

**ТРАНСПОРТНАЯ СЕТЬ С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ:  
ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА**

**ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЕ ТАРИФЫ НА ГОРОДСКОМ  
ОБЩЕСТВЕННОМ ТРАНСПОРТЕ. МИРОВОЙ ОПЫТ  
И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РОССИЙСКИХ УСЛОВИЯХ**

**КОНТРЕЙЛЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ КАК ТОЧКА РОСТА  
ЛОГИСТИЧЕСКОГО БИЗНЕСА ОАО «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»**

**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК  
ОБЩЕСТВЕННЫМ ТРАНСПОРТОМ В ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАНАХ  
И КОНТРАКТНАЯ ПОЛИТИКА В ПЕРЕВОЗКАХ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА  
КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ**



## **Вниманию аспирантов и докторантов.**

Приказом Федеративного агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 года 811-ст с 13 декабря 2011 года введен в действие ГОСТ 3 7.0.11-2011

«Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления», согласно которому следует оформлять библиографические списки литературы в статьях, присылаемых в редакцию.

## **ПРАВИЛА НАПИСАНИЯ СТАТЕЙ**

1. В редакцию направляется текст статьи с информацией об авторах, шифром УДК, двуязычной аннотацией с выделенными ключевыми словами, списком литературы, графиками, рисунками и таблицами. К тексту прилагается сопроводительное письмо, авторский договор и рецензия, заверенная у секретаря ученого совета. В редакцию необходимо прислать распечатку статьи в двух экземплярах (один из экземпляров подписывается всеми авторами, содержит их полные фамилии, имена и отчества, места работы и должности, научные звания, почтовые и электронные адреса и контактные телефоны) и электронный вариант на CD или по электронной почте.

2. Текст статьи объемом не более 12 — 14 страниц предоставляется в формате Microsoft Word'2000-2007, RTF (другие форматы допустимы при согласовании). Размер страницы А4, шрифт из группы Times, кегль 14 pt, полуторный интервал. Все поля по 2 см.

3. Рисунки предоставляются в электронном виде в форматах TIFF, PNG, JPEG. Разрешение растровых рисунков должно быть не менее 100 пикселей на сантиметр (250 на дюйм). Внедренная в текстовый документ графика не всегда воспроизводима в исходном виде. Редакция не несет ответственности за возможные искажения информации, предоставленной только в электронном виде.

4. Таблицы располагаются непосредственно после абзаца, содержащего упоминание о данной таблице. Все таблицы в тексте необходимо пронумеровать, озаглавить. Кегль внутри таблиц — 11, расположение текста — по ширине, расстановка переносов обязательна, междустрочный интервал одинарный.

5. Каждое наименование в списке литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-84 «Библиографическое описание документа» и должно содержать фамилию автора (инициалы указываются после фамилии), название произведения, место издания (город и издательство), год издания, том, выпуск и страницы. Список должен содержать не более 10 источников. Ссылки на источники даются в квадратных скобках, в соответствии с нумерацией в списке литературы.

6. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

## **INSTRUCTIONS FOR AUTHORS**

1. The text of the article with information about authors, UDC code, bilingual annotation with indicated key words, list of Literature, graphs, figures and tables is sent to the Editorial Office. The text should come with Cover letter, author's contract and review, attested by the Scientific Board Secretary. It is necessary to send to the Editorial Office the printed version of the paper in duplicate (one of the copies is signed by all the authors, contains full information about them, such as: surnames, first and patronymic names, place of work and positions, academic ranks, post and e-mail addresses and contact telephone numbers) and the electronic version on CD or via e-mail.

2. Text of the article should be up to 12-14 pages in Microsoft Word'2000 up to 2007 or Rich Text Format (other formats can be admitted by agreement). Page size A4 formatting, 14-point Times font, 1.5 line spacing. 2 cm margins should be used on all sides.

3. Figures should be presented in electronic version in TIFF, PNG, JPEG formatting. Raster drawings resolution should be 100 pixels per 1 cm (250 pixels per 1 inch) at least. Graphics included into the text document isn't always reproduced in the unmodified state. The Editorial Office isn't responsible for possible information distortion, if presented electronic version only.

4. The table should be placed straight after the paragraph, in which it is mentioned. All the tables should be numbered and titled. Font to be used inside the tables should be 11-point font, the text should be centered, with compulsory hyphenation, single line spacing.

5. Each name in the list of Literature should be composed according to the requirements of State Standard 7.1-84 'Bibliographical description of a document' and contain the author's surname (initials should be put after the surname), paper title, place of publication (city and Publishing House), year of publication, volume, issue and pages. The list of the literature should contain not more than 10. References should be indicated in square brackets, according to the numbers in the list of literature.

