheskoy sistemy «dvukhmassnaya vibrotransportiruyushchaya mashina — elektricheskie dvigateli» [Study of transient dynamics of electromechanical system «dual mass vibration transport machine — electric motors» using mathematical model] // Herald of USURT. 2012. № 4 (16). P. 13–20. ISSN 2079-0392.
10. Rumyantsev S., Azarov E., Bogdanova O. Numerical Simulation of Non-linear Dynamics of Electromechanical System «Vibrational Transport Machine — Electric Motors» // Recent Advances in Engineering Mechanics, Structures & Urban Planning : Proceedings of the 6 International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG'13) ; Proceedings of the 6 International Conference on Urban Planning and Transportation (UPT'13) ; Proceedings of the 1 International Conference on Structural Engineering (STENG'13). Cambridge, UK, 2013. P. 31–34.
11. Ivanov-Smolenskiy A. V. Elektricheskie mashiny : v 2-kh t. T. 1 [Electric machines : 2 volumes. Vol. 1]. M. : Izd-vo MEI, 2004. 652 p.

*Исследования поддержаны грантом РФФИ № 14-08-00605.*

УДК 621.335.2

Владимир Андреевич Усов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## ТЯГОВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ЛОКОМОТИВА С РЕЛЬСАМИ

Vladimir Andreyevich Usov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Traction, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

### Traction stability in interaction between locomotive wheelset and rails

**Аннотация**

В статье рассмотрен процесс реализации силы тяги совместно по характеристике сцепления и тяговой характеристике скользящей оси. Показано, что при реализации силы тяги, соответствующей восходящей ветви характеристики сцепления, при наличии не только упругих, но и пластических деформаций в зоне контакта колеса с рельсом тяговая устойчивость сохраняется. На падающей ветви характеристики сцепления, несмотря на избыточное скольжение колесной пары, характер реализации силы тяги может быть устойчивым. Обратной ветви характеристики сцепления не существует. Характеристику сцепления в целом следует рассматривать как состоящую только из двух ветвей — восходящей и падающей.

**Ключевые слова:** «колесо — рельс», сила тяги, характеристика сцепления, структура, анализ, тяговая устойчивость, боксование.

**Summary**

The article describes the process of realization of tractive effort together for friction characteristics and traction characteristics of the moving axis. It is shown that traction stability is preserved in case of realization of tractive effort corresponding to the ascending branch of the friction characteristics in the presence of not only elastic but also plastic deformation in wheel-rail contact area. On the descending branch of the friction characteristics, despite the excessive sliding of wheelset, the nature of realization of tractive effort can be sustained. Reverse branch of the friction characteristics does not exist. Friction characteristics as a whole should be considered as consisting of only two branches — ascending and descending.

**Keywords:** «wheel — rail», tractive effort, friction characteristics, structure, analysis, traction resistance, slippage.

**П**од тяговой устойчивостью понимается способность колесной пары локомотива устойчиво реализовать силу тяги при всяком случайном выходе из установившегося режима [1, 2]. Условием устойчивого режима реализации силы тяги колесной пары является выражение

$$\frac{dF_{к.д}}{dV_{ск}} < \frac{dT}{dV_{ск}}. \tag{1}$$

То есть для устойчивого режима реализации силы тяги необходимо, чтобы темп изменения последней при изменении скорости скольжения колесной пары был меньше темпа изменения силы сцепления.

Следовательно, необходимо рассматривать соотношение двух сил — силы тяги и силы сцепления колесной пары с рельсами. Первая определяется тяговыми характеристиками локомотива, вторая — характеристикой сцепления (рис. 1) [3].

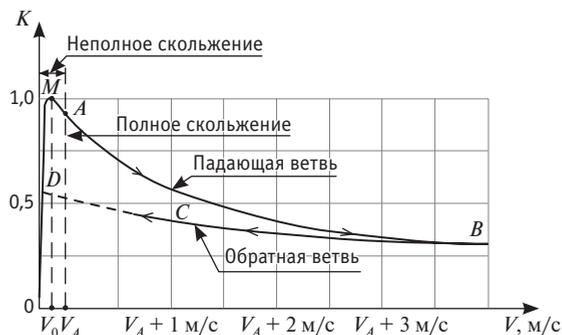


Рис. 1. Характеристика сцепления тяговой колесной пары с рельсами

Математическое соотношение сил на ободе колеса описывается выражением

$$F_{к.д} - T = W_{к.п} + \frac{I_{к} + \mu^2 \cdot I_{я}}{R_{к}} \cdot \frac{d\omega_{ск}}{dt}, \tag{2}$$

где  $F_{к.д}$  — сила тяги тягового двигателя на ободу колесной пары;  
 $T$  — сила сцепления колесной пары с рельсами;  
 $W_{к.п}$  — сила сопротивления вращению колесной пары;  
 $I_{к'} I_{я}$  — соответственно моменты инерции колесной пары и якоря тягового двигателя, а также связанных с ним деталей зубчатой передачи;  
 $\mu$  — передаточное число привода;  
 $R_{к}$  — радиус колеса;  
 $\omega_{ск}$  — угловая скорость скольжения колесной пары.  
 Или несколько проще:

$$F_{к.д} - T = m_э \cdot \frac{dV_{ск}}{dt}, \quad (3)$$

где  $m_э$  — эквивалентная масса вращающихся частей, связанных с колесной парой;

$V_{ск}$  — скорость скольжения колесной пары относительно рельсов.

### АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИИ СИЛЫ ТЯГИ, СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ВОСХОДЯЩЕЙ ВЕТВИ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЦЕПЛЕНИЯ

Рассмотрим процесс реализации силы тяги на ободу колесной пары с точки зрения тяговой устойчивости (рис. 2).

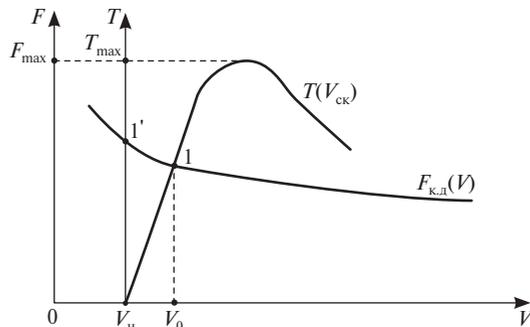


Рис. 2. Тяговая устойчивость на восходящей ветви характеристики сцепления:

$V_{н}$  — скорость движения локомотива;  $V_0$  — окружная скорость вращения колесной пары;  $F_{к.д}(V)$  — тяговая характеристика на ободу колесной пары;  $T(V_{ск})$  — характеристика сцепления колесной пары

В точке 1 (см. рис. 2) абсолютная скорость вращения колесной пары  $V_0$  равна сумме скоростей движения локомотива  $V_{н}$  и скорости скольжения  $V_{ск}$ . Очевидно,  $V_{ск} = V_0 - V_{н}$ . В этой точке сила тяги и сила сцепления равны, имеет место установившийся режим реализации силы тяги. Выполним анализ этого установившегося режима на устойчивость. Согласно выражению (1), для устойчивого режима реализации силы тяги при изменении скорости скольжения был меньше темпа изменения силы сцепления. Очевидно, что это условие соблюдается, и, следовательно, режим реализации силы тяги в точке 1 является не только установившимся, но и устойчивым. Аналогичный анализ можно провести по всей восходящей ветви характеристики сцепления и убедиться, что условие устойчивости для нее соблюдается. Становится оче-

видным, что при реализации силы тяги, соответствующей возрастающей части характеристики сцепления, могут быть не только упругие, но и жесткие проскальзывания колесной пары, обусловленные пластическими деформациями. Колесная пара при этом сохраняет устойчивость и не переходит в режим боксования.

При анализе экспериментальных данных восходящей ветви характеристики сцепления [4] можно установить, что прямолинейная часть, где наблюдается прямая пропорциональность между силой тяги и скоростью проскальзывания, соответствует примерно 0,2 % скорости скольжения и 70 % максимальной силы тяги по сцеплению. Можно предположить, что именно в этом диапазоне скоростей скольжения наблюдаются упругие деформации колеса и рельса. При больших значениях скоростей скольжения возможны и пластические деформации. Тяговая устойчивость сохраняется, а скорость скольжения заметно превышает значения величин упругих деформаций. Становится понятным, почему характеристика сцепления все больше отклоняется от прямолинейной формы.

Таким образом, восходящая ветвь характеристики сцепления — это результат не только упругих, но и пластических деформаций. Форма характеристики сцепления, полученная экспериментальным путем [4], подтверждает представленные рассуждения.

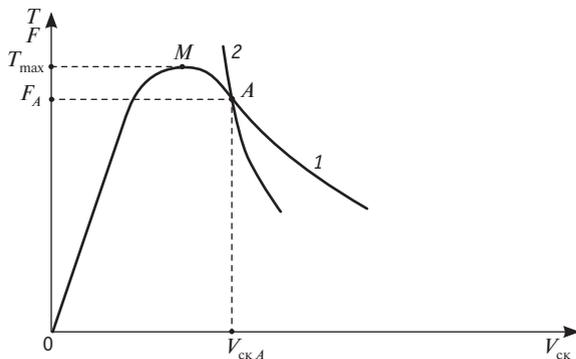
### АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИИ СИЛЫ ТЯГИ, СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ И ПАДАЮЩЕЙ ВЕТВЯМ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЦЕПЛЕНИЯ

Промежуточная ветвь характеристики сцепления  $MA$  (см. рис. 1) соответствует реализации режима тяги, в котором коэффициент сцепления достигает своего наибольшего значения (точка  $M$ ) или незначительно снижается (точка  $A$ ). При скорости скольжения большей  $V_A$  наступает полное скольжение колесной пары, т. е. начинается боксование. На характеристике сцепления эта точка обозначена буквой  $A$ . Анализ тяговой устойчивости, соответствующей промежуточной ветви, показывает, что точка  $A$  не может быть оценкой характеристики сцепления, определяющей область неполного скольжения (см. рис. 1). Момент наступления полного скольжения зависит от формы (жесткости) тяговой характеристики. Там, где жесткость тяговой характеристики становится меньше жесткости характеристики сцепления, т. е. нарушается условие (1), начинается полное скольжение, т. е. боксование. А так как жесткости тяговых характеристик разных типов локомотивов различны, то и положение точки  $A$  для них будет разным.

В работе [2] показано, как жесткость тяговой характеристики двигателя влияет на положение точки  $A$  на характеристике сцепления. Для анализа взят электровоз ВЛ 22М с тяговыми двигателями смешанного возбуждения, жесткость тяговых характеристик которого могла меняться в широких пределах. С ростом жесткости тяговых характеристик точка  $A$  для каждой более жесткой характеристики смещалась вправо по кривой сцепления. Подобная картина наблюдается и на электровозе 2ЭС6, жесткость тяговых характеристик которого также может меняться.

Если жесткость тяговой характеристики локомотива превышает жесткость падающей ветви  $AB$  (см. рис. 1), то условие тяговой устойчивости (1) будет соблюдаться во всем диапазоне скоростей скольжения и колесная пара не будет иметь склонности к увеличению скольжения.

Пусть, например, режим реализации силы тяги соответствует точке  $A$  (рис. 3), находящейся на падающей ветви характеристики сцепления. Условие тяговой устойчивости (1) при этом соблюдается.