6. Fee for papers' publication is not charged from PhD students.

## 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, член-кор. РАН, 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 Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Асадченко Виталий Романович, д-р техн. наук, профессор, научный редактор, Екатеринбург
2. Боровских Александр Михайлович, канд. техн. наук, профессор, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Грицык Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Ростов
5. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
6. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
7. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
8. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Челябинск
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 «Ural Transport», Ekaterinburg, Russia
2. Aleksander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, corresponding member of Russian Academy of Sciences, 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. Valery Domansky, DSc, professor of National technical University «Kharkiv politechnical institute», Kharkiv, Ukraine

## EDITORIAL BOARD

1. Asadchenko Vitaly Romanovich, DSc, professor, scientific editor, Ekaterinburg
2. Aleksandr Mikhailovich Borovskikh, PhD, professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Gritsyk Valery Ivanovich, DSc, professor, Rostov
5. Kozlov Petr Alekseevich, DSc, professor, Moscow
6. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
7. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
8. Larin Oleg Nikolaevich, DSc, professor, Chelyabinsk
9. Ledyaev Alexandr Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
10. Reznik Leonid Grigorievich, DSc, professor, Tumen
11. Rumyantsev Sergey Alekseevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
12. Say Vasily Mikhailovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
13. Smolyaninov Alexandr Vasilievich, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Umnyashkin Vladimir Alekseevich, DSc, professor, Izhevsk
16. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА**

**Д.С. Завалишин, Г.А. Тимофеева/ ТРАНСПОРТНАЯ СЕТЬ С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ: ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА ..... 3**

**Д.С. Бухаров, А.Л. Казаков/ ТРАССИРОВКА НА ЦИФРОВОЙ КАРТЕ: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ..... 7**

**И.А. Назипов/ МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ СТАНЦИЙ НА МАЛОДЕЯТЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ СВЕРДЛОВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ..... 13**

**Х.Т. Туранов, Е.Д. Псеровская/ РАСЧЕТ ПРОДОЛЬНОГО СДВИГА ГРУЗА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ И УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ КРЕПЛЕНИЯ ПРИ ВАРИАЦИИ КОЛИЧЕСТВА КРЕПЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ..... 16**

**В.В. Стружанов, Е.А. Бахарева/ К РАСЧЕТУ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЧИСТОМ ИЗГИБЕ ..... 24**

**А.В. Малишевский, О.В. Ариничева, П.Е. Бровкин/ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПАРАХ ПИЛОТОВ ..... 28**

**Е. Хамелайнен/ КОНЦЕПЦИЯ СУХОГО ПОРТА В ЛОГИСТИКЕ ТРАНССИБИРСКОЙ МАГИСТРАЛИ ..... 36**

**А.С. Голубева, Е.Р. Магарил/ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ЭКОНОМИЧЕСКОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO<sub>2</sub> АВТОМОБИЛЯМИ ..... 39**

**А.И. Петров, В.А. Игнатьюгин/ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЕ ТАРИФЫ НА ГОРОДСКОМ ОБЩЕСТВЕННОМ ТРАНСПОРТЕ. МИРОВОЙ ОПЫТ И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РОССИЙСКИХ УСЛОВИЯХ ..... 46**

**А.С. Шека/ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГЕБР ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОТКАЗОВ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ..... 53**

**АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА**

**Д.В. Ефанов, Е.В. Басалаев/ ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕЛЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЦЕНТРАЛИЗАЦИЯМИ ..... 58**

**А.С. Демагин, Ш.К. Валиев/ СИНТЕЗ БЕЗОПАСНЫХ УСТРОЙСТВ СО СХемой ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ ..... 63**

**М.А. Оськина, Б.С. Сергеев, В.А. Сисин/ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ ..... 66**

**ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО**

**Т.А. Волкова, С.С. Волков/ РАСЧЕТ МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ В ПРУЖИНЫХ РЕССОРАХ ВАГОНОВ ..... 69**

**ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ**

**М.А. Журавская, И.О. Макаренко/ КОНТРЕЙЛЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ КАК ТОЧКА РОСТА ЛОГИСТИЧЕСКОГО БИЗНЕСА ОАО «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ» ..... 74**

**И.Н. Боднар/ ВОПРОСЫ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОПЕРАТОРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ..... 80**

**Н.В. Якунина, О.В. Кабанова, А.П. Фот/ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОВ ОБЩЕСТВЕННЫМ ТРАНСПОРТОМ В ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАНАХ И КОНТРАКТНАЯ ПОЛИТИКА В ПЕРЕВОЗКАХ ..... 84**

**Е.В. Синицын, С.В. Вихарев, Д.А. Брусанин/ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКОВ НА ДОЛГОСРОЧНОМ УРОВНЕ ..... 89**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА**

**В.А. Усов, А.А. Калинина/ О ПРОЦЕССЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С РЕЛЬСАМИ ..... 95**

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ**

**А.Г. Галкин, А.А. Ковалев, А.В. Микава, А.В. Окунев/ РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ ..... 99**

**О.А. Сидоров, С.В. Заренков, О.А. Ходунова/ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ В УЗЛАХ КРЕПЛЕНИЯ ПОВОРОТНОЙ КОНСОЛИ НА ИЗМЕНЕНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОДОВ ПО ДЛИНЕ АНКЕРНОГО УЧАСТКА ..... 103**

**А.Н. Смердин, А.Е. Чепурко/ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ CFD-МЕТОДА ПРИ РАСЧЕТЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ..... 107**

**А.Р. Закирова, К.Б. Кузнецов/ ОЦЕНКА ЭМП НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ..... 112**

**А.В. Ефимов, И.Г. Дутов/ РЕГУЛИРОВКА ЗИГЗАГОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПЕНСИРОВАННОЙ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ ..... 118**

**GENERAL TRANSPORT PROBLEMS**

**D.S. Zavalishhin, G.A. Timofeeva/ TRANSPORT NETWORK WITH INDEFINITE PARAMETERS: ROUTE OPTIMIZATION ..... 3**

**D.S. Bukharov, A.L. Kazakov/ ROUTING ON A DIGITAL MAP: MATHEMATICAL MODEL AND NUMERICAL METHOD ..... 7**

**I.A. Nazipov/ SVERDLOVSK RAILWAY LOW-DENSITY SECTIONS STATIONS FACILITIES UPGRADING ..... 13**

**Kh.T. Turanov, E.D. Pserovskaya/ CALCULATION OF CYLINDRICAL FREIGHT LONGITUDINAL SHIFT AND FASTENING ELEMENTS TRACTION WITH VARIATION OF FASTENERS QUANTITY ..... 16**

**V.V. Struzhanov, E.A. Bahareva/ TO CALCULATION OF ULTIMATE LOADS OF BEAM ELEMENTS IN CASE OF THE PURE BEND ..... 24**

**A.V. Malishevsky, O.V. Arinicheva, P.E. Brovkin/ THE ANALYSIS OF EXPERIMENTS BY INTERACTION EFFICIENCY IN COUPLES OF PILOTS ..... 28**

**Erkki Hämäläinen/ DRY PORT CONCEPT IN THE TRANS-SIBERIAN RAILWAY (TSR) LOGISTICS ..... 36**

**A.S. Golubeva, E.R. Magaril/ IMPROVEMENT OF ECONOMIC INCENTIVES FOR REDUCTION OF MOTOR TRANSPORT CO<sub>2</sub> EMISSIONS ..... 39**

**A.I. Petrov, V.A. Ignatyugin/ THE DIFFERENTIATED TARIFFS ON CITY PUBLIC TRANSPORT. WORLD EXPERIENCE AND POSSIBILITY OF ITS USE IN THE RUSSIAN CONDITIONS ..... 46**

**A.S. Sheka/ EXPERIMENTAL ANALYSIS OF RELATIONAL ALGEBRA FOR MOBILE ROBOTS FAILURE IDENTIFICATION ..... 53**

**AUTOMATION AND REMOTE CONTROL**

**D.V. Efanov, E.V. Basalaev/ IMPROVING A FAULT TOLERANCE OF RELAY POWER INTERLOCKING CONTROL DEVICES ..... 58**

**A.S. Demagin, Sh.K. Valiev/ BUILT-IN CONTROL SAFETY DEVICES DESIGN ..... 63**

**M.A. Oskina, B.S. Sergeev, V.A. Sisin/ METHODS FOR LED TRAFFIC LIGHTS DEVELOPMENT ..... 66**

**CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT**

**T.I. Volkova, S.S. Volkov/ FREIGHT CARS COIL SPRINGS MICRODAMAGE CALCULATION ..... 69**

**CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION**

**M.A. Zhuravskaya, I.O. Makarenko/ PIGGY-BACK TRANSPORTATIONS AS POINT OF GROWTH OF LOGISTIC BUSINESS JSC RUSSIAN RAILWAYS ..... 74**

**I.N. Bodnar/ QUESTIONS OF FUNCTIONING SYSTEM PARAMETRIZATION OF ROLLING STOCK OPERATORS ..... 80**

**N.V. Yakunina, O.V. Kabanova, A.P. Fot/ ANALYSIS OF PASSENGER TRANSPORTATION BY PUBLIC TRANSPORT IN FOREIGN COUNTRIES AND TRANSPORTATION CONTRACT POLICY ..... 84**

**E.V. Sinitsyn, S.V. Vikharev, D.A. Brusyanin/ ECONOMIC-MATHEMATICAL MODEL OF TRAFFIC FLOW FORECASTING FOR LONG-RANGE PREDICTION ..... 89**

**ELECTRIC TRACTION**

**V.A. Usov, A.A. Kalinina/ ON THE RESTORATION PROCESS OF WHEEL-RAIL COUPLING ..... 95**

**ELECTRIC SUPPLY**

**A.G. Galkin, A.A. Kovalev, A.V. Mikawa, A.V. Okunev/ WIRE SUSPENSION LIFE CYCLE CALCULATION METHOD DEVELOPMENT ..... 99**

**O.A. Sidorov, S.V. Zarenkov, O.A. Khodunova/ STUDY OF PIVOT ARM JOINTS FRICTION IMPACT ON WIRES TENSION IN THE TENSION LENGTH ..... 103**

**A.N. Smerdin, A.E. Chepurko/ APPLICATION PECULIARITIES OF CFD-METHOD IN CALCULATION OF ELECTRICALLY MOVED VEHICLES CURRENT COLLECTIVE DEVICE AERODYNAMIC FORCES ..... 107**