**Рис. 3. Тяговая устойчивость на падающей ветви характеристики сцепления:**  
 1 — характеристика сцепления;  
 2 — тяговая характеристика скользящей оси;  
 $T$  — сила сцепления;  $F$  — сила тяги на ободе колеса

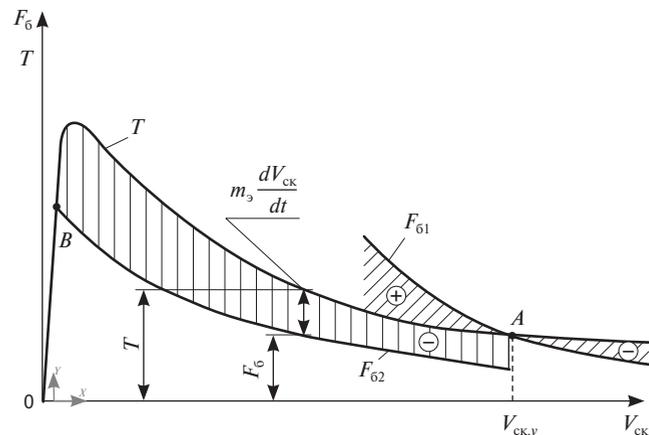
Сила тяги скользящей колесной пары  $F_A$  будет иметь значительную, хотя и несколько меньшую, чем максимальная, величину. Очевидно, что такой режим может быть допущен в эксплуатации в течение ограниченного времени. Подобные характеристики, жесткость которых превышает жесткость характеристики сцепления, присущи локомотивам с тяговыми двигателями смешанного и независимого возбуждения, а также локомотивам с асинхронными тяговыми двигателями (имеются в виду естественные тяговые характеристики).

**ПРОЦЕСС ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С РЕЛЬСАМИ**

В литературных источниках (например, [3, 4]) показана обратная ветвь характеристики сцепления, соответствующая уменьшению скорости скольжения колесной пары, т. е. ликвидации боксования. Эта ветвь (см. рис. 1) не совпадает с падающей. Какого-либо пояснения и физической сути наличия этой обратной ветви в указанных источниках не приводится. Кроме того, такое представление характеристики сцепления при снижении скорости скольжения колесной пары (обратная ветвь) затрудняет анализ и исследование процессов ликвидации боксования. Действительно, в этом случае исчезает из рассмотрения сила тяги скользящей колесной пары. Однако невозможно изучать процесс без одной из действующих сил. В работе [5] показано, что обратной ветви характеристики сцепления вообще не существует, а процесс ликвидации боксования идет по той же падающей ветви характеристики сцепления, по которой идет и процесс развития боксования.

В источниках [1, 2] отмечено, что на восходящей ветви характеристики сцепления, а также на части падающей ветви соблюдается условие устойчивого характера реализации силы тяги. Это явление было названо тяговой устойчивостью.

Для ликвидации боксования необходимо получить неустойчивый режим. На рис. 4 изображена характеристика сцепления  $T$  и тяговые характеристики боксующих осей  $F_{61}$  и  $F_{62}$  в различных случаях процесса боксования.



**Рис. 4. Образование неустойчивого режима боксования колесной пары**

В точке  $A$  процесс боксования носит установившийся и устойчивый характер. Процесс описывается уравнением

$$F_{61} - T = F_y = 0.$$

Для ликвидации боксования необходимо, чтобы ускоряющее усилие  $F_y = m_y \cdot \frac{dV_{ск}}{dt}$  было отрицательным во всем диапазоне избыточного скольжения колесной пары [см. уравнение (3)]. Этого можно добиться либо снижением силы тяги (и тогда зависимость силы тяги от скорости скольжения будет располагаться ниже кривой сцепления во всем диапазоне скорости скольжения), либо повышением силы сцепления (при этом характеристика сцепления пройдет выше тяговой), либо совместным их действием. В любом случае ускоряющее усилие  $F_y$  будет отрицательным во всем диапазоне скорости скольжения, и, следовательно, режим боксования будет неустойчивым, что и приведет к его ликвидации. Последнее подтверждается рис. 4, где изображена характеристика  $F_{62}(V_{ск})$  боксующей оси при уменьшении тока двигателя. Вертикально заштрихованная площадь соответствует отрицательному значению ускоряющего усилия. Переходный процесс, вызванный незначительным снижением скорости скольжения боксующей колесной пары, будет определяться соотношением сил сцепления  $T$  и тяги боксующей оси  $F_{62}$ , приведет к уменьшению скорости скольжения и закончится в точке  $B$  — точке устойчивого и нормального (без боксования) режима реализации тягового усилия.

Таким образом, процесс ликвидации боксования определяется тяговой характеристикой скользящей оси и характеристикой сцепления. Обратной ветви характеристики сцепления быть не может. В точке *B* (см. рис. 4) процесс реализации тягового усилия носит установившийся характер. Если даже по какой-то причине скорость скольжения колесной пары изменится, система «колесо — рельс» вернется в исходный режим нормальной реализации силы тяги. Условие (1) устойчивого режима в точке *B* соблюдается.

На рис. 5 показан другой случай восстановления сцепления боксующей колесной пары. В точке *A* режим реализации силы тяги неустойчивый, так как жесткость характеристики сцепления превышает жесткость тяговой характеристики скользящей колесной пары. Поэтому достаточно даже небольшого снижения скорости скольжения боксующей колесной пары, как начавшийся переходный процесс переместится в точку *B* — точку устойчивого, установившегося и нормального режима реализации силы тяги, точку, при которой соблюдается условие тяговой устойчивости.

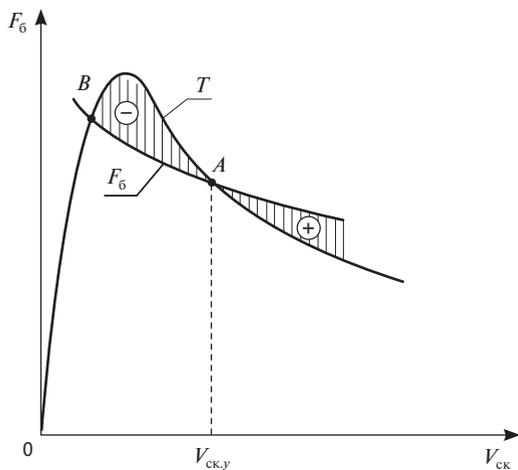


Рис. 5. Пример неустойчивого режима боксования

Таким образом, ликвидация боксования идет не по какой-то вымышленной обратной ветви характеристики сцепления, а определяется взаимодействием сил сцепления (по характеристике сцепления) и тяги (по вполне определенной тяговой характеристике боксующей оси).

Не случайно поэтому в экспериментальных работах Н. Н. Меншутина [4] не приведено ни одной опытной точки обратной ветви характеристики сцепления. Ошибочное суждение о наличии обратной ветви характеристики сцепления объясняется, по-видимому, значением силы сцепления после завершения переходного процесса ликвидации боксования, т. е. в момент восстановления сцепления колесной пары. На рис. 4 и 5 аналогичная точка обозначена как *B*. Эта точка (точки) в экспериментах Н. Н. Меншутина была получена неоднократно и совершенно справедливо свидетельствовала о месте завершения боксования на пересечении характеристики сцепления и тяговой характеристики скользящей оси.

И именно в эту точку в работах [3, 6] была произвольно проведена кривая из той точки на характеристике сцепления, откуда начался процесс ликвидации боксования и которая без экспериментального подтверждения была названа обратной ветвью характеристики сцепления.

Следовательно, обратной ветви характеристики сцепления не существует. Процесс ликвидации боксования идет по той же самой характеристике сцепления, по которой шел процесс развития боксования, и определяется соотношением сил тяги и сцепления.

Отсутствие обратной ветви характеристики сцепления подтверждается экспериментальными исследованиями. На рис. 6 приведена осциллограмма из работы [4] и выполнена дополнительная ее расшифровка [5]. По кривым сил тяги и сцепления  $F_1(t)$ ,  $F_k(t)$  и скорости скольжения  $V_6(t)$  в функции времени, представленным на этом рисунке, рассчитаны соответствующие зависимости в функции скорости скольжения боксующей колесной пары  $F_{11}(V_{ск})$ ,  $F_{12}(V_{ск})$  и  $F_{к1}(V_{ск})$ ,  $F_{к2}(V_{ск})$ . То есть по экспериментальным данным получены тяговые характеристики и характеристики сцепления при развитии и ликвидации боксования. Причем экспериментальные данные переходного процесса ликвидации боксования представлены впервые. При расшифровке сохранены обозначения и размерность величин, принятых в первоисточнике. Расчет сил тяги и сцепления по данным осциллограммы описан в [3]. На рис. 6 точки полученной зависимости силы сцепления при развитии боксования обозначены звездочками, а при ликвидации — большими светлыми кружками.

На рис. 6 хорошо видно, что сила сцепления при развитии боксования практически совпадает с силой сцепления при ее ликвидации. Некоторое расхождение, не превышающее 6,5%, обусловлено неизбежными погрешностями эксперимента и расчета.

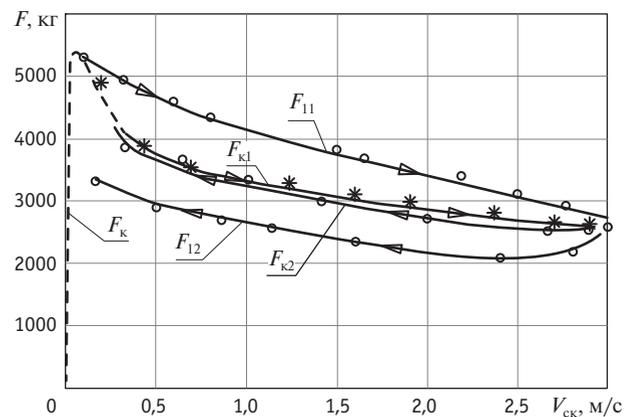


Рис. 6. График изменения силы тяги и силы сцепления скользящей оси при развитии и ликвидации боксования колесной пары электровоза (на основе эксперимента):

- $F_{11}$  — сила тяги при развитии боксования;
- $F_{12}$  — сила тяги при ликвидации боксования;
- $F_{к1}$  — сила сцепления при развитии боксования;
- $F_{к2}$  — сила сцепления при ликвидации боксования;
- $F_к$  — восходящая ветвь характеристики сцепления

Следовательно, при анализе и расчете процессов ликвидации боксования нет необходимости придумывать аналитическое выражение какой-то мнимой обратной ветви характеристики сцепления. Процесс туда и обратно идет по одним и тем же зависимостям. Аналитическое описание этих вполне известных зависимостей позволит правильно изучать явления, сопровождающие ликвидацию боксования, т. е. математически описывать и исследовать процессы не только развития, но и ликвидации боксования. Благодаря этому появляется возможность оценивать эффективность противобоксовочных систем, а значит, и тяговых свойств локомотивов.

Таким образом, путем анализа тяговой устойчивости при реализации силы тяги локомотивов установлено следующее: на восходящей ветви характеристики сцепления существуют не только упругие, но и пластические деформации в зоне контакта колеса с рельсом;

на падающей ветви характеристики сцепления, несмотря на избыточное скольжение колесной пары, может иметь место устойчивый характер реализации силы тяги. Сила тяги скользящей колесной пары при этом сохраняет значительное усилие и может быть допущена некоторое время;

обратной ветви характеристики сцепления быть не может. Процесс восстановления сцепления, т. е. ликвидации боксования, идет по той же падающей ветви, по которой идет процесс развития боксования;

характеристику сцепления в целом следует рассматривать как состоящую из двух ветвей — восходящей и падающей. Точка разделения ветвей — вершина характеристики — должна иметь лишь геометрический смысл. Никаких других ветвей (промежуточной, обратной) быть не должно.

## Литература

1. Усов В. А. Механическая устойчивость системы «колесо — рельс» в режиме избыточного проскальзывания колесной пары локомотива // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2007. № 2 (11). С. 94–101. ISSN 1815-588X.
2. Усов В. А. К вопросу о характеристике сцепления и реализации силы тяги // Улучшение тяговых, тормозных и регулировочных характеристик электрического подвижного состава : сб. науч. трудов УЭМИИТа. Ч. 3. 1970. Вып. 31. С. 19–23.
3. Меншутин Н. Н. Зависимость между силой сцепления и скоростью скольжения колесной пары локомотива // Вестник ВНИИЖТ. 1960. № 7. С. 12–16.
4. Меншутин Н. Н. Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги в эксплуатационных условиях // Труды ВНИИЖТ. 1960. Вып. 188. С. 113–132.
5. Усов В. А., Калинина А. А. О процессе восстановления сцепления колесной пары с рельсами // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 95–98. ISSN 1815-9400.
6. Минов Д. К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. М. : Транспорт, 1965. 267 с.