**A.R. Zakirova, K.B. Kuznetsov/ EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS AT WORKPLACES OF TRACTION POWER SUPPLY ELECTRICAL WORKERS ..... 112**

**A.V. Efimov, I.G. Dutov/ ZIGZAGS ADJUSTMENT OF COMPENSATED CATENARY ..... 118**

УДК 625.518

**Дмитрий Станиславович Завалишин**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела оптимального управления Института математики и механики Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН), доцент кафедры «Высшая и прикладная математика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,

**Галина Адольфовна Тимофеева**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая и прикладная математика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,

## ТРАНСПОРТНАЯ СЕТЬ С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ: ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА

**Dmitriy S. Zavalishhin**, senior research associate of the Department of Optimum Control of the Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (IMM), PhD in Physics and Mathematics, Associate professor of Department of 'Higher and Applied Mathematics' of Urals State University of Railway Transport (USURT),  
**Galina A. Timofeeva**, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of Department of 'Higher and Applied Mathematics' of Urals State University of Railway Transport (USURT)

## Transport Network With Indefinite Parameters: Route Optimization

### Аннотация

В настоящее время подавляющее большинство транспортных средств, как наземных, так и всех остальных, оснащается электроникой и программным обеспечением, или «бортовыми компьютерами», способными решать навигационные задачи. Такие задачи включают в себя идентификацию места положения по сигналам спутников ГЛОНАСС, GPS, сигналам передатчиков сотовых операторов. Современное оборудование позволяет также определять другие параметры движения транспортного средства (направление, скорость), оценивать их отклонения от желаемых или заданных, восстанавливать пропущенную или неточную информацию, производить корректировку или выдавать соответствующие рекомендации. На основе получаемой информации навигационные системы на транспорте обеспечивают поддержку принятия решения о выборе оптимального маршрута. В статье описаны подходы к решению подобных задач для городского автомобильного транспорта, передвигающегося по улично-дорожной сети.

**Ключевые слова:** системы с неопределенными параметрами, транспортная сеть, маршрутизация, имитационное моделирование, оптимизация

### Abstract

Nowadays the vast majority of vehicles, both terrestrial and the remainder, are equipped with electronics and software, or the 'onboard computers' capable to solve navigation problems. This kind of tasks, first of all, include location identification by signals of GLONASS and GPS satellites, signals of transmitters of mobile network operators. Modern equipment also allows determining other parameters of vehicle's movement (movement direction, speed) to evaluate their deviations from desirable or given ones, to restore missed or inexact information, to make adjustment or to issue appropriate recommendations. On the basis of received information modern navigation systems on transport provide support of decision-making on optimum route choice. In the article approaches to the solution of similar tasks for city motor transport moving along street road network are described.

**Keywords:** model card, orient graph, navigation systems, routing.

### ВВЕДЕНИЕ

**В** качестве решения навигационных задач для городского автомобильного транспорта, передвигающегося по улично-дорожной сети, предполагается:

- разметка реальной или модельной карты;
- построение соответствующего обработанной карте ориентированного графа;
- формирование матриц данных;
- постановка задачи навигации (маршрутизации);
- построение множества допустимых маршрутов;
- постановка и решение задачи маршрутной оптимизации;
- анализ полученных результатов.

Все эти этапы и их реализация на примере Екатеринбурга рассмотрены с использованием методов исследования операций, в частности сетевого планирования и управления [1]. Особенность такого исследования — учет неточности имеющейся информации.

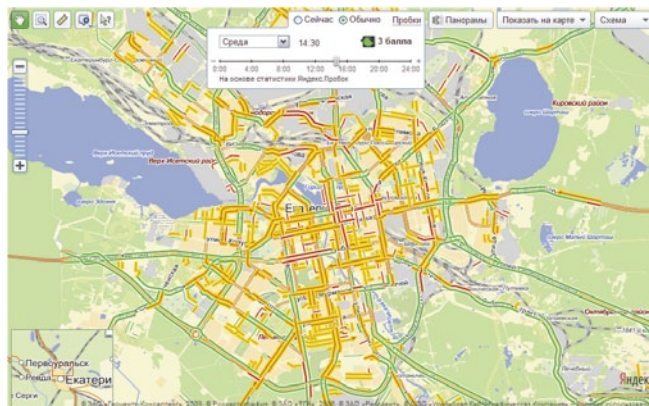


Рисунок 1 — Карта Екатеринбурга («Яндекс.Пробки»)

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

На примере Екатеринбурга (рис. 1), его основных магистралей может быть построен соответствующий ориентированный (при наличии участков с односторонним движением) граф с вершинами (узлами) и дугами (соединениями). Здесь одна терминология принята в теории графов, а другая сложилась в моделировании транспортных сетей.

Узел чаще всего отражает перекресток. Тем не менее он может быть включен и непосредственно в соединение, например, узел № 9 на рис. 2. Естественно полагать, что уменьшение шага дискретизации с ростом количества введенных узлов позволит увеличить точность позиционирования. С другой стороны, это приведет к известному «проклятию размерности» — к существенному (экспоненциальному) росту количества возможных решений (допустимых маршрутов). На рассматриваемом графе пронумерованы не все, а только центральные узлы.