## References

1. Usov V. A. Mekhanicheskaya ustoychivost sistemy «koleso — rels» v rezhime izbytochnogo proskalzyvaniya kolesnoy pary lokomotiva [Mechanical stability of the system «wheel — rail» at excessive slippage of locomotive wheelset] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya. 2007. № 2 (11). P. 94–101. ISSN 1815-588X.
2. Usov V. A. K voprosu o kharakteristike stsepleniya i realizatsii sily tyagi [The issue of friction characteristics and realization of tractive effort] // Uluchshenie tyagovykh, tormoznykh i regulirovochnykh kharakteristik elektricheskogo podvizhnogo sostava : sb. nauch. trudov UEMIIТа. Ch. 3. 1970. Vol. 31. P. 19–23.
3. Menshutin N. N. Zavisimost mezhdru siloy stsepleniya i skorostyu skolzheniya kolesnoy pary lokomotiva [Relationship between tractive effort and locomotive wheelset slippage rate] // Vestnik VNIIZhT. 1960. № 7. P. 12–16.
4. Menshutin N. N. Issledovanie skolzheniya kolesnoy pary elektrovoza pri realizatsii sily tyagi v ekspluatatsionnykh usloviyakh [Study of locomotive wheelset slippage at realization of tractive effort in operating conditions] // Trudy VNIIZhT. 1960. Vol. 188. P. 113–132.
5. Usov V. A., Kalinina A. A. O protsesse vosstanovleniya stsepleniya kolesnoy pary s relsami [Regarding the process of restoration of wheel-rail adhesion] // Transport of the Urals. 2013. № 3 (38). P. 95–98. ISSN 1815-9400.
6. Minov D. K. Povyshenie tyagovykh svoystv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoy peredachey [Improvement of traction properties of electric locomotives and diesel locomotives with electric transmission]. M. : Transport, 1965. 267 p.

УДК 656.022

Георгий Владимирович Таубкин, ведущий специалист систем общественного транспорта WSP, Торонто (Канада),  
Олег Германович Коптелов, научный сотрудник ЗАО «Фита», Москва

## ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕНИ МАРШРУТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ЗАЕЗДНЫХ КАРМАНОВ

Georgiy Vladimirovich Taubkin, Chief Public Transport Expert, WSP, Toronto (Canada),  
Oleg Germanovich Koptelov, Researcher, Fita CJSC, Moscow

### Route timetable alteration in case of bay creation at bus stop

#### Аннотация

Приведены данные, полученные в результате натурных исследований об изменении затрат времени участников дорожного движения в зависимости от наличия или отсутствия заездного кармана у остановочного пункта автобусного маршрута, а также в зависимости от местонахождения остановки к ближайшим регулируемым перекресткам, расположенным по маршруту движения автобуса. Сделаны выводы, что дооборудование остановочного пункта заездным карманом снижает эксплуатационную скорость автобуса, что в итоге приводит к необходимости увеличения парка подвижного состава для выполнения заданного объема перевозок и к росту их себестоимости.

**Ключевые слова:** остановочный пункт, заездной карман, затраты времени, маршрутное расписание движения, пассажиропоток.

#### Summary

This paper describes comparative analysis of the data obtained from field studies on changing time delay of passengers depending on the presence or absence of bay at bus stop, and depending on the location of bus stop in relation to the closest regulated intersection located along the bus route. Conclusion was made that creation of bay at bus stop reduces the operating speed of the bus, which ultimately leads to the need to increase the rolling stock to perform a given volume of traffic and an increase in their cost.

**Keywords:** bus stop, bus bay, person delay, route timetables, passenger traffic flow.

Пассажирские перевозки с использованием сети городских улиц и дорог общего пользования осуществляются наземным маршрутным, а также внемаршрутным транспортом различного назначения и принадлежности. Эти две системы — маршрутная и внемаршрутная — не только дополняют друг друга, удовлетворяя разнообразный спрос на транспортные услуги, но и создают взаимные помехи, тем самым увеличивая затраты времени участников дорожного движения [1]. Конфликтное взаимодействие транспортных систем наиболее заметно проявляется в местах остановок маршрутного транспорта [2].

Остановочный пункт (ОП) представляет собой неотъемлемую часть автобусного маршрута. Причем количество ОП на маршруте, их частота оказывают существенное влияние на среднюю эксплуатационную скорость автобуса, а нередко и всего попутного транспортного потока. И хотя эта проблема неоднократно рассматривалась и отечественными, и зарубежными учеными [3–6], за пределами исследований остались нерешенными следующие вопросы:

как изменятся общие затраты времени всех участников дорожного движения в случае, если ОП будет оборудован заездным карманом;

каким образом местонахождение ОП по отношению к ближайшему регулируемому перекрестку влияет на затраты времени участников дорожного движения.

Определение значений этих показателей позволит обоснованно составить маршрутное расписание автобусов и повысить эффективность использования подвижного состава.

Цель настоящего исследования заключалась в сравнительном анализе общих затрат времени всех участников дорожного движения в случаях, когда ОП городского автобусного маршрута оборудован заездным карманом и не оборудован им. Кроме того, принималось в расчет местонахождение ОП по отношению к ближайшим регулируемым перекресткам, расположенным на маршруте движения автобуса.

Исходные данные для сравнительного анализа — количество пассажиров, совершающих высадку/посадку в автобус на ОП, плотность транспортного потока на исследуемой части маршрута и средняя скорость транспортного потока —

получены на дорогах общего пользования в пределах городской автобусной маршрутной сети в Оттаве (Канада). В пиковое время на ОП, как оборудованных, так и не оборудованных заездным карманом, осуществлялись видеофиксация и хронометрирование полного цикла остановки автобусов городских маршрутов. Кроме того, были рассмотрены два различных варианта местонахождения ОП (рис. 1):

- непосредственно после регулируемого перекрестка;
- между перекрестками.

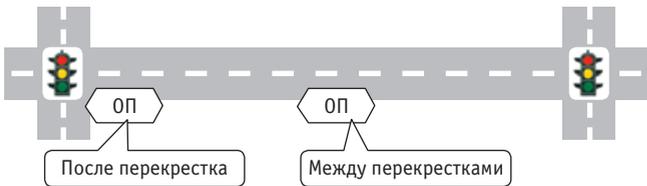


Рис. 1. Примеры расположения остановочных пунктов на автобусном маршруте

Таким образом, сделан анализ для 4 видов автобусных остановочных пунктов (рис. 2).

Тип ОП	Местоположение ОП	
	После перекрестка	Между перекрестками
С заездным карманом	ОП <sub>к-п</sub>	ОП <sub>к-м</sub>
Без заездного кармана	ОП <sub>н-п</sub>	ОП <sub>н-м</sub>

Рис. 2. Совокупность исследуемых остановочных пунктов

Общие затраты времени всех участников дорожного движения приняты состоящими из двух частей, каждая из которых делится на этапы:

1) затраты времени пассажиров, вызванные остановкой автобуса, в том числе:

- время, затраченное на замедление движения автобуса и совершение им маневра до полной остановки;
- время, необходимое для совершения высадки и посадки пассажиров;
- время начала движения автобуса после закрытия дверей;
- время, затраченное автобусом для достижения средней скорости транспортного потока;

2) затраты времени людей, следующих в попутном направлении в иных транспортных средствах (ТС), вызванные остановкой или началом движения автобуса, в том числе:

- время замедления ТС в связи с предполагаемой остановкой автобуса;
- время ожидания начала движения автобуса при невозможности продолжения движения ТС
- или время, необходимое для совершения маневра по обгону автобуса, находящегося на ОП.

Всего проведено 78 единичных наблюдений, на основании полученных результатов выявлены количественные зависимости взаимодействия автобусов и ТС в районе ОП, что позволило:

дать сравнительную оценку времени задержек автобусов и ТС как при наличии заездных карманов, так и без них;

определить количественные зависимости различных этапов задержек от типа/местоположения ОП, плотности попутного транспортного потока и пассажирообмена маршрутного транспорта.

Следует отметить, что в рамках настоящей статьи рассматривается только «автобусная» составляющая задержек. На рис. 3–6 приведены диаграммы распределения времени задержки автобусов поэтапно, в зависимости от типа и местоположения остановки, транспортного потока и пассажирообмена (суммарное количество вышедших из автобуса и вошедших в него пассажиров). Зеленым цветом (см. рис. 3, 4 и 6) отмаркированы ОП с заездным карманом, синим — без него.

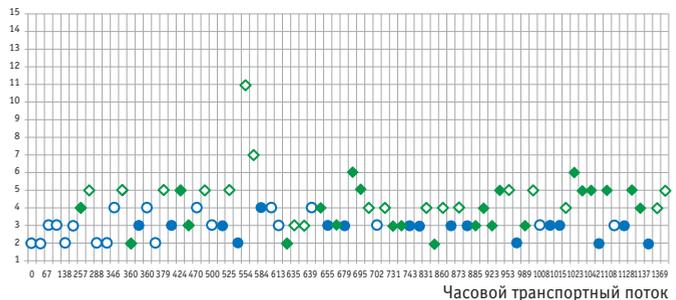


Рис. 3. Замедление автобуса до полной остановки:

● — ОП<sub>н-п</sub>; ◻ — ОП<sub>н-м</sub>; ◆ — ОП<sub>к-п</sub>; ◻ — ОП<sub>к-м</sub>

Из рис. 3 видно, что наличие заездного кармана добавляет в среднем 2 с на замедление движения и совершение автобусом маневра, а межперекресточное расположение ОП дает прибавку еще 1 с. При этом величина задержки почти не зависит от плотности транспортного потока и пассажирообмена. Что касается скорости высадки/посадки пассажиров (см. рис. 4), то на нее не влияют ни наличие заездного кармана, ни плотность транспортного потока.

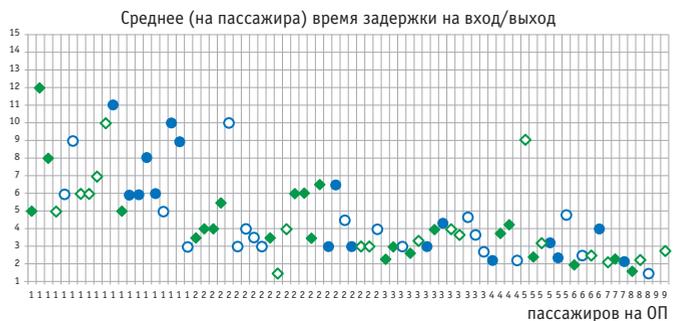


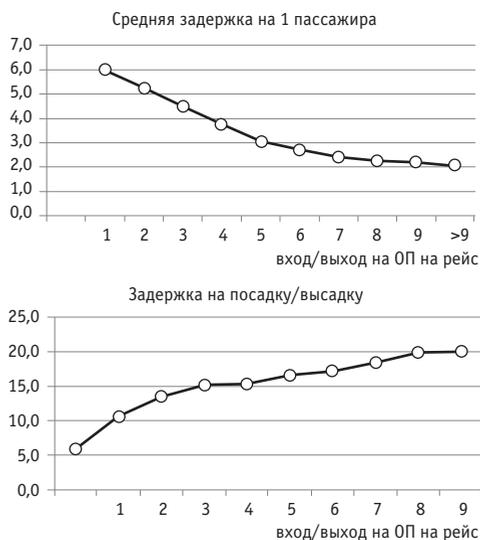
Рис. 4. Задержка автобуса для посадки/высадки пассажиров:

● — ОП<sub>н-п</sub>; ◻ — ОП<sub>н-м</sub>; ◆ — ОП<sub>к-п</sub>; ◻ — ОП<sub>к-м</sub>

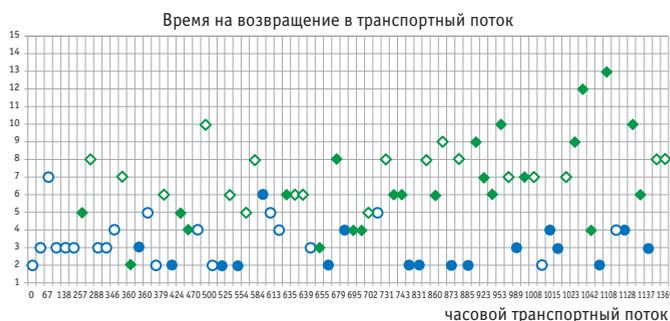
Как и ожидалось, задержка автобуса для посадки/высадки пассажиров зависит от пассажирообмена (см. рис. 5). Однако с увеличением числа пассажиров относительно сокращается время на высадку/посадку каждого из них.

Наиболее значительно наличие заездного кармана влияет на этап затрат времени, необходимого для достижения средней скорости транспортного потока после возобновления движения

(см. рис. 6). На таких ОП его величина в среднем на 4,5 с больше, чем на остановках без заездного кармана. Кроме того, если ОП расположен между перекрестками, дополнительно требуется еще 1 с. Напомним, что эти данные были получены в городе, где действует правило преимущества автобуса при возвращении в транспортный поток и ТС управляют относительно законопослушные водители.



**Рис. 5. Среднее время задержки при посадке/высадке 1 пассажира**

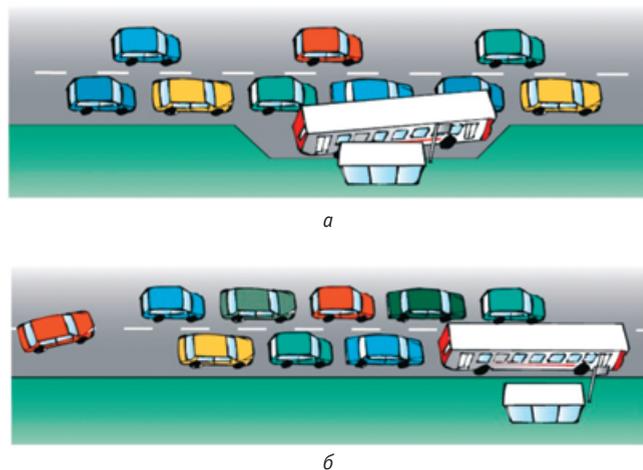


**Рис. 6. Возвращение автобуса в транспортный поток:**  
 ● — ОП<sub>Н-П</sub>; ○ — ОП<sub>Н-М</sub>; ◆ — ОП<sub>К-П</sub>; ◇ — ОП<sub>К-М</sub>

По результатам исследования были проранжированы и задержки личного транспорта — ожидание начала движения автобусов, пропуск автобуса в транспортный поток, маневрирование между полосами движения и т. д. Эти характеристики зависят от типа и местоположения ОП, объема транспортного потока, пассажирообмена. Их количественные оценки находятся за рамками данной публикации, но очевидно, что заездной карман снижает задержки ТС, в первую очередь — личного транспорта.

Для выбора рационального расположения ОП очень важно оценить объемы потоков маршрутного и внемаршрутного

транспорта. Как видно из рис. 7, на котором показаны примеры конфликтного взаимодействия ТС, при отсутствии заездного кармана несколько автомобилей должны остановиться или замедлить движение, а вот задержка автобуса практически не зависит от транспортного потока. Тем не менее даже при наличии заездного кармана некоторые автомобили все равно должны остановиться либо замедлить движение, чтобы пропустить автобус, который возвращается в транспортный поток, однако при этом и автобус задерживается на ОП (как уже было отмечено, в среднем на 4,5 с или более — в зависимости от характеристик транспортного потока).



**Рис. 7. Примеры конфликтного взаимодействия транспортных средств на остановочном пункте:**  
 а — при наличии заездного кармана; б — при его отсутствии

На основе зависимостей, полученных при выполнении этого, а также других исследований авторов настоящей статьи, разработана компьютерная модель, которая позволяет проанализировать, как влияет расположение ОП автобусного маршрута на качество и эффективность перевозок (требуемый подвижной состав, регулярность движения). Кроме того, с ее помощью можно оценить, насколько необходимы создание либо ликвидация заездного кармана на ОП, если это не противоречит условиям безопасности движения. Исходными данными для модели служат маршрутная сеть и частота движения автобусов, пассажиропоток, объем попутных транспортных потоков.

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Дооборудование ОП заездным карманом увеличивает затраты времени пассажиров автобуса пропорционально плотности транспортного потока при любом местонахождении ОП. Соответственно снижается эксплуатационная скорость автобуса, что в итоге приводит к необходимости увеличения парка подвижного состава для выполнения заданного объема перевозок и к росту их себестоимости. И напротив, в этих условиях затраты времени пассажиров немаршрутного транспорта сокращаются, что стимулирует дальнейший рост числа личных автомобилей на городской уличной сети.

## Литература

1. Fernandez R., Tyler N. Effect of Passenger — Bus — Traffic Interactions on Bus Stop Operations // *Transportation Planning and Technology*. 2005. Vol. 28. No. 4. P. 273–292.
2. Xiaobao Y., Mei H., Ziyu G. Car Delay Model near Bus Stops with Mixed Traffic Flow // *Journal of Applied Mathematics*. 2013. Vol. 2013. Article ID 437637.
3. Koshy R., Arasan V. Influence of Bus Stops on Flow Characteristics of Mixed Traffic // *J. Transp. Eng.* 2005. Vol. 131. No. 8. P. 640–643.
4. Kwami A. V., Kuan Y. X., Zhi X. Effect of Bus Bays on Capacity of Curb Lanes // *Journal of American Science*. 2009. Vol. 5. No. 2. P. 107–118.
5. Спирин И. В. Организация и управление пассажирскими автомобильными перевозками : учебник / 5-е изд., перераб. М. : Издательский центр «Академия», 2010. 400 с.
6. Таубкин Г. Анализ транспортной ситуации в городе // *Автомобильный транспорт*. 1989. № 11. С. 9–11. ISSN 0005-2345.

## References

1. Fernandez R., Tyler N. Effect of Passenger – Bus – Traffic Interactions on Bus Stop Operations // *Transportation Planning and Technology*. 2005. Vol. 28. No. 4. P. 273–292.
2. Xiaobao Y., Mei H., Ziyu G. Car Delay Model near Bus Stops with Mixed Traffic Flow // *Journal of Applied Mathematics*. 2013. Vol. 2013. Article ID 437637.
3. Koshy R., Arasan V. Influence of Bus Stops on Flow Characteristics of Mixed Traffic // *J. Transp. Eng.* 2005. Vol. 131. No. 8. P. 640–643.
4. Kwami A. V., Kuan Y. X., Zhi X. Effect of Bus Bays on Capacity of Curb Lanes // *Journal of American Science*. 2009. Vol. 5. No. 2. P. 107–118.
5. Spirin I. V. Organizatsiya i upravlenie passazhirkimi avtomobilnymi perevozkami : uchebnik [Road passenger transport organization and management : a textbook] / 5-e izd., pererab. M. : Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2010. 400 p.
6. Taubkin G. Analiz transportnoy situatsii v gorode [Analysis of urban traffic status] // *Avtomobilnyy transport*. 1989. № 11. P. 9–11. ISSN 0005-2345.

УДК 625.72

Сергей Николаевич Боярский, старший преподаватель кафедры экономики транспорта и логистики Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ), Екатеринбург,  
 Рудольф Николаевич Ковалев, доктор технических наук, заведующий кафедрой экономики транспорта и логистики Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ), Екатеринбург

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Sergey Nikolayevich Boyarskiy, Senior Lecturer, Department of Transport Economics and Logistics, Ural State Forest Engineering University (USFEU), Ekaterinburg,  
 Rudolf Nikolayevich Kovalev, DSc in Engineering, Department of Transport Economics and Logistics, Ural State Forest Engineering University (USFEU), Ekaterinburg

### Traffic flow survey method and results for signalled road junctions in Sverdlovsk Oblast

#### Аннотация

Разработана методика обследования транспортных потоков на регулируемых пересечениях дорог Свердловской области. Проведены камеральные исследования с анализом результатов наблюдений. Установлено распределение временных интервалов между транспортными средствами входящего и исходящего потоков, обоснованы эмпирические функции распределения использования желтого сигнала. Выявлены значения степени риска столкновения транспортных средств на регулируемых пересечениях дорог.

**Ключевые слова:** транспортные потоки, пересечения автомобильных дорог, допустимый водителями риск.

#### Summary

A method for the survey of traffic flows on signaled road junctions in Sverdlovsk Oblast has been developed. Desk studies have been conducted, analyzing survey results. Distribution of time intervals between incoming and outgoing flow has been identified, empirical functions of orange light distribution have been justified. The degrees of risk of collision of vehicles on signaled junctions have been determined.

**Keywords:** traffic flows, road junctions, risk allowed by drivers.

**Д**ля определения параметров имитационной модели движения транспортных потоков [1] на регулируемых пересечениях автомобильных дорог Свердловской области разработана методика, проведены исследования и выполнен анализ полученных результатов. В частности, установлены:

- уровень допустимого водителями риска, характерный для Свердловской области;
- вероятностное распределение временных интервалов между автомобилями, прибывающими в очередь на пересечении;
- вероятностное распределение временного интервала между разрешающим сигналом светофора и выходом первого автомобиля из очереди;

- вероятностное распределение временного интервала между последующими автомобилями в очереди;
- вероятностное распределение временного интервала между автомобилями в устоявшейся очереди;

- однородность транспортного потока для выбранного типового направления при разных характеристиках движения.

Все показатели снимали при загрузке движением больше 0,8.

Обследование проводили на пересечениях пригорода Екатеринбурга, движение транспортных средств фиксировали на видеокамеру с последующей обработкой на компьютере.

Количество необходимых замеров определяли по формуле

$$n = \frac{t^2 \sigma^2}{\Delta^2},$$

где  $t$  — коэффициент значимости, при доверительной вероятности 95 %  $t = 1,96$ , принят  $t = 2$ ;

$\sigma$  — среднее квадратическое отклонение параметра, определяемое по разбросу между максимальным  $C_{\max}$  и минимальным  $C_{\min}$  значениями,

$$\sigma = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6};$$

$\Delta$  — ожидаемая точность результатов измерения.

В ходе исследований выявлено, что  $C_{\max} = 4,5$  м,  $C_{\min} = 1,1$  м, следовательно,

$$\sigma = \frac{4,5 - 1,1}{6} = 0,567.$$

Таким образом,

$$n = \frac{2^2 \cdot 0,567^2}{0,1^2} = 128,6 \text{ (принято } n = 129).$$

Для определения уровня допускаемого водителями риска измеряли расстояние между бамперами следующих друг за другом автомобилей в пробке. Предполагая, что интервалы между транспортными средствами имеют нормальное распределение, В. В. Столяров [2] рекомендует рассчитывать уровень допускаемого водителями риска по формуле

$$r = 0,5 - \Phi\left(\frac{C_i}{\sigma_c \sqrt{2}}\right),$$

где  $r$  — уровень допускаемого водителями риска;

$\Phi(U)$  — интеграл вероятности, определяемый по значению подынтегральной функции  $U$ ;

$C_i$  — фактические интервалы при заторе между однотипными автомобилями, м;

$\sigma_c$  — среднее квадратическое отклонение этих интервалов, м.

В итоге получены значения риска, допускаемого водителями (табл. 1). При расчетах рекомендуется выбирать 85 %-й уровень обеспеченности, и, таким образом, для Свердловской области допускаемый водителями риск  $r = 0,001183$ , средняя величина интервала между автомобилями в заторе составляет 2,9 м (см. табл. 1).

Анализ нормативной литературы [3, 4] и средств организации движения на регулируемых пересечениях позволил выявить типовые направления движения и параметры пересечения для дальнейшего рассмотрения (табл. 2).