Рисунок 2 — Граф транспортной сети

Каждое соединение между узлами характеризуется множеством параметров. Во-первых, это длина. Во-вторых, это направление соединения. Приведенные соединения считаются двунаправленными, т. е. соответствуют участкам дорог с двусторонним движением. Кроме того, соединение описывает его фундаментальная диаграмма [2] (рис. 3), отражающая зависимость потока  $f$  от плотности  $\rho$ . Величина потока измеряется количеством автомобилей, проходящих в одном направлении через сечение дороги в единицу времени, и может изменяться от 0 до максимального значения  $\bar{f}$ , называемого пропускной способностью дороги или соединения. Плотность  $\rho$  тоже имеет максимальное значение  $\bar{\rho}$ , зависящее от характеристик дороги. Критическая плотность  $\rho^c$  соответствует ситуации, когда поток  $f$  автотранспорта достигает максимального значения  $\bar{f}$  по пропускной способности дороги, и далее с ростом плотности автомобилей  $\rho$  величина потока  $f$  начнет уменьшаться из-за снижения скорости движения. Таким образом, левая часть фундаментальной диаграммы  $0 \leq \rho \leq \rho^c$  отражает свободное движение потока со скоростью  $V$ , который может быть вычислен по формуле

$$f = V\rho, \quad (1)$$

а правая часть  $\rho^c \leq \rho \leq \bar{\rho}$  соответствует распространению затора.

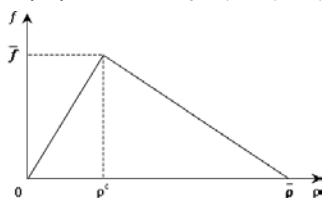


Рисунок 3 — Фундаментальная диаграмма соединения

Например, в соответствии с формулой (1) в соединении  $1 \rightarrow 9$  графа (см. рис. 2) движется свободный поток  $f=1500$  авт/ч с плотностью  $\rho=30$  авт/км и скоростью  $V=50$  км/ч. Далее с ростом плотности машин до критической (пусть она составляет  $\rho^c=90$  авт/км) поток тоже может увеличиться в три раза (при неизменной скорости). Затем же при плотности  $\rho=100$  авт/км и поток  $f$ , и скорость  $V$  начнут уменьшаться до нуля, что неизбежно приведет к затору. Основная задача управления движением в транспортной сети — не допустить такой ситуации. При этом набор методов или рекомендаций выглядит весьма небогато: от ограничения количества участников движения до увеличения максимальной скорости и пропускной способности [3, 4].

Информацию о длине соединений между узлами (км) можно представить в виде таблицы (табл. 1). По горизонтали и вертикали отражены номера размеченных на графе узлов. С учетом двунаправленности соединений эта таблица будет иметь вид симметричной матрицы.

Таблица 1 — Длина соединений между узлами, км

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1,1	0,8		2,2				3,1
2	1,1					2,3	1,9	2	
3	0,8						0,9		
4									
5	2,2					1,2			
6		2,3			1,2				
7		1,9	0,9						
8		2							
9	3,1								

Таким же способом можно отразить информацию о загруженности соединений в виде значений текущих плотностей  $\rho$  (табл. 2). Естественно, нет оснований утверждать, что на всем соединении плотность автомобилей будет неизменна. Но эту неравномерность можно учесть предварительным дроблением длинных соединений на более короткие, например до 50 м [5]. Вид матрицы в табл. 2 не будет симметричным, так как во встречных направлениях участвуют разные потоки.

Таблица 2 — Плотность потоков

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		30	40		50				90
2	40					50	60	70	
3	50						30		
4									
5	50					70			
6		60			60				
7		70	30						
8		80							
9	80								

Следует отметить, что для узлов нет правила согласованности по входящим и исходящим потокам, поскольку автомобили могут «исчезать» с парковок, «появляться» на них или просто делать остановки.

Наконец, информация по скорости потоков  $V$  в соединениях также может быть отражена подобным образом (табл. 3).

Таблица 3 — Средняя скорость потоков

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		15	35		35				60
2	25					50	55	45	
3	25						30		
4									
5	25					45			
6		35			35				
7		45	25						
8		55							
9	55								

**ПОИСК ДОПУСТИМЫХ МАРШРУТОВ**

В настоящее время многие интернет-ресурсы («Яндекс» и Google) предлагают информационные и визуальные сервисы (см. рис. 1) с данными о плотности движения и средней скорости на дорогах города [6]. Естественно, эта информация может поступать с небольшим запаздыванием и погрешностями. Поэтому скорость потока  $V$  в соединении является в известной степени случайной величиной. Ее значения ограничены конечным интервалом, например  $V \in [0,60]$  км/ч, и зависят не только от большого количества случайных факторов, оказывающих несущественное влияние (поведение водителей, погодные условия, состояние дорожного покрытия и т. п.), но и от малого количества случайных факторов, имеющих большое воздействие (ДТП, ремонт дорожного покрытия, участие в движении спецавтомобиля и т. д.). Подходящим законом распределения такой случайной величины представляется бета-распределение [7]. Его плотность является непрерывной уни-модальной функцией с формой графика (рис. 4), задаваемого двумя параметрами:  $\alpha$  и  $\beta$ .