Обследование проводили по следующей методике.

Для определения вероятностного распределения временного интервала между автомобилями, прибывающими в очередь, фиксировали момент полной остановки прибывшего автомобиля при неподвижной очереди либо момент установления тесной взаимосвязи между прибывшим автомобилем и предыдущим в очереди при движущейся очереди. Из рассмотрения удаляли интервалы между грузовыми автомобилями, таким образом, полученные результаты приведены к потоку легковых автомобилей. Всего было проведено 13 серий замеров на различных пересечениях.

При подборе случайных распределений временных интервалов прибывающих в очередь транспортных средств использовали критерии Пирсона и Романовского. Для критерия Пирсона принято считать совпадение теоретического и эмпирического распределения отличным при  $p > 0,5$ , хорошим — при  $p = 0,1-0,3$ , удовлетворительным — при  $p = 0,1-0,3$ , неудовлетворительным — при  $p < 0,1$  (0,05).

Критерий Романовского позволяет уточнить в ряде случаев полученный результат:

$$R = \frac{\chi^2 - v}{\sqrt{2v}},$$

Таблица 1

Уровень риска, допускаемый водителями в Свердловской области

Обеспеченность, %	Интервал между автомобилями в заторе в зависимости от обеспеченности, м	Подынтегральная функция $U$	Интегральная функция $\Phi$	Риск, допускаемый водителями, $r$
15	1,63	1,713895	0,456367	0,043633
50	2,3506	2,471584	0,493244	0,006756
85	2,9	3,049261	0,498817	0,001183

Таблица 2

Типовые направления и параметры

Направление	Только направо	Только налево	Только прямо	Прямо и направо	Прямо и налево
Рисунок					
Значения типовых параметров	Наименьший радиус при сопряжении дорог в местах пересечений или примыканий в одном уровне принимается по категории главной дороги независимо от угла пересечения или примыкания: для дорог 1-й и 2-й категории — 25, 3-й категории — 20 м				

где  $\chi^2$  — вычисленное значение;  
 $\nu$  — количество степеней свободы.

Если критерий Романовского меньше 3, то гипотеза о соответствии фактической кривой распределения теоретическому закону принимается. В противном случае делают вывод, что теоретический закон распределения не соответствует натурным данным.

Общеизвестно, что основные случайные распределения для сравнения и выбора наилучшего — это экспоненциальное и логнормальное (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение применимости экспоненциального и логнормального случайного распределения для описания входящего потока

№ серии	Полученные значения $p$ для критерия Пирсона	
	Экспоненциальное распределение	Логнормальное распределение
1	0,00012	0,1168
2	0,02057	0,31162
3	0,00945	0,00281
4	0,05592	0,21177
5	0,000000	0,00095
6	0,12281	0,22110
7	0,42127	0,46688
8	0,03527	0,14186
9	0,08281	0,26418
10	0,00007	0,0308
11	0,0000	0,02349

Из табл. 3 видно, что логнормальное распределение подходит в большем числе случаев и, следовательно, рекомендуется к дальнейшему применению.

При исследовании интервалов выходящего потока установлено, что размер среднего интервала последовательно уменьшается от номера по порядку транспортного средства, покинувшего очередь, и после 5-го транспортного средства колеблется незначительно (рис. 1), что видно по подобранной полиномиальной функции, коэффициент детерминации которой равен 0,8, т. е. зависимость значима.

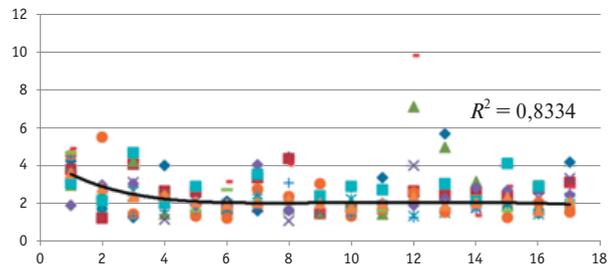


Рис. 1. Средний интервал между транспортными средствами: — полиномиальная функция

Таким образом, уместно подобрать функцию распределения для интервалов с 1–5 по отдельности, а остальные объединить в колонное движение.

Для определения вероятностного распределения между автомобилями, убывающими из очереди, фиксировались время разрешающего сигнала светофора (желтый, зеленый) и моменты прохождения заднего бампера автомобиля условного створа, который располагался на стоп-линии, а в случае отсутствия автомобилей — за стоп-линией либо на переднем бампере первого автомобиля. Использование желтого сигнала в качестве разрешающего позволило установить начало «эффективного» цикла, также получены результаты по использованию второго желтого сигнала и количество движений на красный свет, характерных для высокой загрузки. Вероятностные функции распределения использования второго желтого и красного сигналов автомобилями для различных направлений приведены в табл. 4.

Таблица 4

Использование второго желтого и красного сигналов

Количество автомобилей, покинувших очередь после зеленого сигнала	Интегральная функция распределения для автомобилей, использовавших второй желтый и красный сигналы по направлениям, %					
	Прямо и налево от желтого	Прямо и направо от желтого	Прямо от желтого	Налево от красного	Налево от желтого	Направо от красного
0	54	65	50	84	81	45
1	82	94	86	89	96	75
2	96	100	95	95	100	79
3	100	–	98	100	–	83
4	–	–	98	–	–	91
5	–	–	100	–	–	92
6	–	–	–	–	–	96
7	–	–	–	–	–	96
8	–	–	–	–	–	98
9	–	–	–	–	–	100

Для определения однородности выбранного типового направления замеры проводились, если пересечение отвечало условиям типового, но при различных значениях интенсивности и составе транспортного потока. После этого выполненный дисперсионный анализ позволил определить, существенны или нет различия во временных интервалах между автомобилями, покидающими очередь.

Результат дисперсионного анализа определялся  $p$ -значением. Если его величина меньше требуемого уровня значимости (0,05), то гипотеза о равенстве дисперсий выборок при разных значениях влияющего фактора отвергается, что означает наличие существенных различий между выборками. Итоги обследования сведены в табл. 5. В ней также указано, от какого сигнала светофора измеряли первый временной интер-

вал. Кроме того, если статистики не удовлетворяют требуемым значениям, приведены максимально близкие варианты.

Как видно из табл. 5, в большинстве случаев выбранные распределения подходят по критерию Пирсона. Некоторые позиции, не отвечающие критерию Пирсона, соответствуют критерию Романовского. Для значений, не подходящих ни по критерию Пирсона, ни по критерию Романовского, рекомендуется подбирать эмпирическую функцию распределения.

$P$ -значение дисперсионного анализа показывает, что по всем выбранным направлениям, за исключением одного, различия от влияния всевозможных факторов на параметры незначительны, следовательно, эти параметры применимы для описания движения транспортного потока на всех типовых пересечениях.

Таблица 5

Результаты обследования транспортных потоков на регулируемых пересечениях автомобильных дорог Свердловской области

Направление	Номер интервала	Математическое ожидание длины интервала, с	Дисперсия	Средне-квадратическое отклонение	Минимальное значение, с	Максимальное значение, с	Рекомендуемое распределение	Значение $p$ -критерия Пирсона	Значение критерия Романовского $R$	$P$ -значение дисперсионного анализа
Только налево от желтого	1	3,70	3,69	1,92	0,002	8,35	Нормальное	0,0122	3,733	0,279
	2	3,09	0,97	0,98	1,22	5,74	Логнормальное	0,84	-0,678	0,238
	3	2,71	0,47	0,68	1,57	4,76	Логнормальное	0,118	0,551	0,635
	4	2,74	1,61	1,27	1,12	8,64	-	-	-	0,796
	5	2,83	1,51	1,23	1,28	6,13	-	-	-	0,737
	Колонное движение	3,09	2,563	1,601	0,76	7,51	Логнормальное	0,263	-	0,751
Только направо от зеленого	1	3,87	11,552	3,39	0,08	18,41	Логнормальное	0,32	0,006	0,00000237
	2	3,10	1,534	1,23	0,01	6,70	Логнормальное	0	10,387	0,043
	3	3,49	30,750	5,54	1,51	39,32	Логнормальное	0,105	1,145	0,287
	4	2,98	1,445	1,20	1,52	6,79	Логнормальное	0,789	-0,797	0,000146
	5	2,60	1,751	1,32	0,65	7,83	Логнормальное	0,41	2,131	0,001397
	Колонное движение	2,67	3,717	1,92	1,04	16,38	Логнормальное	0,0038	5,209	0,293
Прямо и налево от желтого	1	3,53	2,388847	1,54	1,11	6,81	Нормальное	0,192	0,494	0,123
	2	2,74	0,667158	0,81	1,32	5,46	Нормальное	0,297	0,21	0,154
	3	2,66	1,343465	1,15	1,35	5,91	Нормальное	-	-	0,342
	4	2,50	0,789254	0,88	1,12	4,98	Нормальное	0,379	-0,159	0,112
	5	2,38	0,790423	0,88	1,41	5,31	Нормальное	0,072	1,576	0,245
	Колонное движение	2,24	0,606178	0,77	0,71	5,44	Логнормальное	0,371	-	0,505
Прямо и направо от зеленого	1	3,12	2,474772	1,57	0,25	8,12	Нормальное	0,13	3,01581	0,205356
	2	2,63	0,477011	0,69	0,59	4,88	Нормальное	0,199	0,115	0,098393
	3	2,52	0,585293	0,76	1,18	5,66	Нормальное	0,396	-0,075	0,055672
	4	2,65	0,993949	0,99	1,39	7,15	Логнормальное	0,51	-0,325	0,285101
	5	2,42	0,301626	0,54	1,40	3,75	Логнормальное	0,783	-0,65407	0,358443
	Колонное движение	2,44	0,598771	0,77	1,15	6,15	Логнормальное	0,06	1,79	0,68647

Окончание табл. 5

Направление	Номер интервала	Математическое ожидание длины интервала, с	Дисперсия	Средне-квадратическое отклонение	Минимальное значение, с	Максимальное значение, с	Рекомендуемое распределение	Значение $\rho$ -критерия Пирсона	Значение критерия Романовского $R$	$R$ -значение дисперсионного анализа
Только прямо от желтого	1	3,64	1,825097	1,35	0,05	6,51	Нормальное	0,97535	-1,13751	0,511937
	2	2,74	1,745826	1,32	1,22	8,78	Логнормальное	0,36104	0,018775	0,215039
	3	2,36	0,871241	0,93	1,28	5,22	Логнормальное	0,00944	3,662315	0,219208
	4	2,48	1,451548	1,20	1,15	8,64	Логнормальное	0,02743	2,508404	0,445755
	5	2,13	0,740875	0,86	0,91	5,02	Логнормальное	0,02384	2,73631	0,34427
	Колонное движение	2,27	1,791993	1,33	0,13	10,56	Логнормальное	0,0058	4,145	0,084622
Только налево от зеленого	1	2,17	—	0,60	1,13	2,61	—	—	—	—
	2	1,69	—	0,63	0,75	2,51	—	—	—	—
	3	3,93	—	1,45	2,4	5,74	—	—	—	—
	4	2,41	—	1,67	0,12	4,65	—	—	—	—
	5	4,61	—	1,6	2,79	6,21	—	—	—	—
	Колонное движение	2,66	—	1,41	0,19	8,64	—	—	—	—

## Литература

- Ковалев Р. Н., Боярский С. Н. Теоретическое обоснование общей модели определения задержки транспорта на пересечениях автомобильных дорог // Транспорт Урала. 2012. № 2 (33). С. 64–69. ISSN 1815-9400.
- Столяров В. В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 1994.
- Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах / утв. распоряжением Минтранса РФ от 24.06.02 № ОС-557-р. М. : Росавтодор, 2011.
- Типовой проект 503-0-51-89. Пересечения и примыкания автомобильных дорог в одном уровне / утв. Минтрансстроем СССР от 19.06.89 № ЛВ-307 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/871100874> (дата обращения: 26.09.2013).

## References

- Kovalev R. N., Boyarskiy S. N. Teoreticheskoe obosnovaniye obshchey modeli opredeleniya zaderzhki transporta na peresecheniyakh avtomobilnykh dorog [Theoretical justification of general model for determining vehicle congestion at road junctions] // Transport of the Urals. 2012. № 2 (33). P. 64–69. ISSN 1815-9400.
- Stolyarov V. V. Proektirovaniye avtomobilnykh dorog s uchetom teorii riska [Road design based on risk theory]. Saratov : Sarat. gos. tekhn. un-t, 1994.
- Rekomendatsii po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya na avtomobilnykh dorogakh / utv. rasporyazheniem Mintransa RF ot 24.06.02 № OS-557-r [Recommendations to ensure safety of road transport / approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of 24.06.02 No. OS-557-p]. M. : Rosavtodor, 2011.
- Tipovoy projekt 503-0-51-89. Peresecheniya i primykaniya avtomobilnykh dorog v odnom urovne / utv. Mintransstroem SSSR ot 19.06.89 № LV-307 [Reference project 503-0-51-89. Road junctions and intersections at the same level / approved by the Ministry of Transport of the USSR of 19.06.89 No. LP-307]. [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/871100874> (date accessed: 26.09.2013).

УДК 577.4:330.15

Наталья Леонидовна Рыполова, аспирант кафедры «Гидравлика, водоснабжение, водные ресурсы, экология» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕХНОЕМКОСТИ ПРИРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА В СВЯЗИ С ТРАНСПОРТНЫМ И ХОЗЯЙСТВЕННЫМ ОСВОЕНИЕМ РЕГИОНА

Natalya Leonidovna Ryapolova, graduate student, Department of Hydraulics, Water Supply, Water Resources, Ecology, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk

### Assessment of environmental capacity of natural systems of Yamal-Nenets Autonomous Okrug in the context of transport and economic development of the region

#### Аннотация

Рассматривается современная транспортная и хозяйственная инфраструктура региона. Показано, что в связи с интенсивным хозяйственным развитием и транспортным обустройством северных территорий Уральского федерального округа необходима геоэкологическая оценка экосистем для обоснования их устойчивости и возможности выдерживать и переносить техногенную нагрузку без нарушения структурных и функциональных свойств. Приведены результаты расчетов и определены величины экологической техноемкости природных комплексов Ямало-Ненецкого автономного округа.

**Ключевые слова:** транспортная инфраструктура, природные и техногенные ландшафты, сырьевая специализация региона, развитие перерабатывающих производств и транспортных коммуникаций, геоэкологическая оценка воздействия хозяйственного развития на окружающую природную среду.

#### Summary

Modern transport and economic infrastructure of the region is considered. It is shown that due the intense economic development and transport development of the northern territories of the Urals Federal District, geoecological assessment of ecosystems is required to support their sustainability and ability to withstand and endure human impact without disruption of their structural and functional properties. The results of analysis are provided and values of environmental capacity of natural systems of Yamal-Nenets Autonomous Okrug are determined.

**Keywords:** transport infrastructure, natural and man-made landscapes, regions focused on raw materials, development of processing industries and transport communications, geoecological assessment of the impact of economic development on the environment.

Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), будучи частью Урало-Сибирского севера России, административно и территориально входит в состав Уральского федерального округа. Но именно ЯНАО принадлежит особая роль в формировании природно-ресурсного потенциала этого округа и национального богатства всей России. От того, насколько хозяйственно развитым и транспортно обустроенным будет регион, во многом зависит сбалансированность экономики не только ЯНАО, но и всей страны.

Современные экономические показатели ЯНАО связаны исключительно с развитием добывающих либо заготовительных отраслей. К их числу относится не только разработка уникальной базы углеводородов, но также оленеводство, лесозаготовительное и рыбопромышленное производства. Валовой региональный продукт (ВРП) составляет 2,12 % от общероссийского показателя. Величина ВРП на душу населения в 5,6 раза превышает среднероссийское значение. Примерно 75 % ВРП создается в товаропроизводящих отраслях, куда входит и добывающий комплекс [1].

В перспективе сырьевая специализация региона сохранится. В настоящее время в ЯНАО открыто более 200 месторождений, из них разрабатывается более 60, в том числе почти два десятка подготовлены к промышленной эксплуатации. Кроме того, планируется развитие специализированных перерабатывающих производств, в частности связанных с выпуском синтетических жидких топлив (поселок Пангоды), переработкой попутного нефтяного газа (поселки Вынгапур и Губкинский), выпуском полиэтилена высокого давления (Новый Уренгой). Соответственно возникает необходимость в научном обосновании геоэкологических параметров воздействия деятельности как существующих, так и перспективных природопользователей округа на окружающую природную среду. Именно в этом состоит реализация национальной стратегии устойчивого развития России и ее регионов как части мирового хозяйства.

111

Январь – Март

Транспорт в ЯНАО представляет собой важную составляющую хозяйства региона. В создании экономической базы округа участвуют железнодорожные, автомобильные и водные судоходные пути. Тем не менее современная транспортная обеспеченность региона характеризуется весьма невысокими показателями. В частности, плотность железных и автомобильных дорог остается на порядок ниже среднероссийских значений: соответственно 0,6 км/1000 км<sup>2</sup> против 5,03 км/1000 км<sup>2</sup> и 5,0 км/1000 км<sup>2</sup> против 56,0 км/1000 км<sup>2</sup>. Протяженность внутренних водных судоходных путей составляет 4,1% от общероссийского показателя [1]. Довольно развитой является транспортная инфраструктура нефте- и газодобычи. По территории округа проложено более двух десятков магистральных нефте- и газопроводов. По этим путям, входящим в единые нефте- и газотранспортные системы, углеводородное сырье доставляется от пунктов промысла до мест потребления. Однако трубопроводный транспорт не относится к видам транспорта общего пользования. Таким образом, можно сделать вывод, что единая региональная транспортная сеть в ЯНАО пока не сложилась. Транспортных узлов, объединяющих пути нескольких видов транспорта, по сути, нет. Поэтому новое транспортное строительство и обустройство существующих транспортных путей отражают экономические потребности округа.

В планах перспективного освоения региона значительное место отводится развитию транспортной инфраструктуры [2]. Это, в частности, строительство новых транспортных путей (железные дороги Полуночное — Обская, Коротчаево — Игарка; мост Салехард — Лабитнанги; железные и автомобильные дороги направлений Обская — Бованенково, Надым — Салехард; автомобильные дороги Бованенково — Харасавэй, граница ЯНАО — Харп, граница ЯНАО — Надым; обустройство выхода в Карский сектор Северного морского пути для регулярного плавания судов), создание сервисных предприятий на трассах магистрального трубопровода (нефтепровод от Ванкорского месторождения до Пурпе, участки газопроводов в системах «Ямал — Европа», на Урал, в Екатеринбург, и в Китай) в рамках логистических схем переработки и транспортировки энергетических и минерально-сырьевых ресурсов, доставки продовольствия. Все эти объекты как на этапе строительства, так и в последующей эксплуатации существенно расширят круг региональных природопользователей и неизбежно приведут к усилению антропогенной нагрузки на окружающую природную среду. Это еще раз доказывает, что оценка геоэкологической устойчивости экосистем ЯНАО является объективной необходимостью.

Геоэкологическая устойчивость экосистем достижима в том случае, когда использование природных ландшафтов не приводит в долгосрочной перспективе к их деградации [3]. Параметром, определяющим геоэкологическую устойчивость, является экологическая техноёмкость территории (ЭТТ). ЭТТ представляет собой характеристику, количественно соответствующую максимальной техногенной нагрузке, которую может выдержать и переносить в течение длительного времени совокупность экологических систем без нарушения их структурных и функциональных свойств [4]. Причем данная харак-

теристика является частью экологической ёмкости приземного слоя воздуха, поверхностных вод суши и фитоценозов. Следует отметить, что в ЯНАО эти компоненты геоэкологической характеристики сформировались вследствие местоположения региона — более половины территории округа лежит за полярным кругом (66,5°с. ш.).

Данные наблюдений, расчеты и анализ показывают, что величина поглощенной солнечной радиации — основной составляющей теплотенергетических ресурсов климата региона — уменьшается с юга на север от 2000 до 1600 МДж/(м<sup>2</sup>·год). При относительно невысоких значениях ресурсов влаги (в среднем около 530 мм/год) это способствует формированию весьма избыточного увлажнения деятельной земной поверхности с низкой (около 4,0 т/га в год) продуктивностью естественных фитоценозов. В совокупности с орографическими особенностями на территории ЯНАО сложилось три типа ландшафтных образований — зональные области западносибирской тундры, лесотундры и северной тайги.

В работах [4, 5] достаточно детально раскрыта методика количественной оценки этих компонентов. Значения удельной экологической техноёмкости приземных слоев атмосферы, поверхностных вод и естественных фитоценозов определены с использованием комплекса гидролого-климатических характеристик земной поверхности.

Как показали расчеты, особенности ветрового режима (средняя годовая скорость ветра составляет от 4,0 до 8,0 м/с) способствуют формированию на большей части региона предельно высоких значений удельной экологической техноёмкости приземных слоев атмосферы, а именно  $t_1 = 1000–1500$  усл. т/(км<sup>2</sup>·год) (табл. 1).

Таблица 1

Удельная экологическая техноёмкость атмосферы ( $t_1$ ),  
поверхностных вод ( $t_2$ ) и фитоценозов ( $t_3$ )

Пункт	Экологическая техноёмкость, усл. т/(км <sup>2</sup> ·год)		
	$t_1$	$t_2$	$t_3$
Новый Порт	1435	4,24	6,43
Тазовское	1435	4,24	7,17
Яр-Сале	1180	3,59	6,66
Ныда	1180	3,59	6,16
Сидоровск	856	2,75	5,12
Салехард	1203	3,76	4,91
Таз	764	2,92	5,12
Полуй	717	3,02	5,50
Уренгой	833	2,71	5,13
Питляяр	995	2,94	5,39
Надым	671	2,83	5,31
Мужи	972	2,98	5,14
Тарко-Сале	856	3,23	4,55
Толька	579	2,77	5,09
Хале-Савой	717	3,9	4,16

Удельная экологическая техноёмкость поверхностных вод  $t_2$  любой территории (речной бассейн, субъект Федерации, регион и т. п.) складывается из экологической техноёмкости местного и транзитного стока. Если второе слагаемое имеет наибольшее практическое значение для оценки антропогенной нагрузки сосредоточенных сбросов на воды транзитного водотока, то первое необходимо для оценки воздействия на водосборную площадь и мелкую гидрографическую сеть региона. В частности, для территории ЯНАО в целом главный транзитный водоток — это река Обь, более 96% водосборной площади которой расположено за пределами округа. Таким образом, удельная экологическая техноёмкость поверхностных вод исследуемой территории в целом — это техноёмкость поверхностного стока, сформированного в основном на водосборных площадях рек, полностью расположенных в пределах ЯНАО (Надым, Пур, Таз и др.), а величина экологической техноёмкости поверхностных вод региона является реализацией исключительно особенностей его увлажнения и строения его речных бассейнов. Это обстоятельство позволило автору использовать для оценки удельной экологической техноёмкости поверхностных вод

данные водного кадастра, а также результаты собственных водно-балансовых расчетов (см. табл. 1).

Как видно из табл. 1, вклад в общую (суммарную) экологическую техноёмкость территории ЯНАО ( $t = t_1 + t_2 + t_3$ ) каждого из компонентов удельной экологической техноёмкости (приземные слои атмосферы, поверхностные воды и естественные фитоценозы) различен. Около 99,0% — это вклад удельной экологической техноёмкости приземного слоя воздуха, характеризующегося, кроме того, наибольшей экологической устойчивостью.

Вместе с тем экологическая техноёмкость естественных фитоценозов ЯНАО имеет минимальные для Западной Сибири значения и соответственно характеризуется минимальной экологической устойчивостью к антропогенному воздействию.