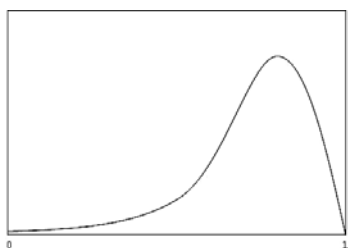


Рисунок 4 — График плотности бета-распределения при  $\alpha=5$  и  $\beta=2$

Плотность бета-распределения определяется формулой

$$B(x, \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, & 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & x < 0, \quad x > 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $B(\alpha, \beta)$  — бета-функция,

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx. \quad (3)$$

Математическое ожидание и дисперсия могут быть вычислены по формулам:

$$M(x) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}; \quad (4)$$

$$D(x) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2 (\alpha + \beta + 1)}. \quad (5)$$

Далее пусть для построенного ранее на рис. 2 графа транспортной сети требуется определить множество допустимых маршрутов из точки  $A$  в точку  $B$ , т. е. из 7-го узла в 5-й. Это множество

$$\left\{ \begin{array}{l} 7 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \\ 7 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \\ 7 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \\ 7 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \end{array} \right\} \quad (6)$$

построено алгоритмически из данных табл. 1.

**ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МАРШРУТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Для каждого из четырех найденных допустимых маршрутов (6) рассчитаны его длина  $S$  (км), среднее время  $t_{cp}$ , необходимое для его прохождения, средняя скорость  $V_{cp}$ . Эти данные приведены в табл. 4.

Таблица 4 — Характеристики допустимых маршрутов

Маршрут	7→2→6→5	7→2→1→5	7→3→1→2→6→5	7→3→1→5
$S$ , км	5,4	5,2	6,3	3,9
$t_{cp}$	7 мин 21 с	8 мин 56 с	13 мин 16 с	7 мин 51 с
$V_{cp}$ , км/ч	44	35	28	30

По критерию  $t_{cp} \rightarrow \min$  следует выбрать первый или четвертый маршрут, а по критерию минимального пробега — четвертый. Возникает закономерный вопрос о выборе самого критерия оптимальности маршрута. Помимо этого, принимая во внимание случайный характер скорости  $V$  потока в каждом соединении, время прохождения соединения также будет случайной величиной. И общее время прохождения маршрута, состоящее из суммы этих случайных величин, тоже имеет случайный характер. Для оценки разброса времени прохождения маршрута и интервала его изменения можно использовать минимаксный подход [5]. Например, если известны интервалы разброса скоростей движения в каждом соединении первого маршрута (табл. 5), причем эти скорости будут иметь бета-распределение с плотностью (2) и характеристиками (4), (5), то такая задача вполне разрешима с использованием методов имитационного моделирования [8].

Таблица 5 — Показатели оптимального маршрута

Соединение	$V_{\min}$ , км/ч	$V_{\max}$ , км/ч	$V_{\text{наиб.вер.}}$ , км/ч	$t_{\max}$	$t_{\min}$	$t_{\text{наиб.вер.}}$
7→2	30	50	40	3 мин 48 с	2 мин 17 с	2 мин 51 с
2→6	20	55	45	6 мин 54 с	2 мин 31 с	3 мин 4 с
6→5	15	55	30	4 мин 48 с	1 мин 19 с	2 мин 24 с
Время на маршрут 7→2→6→5				15 мин 30 с	6 мин 7 с	8 мин 19 с

Интервальные времена, соответствующие минимальной и максимальной скорости на соединениях, приведены в табл. 5. Для использования бета-распределения, кроме  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$ , следует учитывать наиболее вероятные скорости  $V_{\text{наиб.вер.}}$ , получаемые из анализа собранных ранее статистических данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследуется задача выбора оптимального маршрута. При решении предлагается учитывать неполноту информации о скорости движения потока автотранспорта на отдельных участках.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-01-00304.

## Литература

1. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 2 / пер. с англ. М.: Мир, 1973.
2. Ахмадинуров М.М., Завалицин Д.С., Тимофеева Г.А. Математические модели управления транспортными потоками. Екатеринбург: УрГУПС, 2011. 119 с. ISBN 978-5-94614-190-1.
3. Тимофеева Г.А., Завалицин Д.С. Математическая модель регулируемого перекрестка // Транспорт Урала. 2008. № 2. С. 92 — 97. ISSN 1815-9400.
4. Завалицин Д.С., Тимофеева Г.А. Исследование математической модели регулируемого перекрестка // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2009. Т. 15. № 4. С. 108 — 119. ISSN 0134-4889.
5. Куржанский А.Б., Куржанский А.А., Варайя П. Роль макроmodellирования в активном управлении транспортной сетью // Труды МФТИ. 2010. Т. 2. № 4. С. 100 — 118. ISSN 2072-6759.
6. Яндекс.Карты, Яндекс.Пробки. [Электронный ресурс]. URL: <http://probki.yandex.ru> (дата обращения: 27.02.2010).
7. Голенко-Гинзбург Д.И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками. Воронеж: Научная книга, 2010. 284 с. ISBN 978-5-98222-646-4.
8. Вакулина Г.М. Вероятностные модели в оценке инвестиционных проектов // Вестник УрГУПС. 2011. № 1. С. 93 — 100. ISSN 2079-0392.