Таким образом, для обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития Ямало-Ненецкого автономного округа мероприятия, направленные на его хозяйственное освоение, можно и должно осуществлять с учетом экологических возможностей отдельных территорий и без нарушения структурных и функциональных свойств региональных экосистем.

## Литература

1. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2013 : стат. сб. / Росстат. М., 2013. 990 с.
2. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.11.08 № 1734-р // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2008. № 50.
3. Геоэкология и природопользование. Понятийно-терминологический словарь / Авт.-сост. В. В. Козин и В. А. Петровский. Смоленск : Ойкумена, 2005. 576 с.
4. Акимова Т. А., Хаскин В. В. Экология : учебник для вузов. М. : ЮНИТИ, 2000. 566 с.
5. Белоненко Г. В., Попова Н. Б., Тусупбеков Ж. А. Эколого-географические условия транспортного освоения Западной Сибири. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2012. 266 с.

## References

1. Regiony Rossii. Sotsialno-ekonomicheskie pokazateli. 2013 : stat. sb. [Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2013] / Rosstat. M., 2013. 990 p.
2. Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda : rasporyazhenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 22.11.08 № 1734-r [Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 : Order of the Government of the Russian Federation of 22.11.08 No. 1734-r] // Sobr. zakonodatelstva Ros. Federatsii. 2008. № 50.
3. Geoekologiya i prirodopolzovanie. Ponyatiyno-terminologicheskij slovar [Geoecology and nature. Conceptual and terminological dictionary] / Avt.-sost. V. V. Kozin i V. A. Petrovskiy. Smolensk : Oyкуmena, 2005. 576 p.
4. Akimova T. A., Khaskin V. V. Ekologiya : uchebnik dlya vuzov [Ecology : a textbook for universities]. M. : YuNITI, 2000. 566 p.
5. Belonenko G. V., Popova N. B., Tusupbekov Zh. A. Ekologo-geograficheskie usloviya transportnogo osvoeniya Zapadnoy Sibiri [Ecological and geographical conditions of transport development of Western Siberia]. Novosibirsk : Izd-vo SGUPS, 2012. 266 p.

УДК 656.225.073.235

Дмитрий Владимирович Кузьмин, аспирант кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ)

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНЫХ КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Dmitriy Vladimirovich Kuzmin, graduate student, Department of Logistics and Transport Systems, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)

### Simulation model of regional piggyback traffic

#### Аннотация

Представлено описание состава системно-динамической имитационной модели создания и развития контрейлерного терминала на региональном уровне. Приведены результаты исследования факторов, определяющих эффективность контрейлерных перевозок. Показаны направления использования разработанной имитационной модели для оценки потенциала региона по развитию контрейлерных перевозок.

**Ключевые слова:** контрейлерные перевозки, терминал, имитационное моделирование, системная динамика, AnyLogic, региональные перевозки, организация перевозок.

#### Summary

Composition of system dynamics simulation model of creation and development of regional piggyback terminal is described. The results of the study of factors determining the effectiveness of piggyback transportation are provided. Areas of use of the created simulation model to assess regional potential for the development of piggyback transportation are indicated.

**Keywords:** piggyback transportation, terminal, simulation modeling, system dynamics, AnyLogic, regional transportation, transportation management.

Эффективность региональной производственно-экономической деятельности Российской Федерации тесно связана с уровнем транспортного обеспечения. Отсутствие или низкое качество предоставляемых транспортных услуг в грузовом сообщении негативно отражаются на развитии межпроизводственных связей и являются существенным барьером для интенсивного товарообмена между регионами.

Формирование эффективных региональных транспортных систем — сложная комплексная задача, затрагивающая технический, экономический и социальный аспекты. Неудовлетворительное состояние транспортной инфраструктуры и исчерпание пропускной способности путей сообщения вынуждают прибегать к сочетанию различных видов транспорта на относительно небольших дистанциях. Во внутриматериковом грузовом сообщении наиболее востребованы такие виды транспорта, как автомобильный и железнодорожный, поэтому предоставление транспортных услуг с их комбинированным участием является актуальной задачей.

Опыт ряда европейских стран и США показывает, что один из наиболее оптимальных вариантов подобного сочетания — контрейлерные перевозки. Экономическая эффективность таких перевозок является темой многолетних дискуссий. В большинстве государств контрейлерные перевозки дотируемы, а их использование продиктовано рядом обстоятельств. Например, в Швейцарии и Австрии это связано с необходимостью быстрого и безопасного преодоления горных препятствий. Кроме того, в большинстве стран Европы действуют строгие экологические ограничения и, как следствие, запрет выезда грузового транспорта на дороги общего пользования в выходные дни и дневное время суток, а также высокие налоги на автомобильный транспорт.

В настоящее время в Российской Федерации мало предпосылок для внедрения и активного использования контрейлерных перевозок, несмотря на многочисленные попытки. Это обусловлено, в частности, недостаточной приспособленностью имеющегося на «пространстве 1520» железнодорожного подвижного состава для контрейлерных перевозок; неразвитостью системы контрейлерных терминалов; отсутствием правовой и методической базы организации и тарификации контрейлерных перевозок; несогласованностью действий перевозчиков и экспедиторов по обеспечению требований грузо-владельцев к своевременности и сохранности перевозок [1, 2].





Рис. 4. Структура блока модели, имитирующего динамику эксплуатационных затрат на железнодорожные перевозки

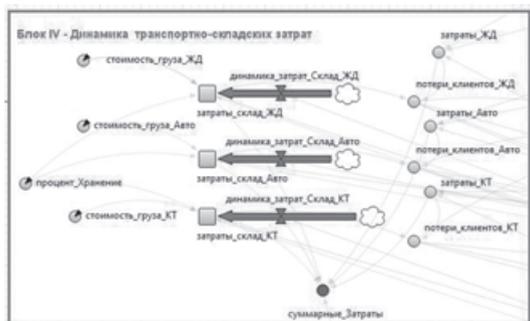


Рис. 5. Структура блока модели, имитирующего динамику транспортно-складских затрат

В начальный момент моделирования известный годовой объем спроса на перевозки полностью удовлетворяется железнодорожным и автомобильным транспортом. Предполагается, что фактическое распределение региональных объемов перевозок между этими видами транспорта определяется транспортной характеристикой и дальностью транспортировки конкретных грузов, производимых и потребляемых в регионе. В процессе моделирования суточные объемы автомобильных, железнодорожных и контейнерных (в случае их появления) перевозок изменяются в зависимости от величины текущего спроса на соответствующие услуги  $Q_t$ , которую предлагается рассчитывать по формуле

$$Q_t = Q_0 + \frac{Q_0 K_3 \Delta C}{100}, \quad (1)$$

где  $Q_0$  — объем перевозок в начальный момент моделирования, т;

$K_3$  — коэффициент эластичности спроса на логистические услуги, зависящей от вида транспорта, используемого при перевозках;

$\Delta C$  — изменение стоимости логистических услуг на доставку грузов, %,

$$\Delta C = \frac{C_t - C_0}{C_0} + \frac{W_t - W_0}{W_0}, \quad (2)$$

где  $C_t$  — себестоимость транспортировки на момент моделирования  $t$ , руб./т·км;

$C_0$  — себестоимость транспортировки в начальный момент моделирования, руб./т·км;

$W_t$  — себестоимость хранения грузов на момент моделирования  $t$ , руб./т;

$W_0$  — себестоимость хранения грузов в начальный момент моделирования, руб./т.

Если складские затраты клиентов превышают затраты на транспортировку грузов (блок IV, см. рис. 5), разница между этими затратами определяет потребность в перевозках повышенного качества. Величину спроса на перевозки повышенного качества предлагается рассчитывать как средневзвешенную объемов перевозок различными видами транспорта по разнице между складскими и транспортными затратами:

$$\Delta Q_t = \frac{Q_{a,t} \Delta Z_{a,t} + Q_{ж,t} \Delta Z_{ж,t} + Q_{к,t} \Delta Z_{к,t}}{\Delta Z_{a,t} + \Delta Z_{ж,t} + \Delta Z_{к,t}} \quad (3)$$

при  $\Delta Z_{a,t}, \Delta Z_{ж,t}, \Delta Z_{к,t} > 0$ ,

где  $Q_{a,t}, Q_{ж,t}, Q_{к,t}$  — суммарный объем перевозок на момент модельного времени  $t$  соответственно автомобильным, железнодорожным транспортом и контейнерными поездами, т;

$\Delta Z_{a,t}, \Delta Z_{ж,t}, \Delta Z_{к,t}$  — разница между складскими и транспортными затратами на момент модельного времени  $t$  соответственно для автомобильного, железнодорожного транспорта и контейнерных поездов, руб.

Спрос на качественные перевозки в общем случае может удовлетворяться любым видом транспорта. Условиями освоения спроса на качественные перевозки определенным видом транспорта являются минимум затрат по сравнению с другими видами транспорта и наличие потерь у клиентов данного вида транспорта. Дополнительные затраты на обеспечение качественных перевозок предлагается рассчитывать по формуле

$$\Delta C_q = \Delta Q_t \cdot K_Q \cdot \Delta L_t \cdot K_L \cdot C_t, \quad (4)$$

где  $K_Q, K_L$  — коэффициенты изменения затрат при увеличении соответственно объемов и дальности перевозок повышенного качества; рассчитываются как средняя величина договорных затрат на обеспечение своевременных и (или) сохраненных перевозок различными транспортными компаниями региона;

$\Delta L_t$  — потребность в увеличении дальности перевозок повышенного качества; рассчитывается как среднее значение фактической дальности транспортировки грузов, для которых величина  $\Delta Z_t$  положительная, с учетом прогноза или потребности изменения дальности таких перевозок, км.

Для удовлетворения спроса на качественные перевозки выбирается такой вид транспорта, для которого отношение  $\Delta Z_t$  к  $\Delta C_q$  максимально.

Если спрос на качественные перевозки эффективно удовлетворяется за счет организации контейнерных перевозок и (или) в регионе возникает спрос на контейнерные перевозки обычного качества, но с меньшей по сравнению с другими видами транспорта стоимостью, то появляется необходимость в формировании сети контейнерных терминалов. В разработанной модели такая ситуация возникает при

потоках «увеличение\_КАЧ\_КТ» или «суточный\_объем\_КТ» (см. рис. 1) ненулевой интенсивности. Величина запаса в накопителе «спрос\_перевозки\_КТ» соответствует суммарному спросу на контрейлерные перевозки (в тоннах).

Предполагается, что спрос на контрейлерные перевозки удовлетворяется за счет строительства одного или нескольких контрейлерных терминалов. Возникает задача определить оптимальное место для размещения таких терминалов на железнодорожных станциях региона. Вопросы разработки типовых схем и схем путевого развития контрейлерных терминалов, а также оптимизации их размещения рассмотрены в [3, 13], где, в частности, обоснована оптимальная численность приемо-отправочных путей и грузовых фронтов для переработки контрейлерного поездопотока, определены затраты на размещение контрейлерных терминалов на железнодорожных станциях с различными вариантами схем путевого развития. Результаты этих исследований предлагается использовать в разработанной модели при подготовке исходных данных о затратах на строительство и эксплуатацию контрейлерного терминала на конкретных железнодорожных станциях.

Выбор железнодорожных станций для размещения контрейлерных терминалов в имитационной модели осуществляется путем использования механизма оптимизации AnyLogic. Выбор производится по критерию минимума потока денежных средств на строительство (блок II, см. рис. 2) и эксплуатацию (блок III-1, см. рис. 3) системы терминалов в течение периода моделирования при условии полного удовлетворения потребности региона в контрейлерных перевозках. Региональная сеть контрейлерных терминалов описывается в модели набором параметров «вариант\_1», «вариант\_2» и т. д. (см. рис. 2), каждый из которых принимает значение 0 или 1 в зависимости от того, размещен или нет контрейлерный терминал на соответствующей станции. Варианты размещения характеризуются затратами на строительство определенного терминала («затраты\_Строительство») и его перерабатывающей способностью («перерабатывающая\_способность\_КТ»), заданными в модели массивами значений. Затраты на строительство включают в себя затраты, связанные с путевым развитием терминала, увеличением парка маневровых локомотивов, созданием внутерминальной инфраструктуры, а также организацией вспомогательных служб (охраны правопорядка, скорой помощи и т. п.).