## References

1. Vagner G. *Osnovy issledovaniya operaciy*. [Bases of operations research] T. 2 / Per. s angl. M.: Mir, 1973.
2. Axmadinurov M.M., Zavalishhin D.S., Timofeeva G.A. *Matematicheskie modeli upravleniya transportnymi potokami*. [Mathematical models of transport flows control] Ekaterinburg: UrGUPS, 2011. 119 s. ISBN 978-5-94614-190-1.
3. Timofeeva G.A., Zavalishhin D.S. *Matematicheskaya model reguliruemogo perekrestka* [Mathematical model of signalized intersection] // *Transport Urala*. 2008. No. 2. S. 92-97. ISSN 1815-9400.
4. Zavalishhin D.S., Timofeeva G.A. *Issledovanie matematicheskoy modeli reguliruemogo perekrestka* [Research of signalized intersection mathematical model] // *Trudy Instituta matematiki i mehaniki UrO RAN*. 2009. T. 15. No. 4. S. 108-119. ISSN 0134-4889.
5. Kurzhanskiy A.B., Kurzhanskiy A.A., Varaya P. *Rol makromodelirovaniya v aktivnom upravlenii transportnoy setyu* [Macromodelling role in transport network active control] // *Trudi MFTI*. 2010. T. 2, No. 4. S. 100-118. ISSN 2072-6759.
6. *Yandex.Maps, Yandex.Jams*. URL: <http://probki.yandex.ru> (date of application: 27.02.2010).
7. Golenko-Ginzburg D.I. *Stokhasticheskie setevye modeli planirovaniya i upravleniya razrabotkami*. [Stochastic network models of planning and development control.] Voronezh: Nauchnaya kniga, 2010. 284 s. ISBN 978-5-98222-646-4.
8. Vakulina G.M. *Veroyatnostnyye modeli v ocnke investitsionnyh projektov* [Probability models in assessment of investment projects] // *Vestnik UrGUPS*. 2011. No. 1. S. 93-100. ISSN 2079-0392.



УДК 519.658:022.846

Дмитрий Сергеевич Бухаров, аспирант Иркутского государственного технического университета, программист Института динамики систем и теории управления СО РАН,  
Александр Леонидович Казаков, доктор физико-математических наук, профессор Иркутского государственного технического университета, главный научный сотрудник Института динамики систем и теории управления СО РАН

## ТРАССИРОВКА НА ЦИФРОВОЙ КАРТЕ: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Dmitry S. Bukharov, Post-graduate student at Irkutsk State Technical University, Programmer at Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS,  
Alexander L. Kazakov, DSc in Physics and Mathematics, Professor at Irkutsk State Technical University, Senior researcher at Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS

### Routing On A Digital Map: Mathematical Model And Numerical Method

#### Аннотация

Предложена математическая модель оптимальной организации коммуникаций, позволяющая учесть специфические особенности региона. Разработан и программно реализован численный метод трассировки, учитывающий дополнительные ограничения на прокладываемый маршрут. Метод применен для решения задачи определения оптимального маршрута высокоскоростной магистрали Иркутск — Красноярск.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, численный метод трассировки, непрерывная оптимизация, комплекс программ, высокоскоростные магистрали.

#### Abstract

A mathematical model of optimal organization of communications which allows to take into account the specific characteristics of the region has been suggested. A numerical method of routing with regard to additional restrictions of the plotted route has been designed and implemented. The developed method is applied to solve the problem of determining the optimal route of Irkutsk-Krasnoyarsk high-speed line.

**Key words:** mathematical modeling, numerical method for routing, continuous optimization, complex of programs, high-speed lines.

Задачи трассировки — класс задач, сохраняющий актуальность до настоящего времени и имеющий большое практическое значение для транспортной отрасли. К таким задачам можно отнести, например, транспортное планирование (определение маршрута передвижения, который обеспечит минимальное время передвижения с учетом скоростных и весовых ограничений), проектирование коммуникационных систем (прокладка каналов связи между коммутационным оборудованием и конечными потребителями с минимальными затратами) и т. д.

Разработано значительное количество методов и алгоритмов трассировки на графах [1 — 6], однако их применение для решения задач маршрутизации нередко осложнено такими факторами, как потеря значительной части информации при дискретизации данных; достаточно большой объем данных (например, хорошо развитая дорожная сеть и множество потребителей), что приводит к трудоемким вычислениям и существенно сказывается на времени решения задачи; проблематичность полного учета различных естественных условий (ландшафт, населенные пункты, различного рода барьеры).

Общим случаем задачи трассировки является определение оптимальной сети маршрутов коммуникаций между несколькими логистическими объектами (например, прокладка дорог, электрических сетей и информационных каналов) [7, 8].