Затраты на обеспечение качественных контрейлерных перевозок в модели эквивалентны их эксплуатационным затратам, тогда как удовлетворение спроса на перевозки повышенного качества автомобильным и железнодорожным транспортом требует дополнительных затрат (блок III-2 для железнодорожного транспорта и аналогичный по структуре блок III-3 — для автомобильного). Увеличение себестоимости автомобильных и железнодорожных перевозок приводит к снижению спроса как на них (блок I), так и на качественные перевозки, поскольку в этом случае складские затраты клиентов могут стать меньше транспортных издержек, т. е. величины  $\Delta Z_{a, r}$ ,  $\Delta Z_{ж, r}$ ,  $\Delta Z_{к, r}$  в формуле (3) становятся отрицательными (блок IV, см. рис. 5).

С увеличением себестоимости перевозок происходит снижение объемов промышленного производства в регионе и сокращение спроса на перевозки. Сохранение такой тенденции

в перспективе способствует уменьшению транспортных тарифов и через определенный период моделирования — последующему росту объемов производства и спроса на транспортные услуги. Для моделирования влияния транспортных затрат на объемы промышленного производства в регионе использованы зависимости, представленные в работе [14].

На разработанной имитационной модели проведены серии простых и оптимизационных экспериментов, которые учитывали и создание на железнодорожных станциях региона сети контрейлерных терминалов, и существующую ситуацию, когда весь спрос на перевозки удовлетворяется только автомобильным и железнодорожным транспортом. В качестве единицы модельного времени выбраны сутки, продолжительность периода моделирования составила 15 лет. В ходе модельных экспериментов оценивался срок достижения равновесного состояния параметров модели, амплитуда колебания этих параметров, а также величина суммарных транспортно-складских затрат в течение всего периода моделирования. Внешние и внутренние рыночные, политические и социальные факторы, такие как инфляционные процессы, изменения таможенного законодательства, демографическая ситуация и т. п., не учитывались.

На основании результатов экспериментов сделаны следующие выводы:

введение в моделируемую систему сети контрейлерных терминалов с ориентацией контрейлерных перевозок на удовлетворение потребностей клиентов в перевозках повышенного качества позволяет достичь равновесного состояния модели в течение 7,5 лет, тогда как для существующих условий оно достигается через 12,3 лет;

амплитуда колебаний параметров модели, таких, например, как себестоимость перевозок при формировании в регионе сети контрейлерных терминалов, уменьшается на 23 %; оптимизация размещения контрейлерных терминалов на железнодорожных станциях региона позволяет достичь равновесного состояния модели в течение 3,8 лет модельного времени при сокращении суммарных транспортно-складских издержек в системе на 21 %.

Таким образом, эксперименты с разработанной моделью, учитывающие влияние выбранного множества факторов, свидетельствуют об эффективности формирования региональных сетей контрейлерных терминалов, позволяющих обеспечить потребность клиентов в перевозках повышенного качества с минимальными издержками и снизить отрицательное воздействие колебаний рыночных факторов в цепях поставок.

В качестве основных направлений развития разработанной системно-динамической имитационной модели, которые дадут возможность использовать ее для проектирования реальных региональных сетей контрейлерных терминалов, определены следующие: переход от усредненных значений эксплуатационных транспортных затрат и складских затрат к конкретным затратам по отдельным контрейлерным терминалам, а также отдельным грузопотокам для всех видов транспорта; моделирование этажности создания контрейлерных терминалов на железнодорожных станциях региона; учет влияния внешних рыночных, политических и социальных факторов на параметры модели путем введения в нее блоков, реализующих известные закономерности.

## Литература

- Багинова В. В., Кузьмин Д. В. Особенности развития контрейлерных перевозок в России // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. № 4. С. 49–52. ISSN 2222-9396.
- Кузьмин Д. В., Белых А. Л. Актуальные проблемы организации контрейлерных перевозок в условиях рынка // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. № 4. С. 153–156. ISSN 2222-9396.
- Рахмангулов А. Н., Корнилов С. Н., Кольга А. Д. Обеспечение своевременности грузовых перевозок в транспортно-технологических системах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 115–121. ISSN 1995-2732.
- Гусейнов Р. Р. Технико-экономическое обоснование сфер эффективного применения железнодорожных станций, обслуживающих контрейлерный терминал // Наука и техника транспорта. 2014. № 4. С. 108–109. ISSN 2074-9325.
- Кириллова А. Г. Методология организации контейнерных и контрейлерных перевозок в мультимодальных автомобильно-железнодорожных сообщениях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М. : МАДИ, 2011. 49 с.
- Транспортная логистика : учеб. пособие / С. Е. Гавришев, Е. П. Дудкин, С. Н. Корнилов и др. СПб. : Изд-во ПГУПС, 2003. 279 с.
- Рахмангулов А. Н., Копылова О. А., Аутов Е. К. Выбор мест для логистических мощностей // Мир транспорта. 2012. № 1 (30). С. 84–91. ISSN 1992-3252.
- Рахмангулов А. Н., Копылова О. А., Мишкuroв П. Н. Железнодорожные транспортно-технологические системы: организация функционирования. Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. 300 с.
- Рахмангулов А. Н., Копылова О. А. Оценка социально-экономического потенциала региона для размещения объектов логистической инфраструктуры // Экономика региона. 2014. № 2. С. 254–263. ISSN 2072-6414.
- Копылова О. А., Рахмангулов А. Н. Применение метода системной динамики для исследования факторов размещения элементов транспортно-логистической инфраструктуры // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2012. № 2. С. 92–97. ISSN 2222-9396.
- Методика формирования энергоэффективной транспортно-логистической инфраструктуры / А. Н. Рахмангулов, В. В. Багинова, Е. К. Аутов и др. // Бюллетень транспортной информации. 2012. № 5 (203). С. 26–30. ISSN 2072-8115.
- Кузьмин Д. В. Особенности организации контрейлерных перевозок с использованием средств многоподходного имитационного моделирования // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2014. № 3. С. 39–43. ISSN 0130-3848.
- Алаев М. М., Стуров Р. Р., Гусейнов Р. Р. Типизация схем транспортно-грузовых терминалов // Мир транспорта. 2010. № 5. С. 68–71. ISSN 1992-3252.
- Лало В. Ф. Пространственное распределение инвестиций в России: агломерационный эффект. М. : РПЭИ, 2002. 127 с.

## References

- Baginova V. V., Kuzmin D. V. Osobennosti razvitiya kontreylernykh perevozk v Rossii [Specifics of piggyback transportation development in Russia] // Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii. 2013. № 4. P. 49–52. ISSN 2222-9396.
- Kuzmin D. V., Belykh A. L. Aktualnye problemy organizatsii kontreylernykh perevozk v usloviyakh rynka [Actual problems of piggyback transportation management in market conditions] // Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii. 2013. № 4. P. 153–156. ISSN 2222-9396.
- Rakhmangulov A. N., Kornilov S. N., Kolga A. D. Obespechenie svoevremennosti gruzovykh perevozk v transportno-tekhnologicheskikh sistemakh [Ensuring timeliness of freight traffic in transport and industrial systems] // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova. 2014. № 1 (45). P. 115–121. ISSN 1995-2732.
- Guseynov R. R. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie sfer effektivnogo primeneniya zheleznodorozhnykh stantsiy, obsluzhivayushchikh kontreylernyy terminal [Technical and economic substantiation of the areas for efficient use of railway stations serving piggyback terminal] // Nauka i tekhnika transporta. 2014. № 4. P. 108–109. ISSN 2074-9325.
- Kirillova A. G. Metodologiya organizatsii konteynernykh i kontreylernykh perevozk v multimodalnykh avtomobilno-zheleznodorozhnykh soobshcheniyakh : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methodology of organization of container and piggyback transportation in multimodal road-rail transport operations : Synopsis of DSc in Engineering Thesis]. M. : MADI, 2011. 49 p.
- Transportnaya logistika : ucheb. posobie [Transport Logistics : a textbook] / S. E. Gavrishev, E. P. Dudkin, S. N. Kornilov i dr. SPb. : Izd-vo PGUPS, 2003. 279 p.
- Rakhmangulov A. N., Kopylova O. A., Autov E. K. Vybormest dlya logisticheskikh moshchnostey [Choosing locations for logistics facilities] // Mir transporta. 2012. № 1 (30). P. 84–91. ISSN 1992-3252.
- Rakhmangulov A. N., Kopylova O. A., Mishkurov P. N. Zheleznodorozhnye transportno-tekhnologicheskie sistemy: organizatsiya funktsionirovaniya [Rail transport and industrial systems: operations management]. Magnitogorsk : Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G. I. Nosova, 2014. 300 p.
- Rakhmangulov A. N., Kopylova O. A. Otsenka sotsialno-ekonomicheskogo potentsiala regiona dlya razmeshcheniya obyektov logisticheskoy infrastruktury [Assessment of socio-economic potential of the region for allocation of logistics infrastructure facilities] // Ekonomika regiona. 2014. № 2. P. 254–263. ISSN 2072-6414.
- Kopylova O. A., Rakhmangulov A. N. Primenenie metoda sistemnoy dinamiki dlya issledovaniya faktorov razmeshcheniya elementov transportno-logisticheskoy infrastruktury [Application of system dynamics method to study the factors for allocation of transport and logistics infrastructure elements] // Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii. 2012. № 2. P. 92–97. ISSN 2222-9396.
- Metodika formirovaniya energoeffektivnoy transportno-logisticheskoy infrastruktury [Development methodology of energy-efficient transport and logistics infrastructure] / A. N. Rakhmangulov, V. V. Baginova, E. K. Autov i dr. // Byulleten transportnoy informatsii. 2012. № 5 (203). P. 26–30. ISSN 2072-8115.
- Kuzmin D. V. Osobennosti organizatsii kontreylernykh perevozk s ispolzovaniem sredstv mnogopodkhodnogo imitatsionnogo modelirovaniya [Specifics of piggyback transportation management with the use of iterative simulation] // RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsniya. 2014. № 3. P. 39–43. ISSN 0130-3848.
- Alaev M. M., Sturov R. R., Guseynov R. R. Tipizatsiya skhem transportno-gruzovykh terminalov [Type design of freight cargo terminals] // Mir transporta. 2010. № 5. P. 68–71. ISSN 1992-3252.
- Lapo V. F. Prostranstvennoe raspredelenie investitsiy v Rossii: aglomeratsionnyy effekt [Spatial distribution of investments in Russia: agglomeration effect]. M. : RPEI, 2002. 127 p.

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

№ 1 (44), 2015 год

Издается с июня 2004 г.

Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс: 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство ПИ № 77-18098

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.transporturala.usurt.ru>

e-mail: [EPupova@usurt.ru](mailto:EPupova@usurt.ru)

Учредитель:

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)

Главный редактор:

Александр Васильевич Ефимов

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](mailto:EPupova@usurt.ru)

Дизайн:

Антон Леонидович Курносков

Верстка:

Андрей Викторович Трубин

Перевод:

Элеонора Рашитовна Яхина

(департамент международных связей УрГУПС), тел. (343) 221-24-86

Автор фотографии на обложке:

Мария Александровна Могиленских

С 1 января 2007 г. журнал включен ВАКом в перечень периодических, научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Подписано в печать 24.03.2015

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Отпечатано в типографии ООО «Издательство УМЦ УПИ»,

620078, Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2,

тел. (343) 362-91-16, 362-91-17

Заказ № 5298

© Уральский государственный университет путей сообщения, 2015