Авторами построена математическая модель оптимальной организации коммуникаций с ограничениями на маршруты на основе аппарата непрерывной оптимизации. Представлен частный случай данной модели — математическая модель определения оптимального маршрута с ограничением на радиус кривизны, разработан численный метод ее исследования. Предложенный метод основан на оптико-геометрическом подходе, базирующемся на фундаментальных вариационных принципах механики [9, 10]. Обзор литературных источников, посвященных применению оптико-геометрического подхода для решения различного рода прикладных задач, представлен в [11].

Разработанный метод применен для решения задачи определения оптимального маршрута высокоскоростной магистрали (ВСМ). Как известно, ВСМ — это железнодорожный транспорт, обеспечивающий движение поездов со скоростью более 200 км/ч на специально построенных железнодорожных линиях, при этом доминирующей в мире стала концепция высокоскоростных железнодорожных магистралей, специализирующихся только на пассажирских перевозках [12]. Строительство ВСМ во многих странах имеет важное народнохозяйственное значение и является одним из эффективных направлений развития мировой транспортной системы. Это в полной мере применимо и к России, особенно с учетом размеров ее территории.

### Задача оптимальной организации коммуникаций с ограничениями на маршруты.

Пусть требуется соединить заданное количество центров (например, складов, электрических станций) маршрутами коммуникаций (дороги, трубопроводы, линии электропередачи и т. п.) так, чтобы суммарные затраты на их прокладку были минимальными. Предполагается, что затраты обусловлены расходом материалов и объемом земляных работ, т. е. определяющее влияние на стоимость прокладки коммуникаций оказывают длина маршрута и географические особенности местности.

Построим математическую модель оптимальной организации коммуникаций. Пусть в ограниченной области  $D \subseteq R^2$  заданы  $m$  точек  $A_k(x_k, y_k) \in D$  ( $k = \overline{1, m}$ ) и кусочно-непрерывная функция  $\gamma \geq f(x, y) \geq 0$ , определенная на  $D$ . Требуется найти оптимальное дерево, связывающее все точки:

$$T(\Gamma_{i,k}) = \min_{\Gamma_{i,k}} \int_{\Gamma_{i,k}} d\Gamma/f(x, y); \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} T(\Gamma_{i,k}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $\Gamma_{i,k} \in G$  ( $k = \overline{1, m}; k \neq i$ ) — непрерывная кривая, соединяющая  $A_i(x_i, y_i)$  и  $A_k(x_k, y_k)$  и доставляющая минимум интегральному функционалу (1);

$G$  — множество непрерывных кривых, соединяющих заданные точки.

Также в задаче (1) — (2) на кривые  $\Gamma_{i,k}$  могут накладываться дополнительные ограничения, например, в виде неравенств  $\Phi_i[x, y, y'(x), y''(x)] \leq L_i, i = \overline{1, l}$ , что необходимо при решении ряда прикладных задач (см. ниже).

С точки зрения логистики  $A_k(x_k, y_k)$  определяют места расположения логистических центров, функция  $f(x, y)$  — «местная» стоимость работ в точке  $(x, y)$ , от которой зависят затраты на прокладку трассы, выражение (1) позволяет рассчитать общие затраты на прокладку пути по маршруту  $\Gamma_{i,k}$ .

Частный случай описанной задачи — определение прокладки маршрута между двумя логистическими центрами, что имеет существенное прикладное значение, например, при строительстве автомобильных дорог и железнодорожных

путей. При трассировке следует учитывать радиус кривизны пути, при котором сохранялась бы необходимая плавность поворотов и предписанный скоростной режим, поэтому в математическую модель требуется ввести ограничение на радиус кривизны маршрута.

Необходимость учета радиуса кривизны трассы приводит к постановке задачи в трехмерном пространстве. Пусть в некоторой ограниченной области  $D \subseteq R^2$  с кусочно-гладкой границей заданы точки  $A(x_1, y_1, z_1) \in D, B(x_2, y_2, z_2) \in D, z = f(x, y)$ , где функция  $f(x, y)$  характеризует рельеф местности. Требуется определить кривую  $\Gamma^* \in G$ , соединяющую точки  $A$  и  $B$ ,

$$\Gamma^* = \arg \min_{\Gamma} \int_{\Gamma} d\Gamma/f(x, y), \quad (3)$$

где  $\Gamma \in G$  — кривая, соединяющая точки  $A$  и  $B$ .

На радиус кривизны  $R$  и радиус кривизны в вертикальном профиле  $R_v$  кривой  $\Gamma$  накладываются ограничения. Пусть  $\Gamma$  задана параметрически:  $x = x(s), y = y(s), z = f[x(s), y(s)] = z(s)$ . Тогда ограничения имеют вид [13]:

$$R = \sqrt{\frac{([x'(s)]^2 + [y'(s)]^2 + [z'(s)]^2)^3}{[u_1(s)]^2 + [u_2(s)]^2 + [u_3(s)]^2}} \geq C, \quad (4)$$

$$R_v = \frac{\sqrt{(1 + [z'(s)]^2)^3}}{|z''(s)|} \geq C_v,$$

где  $s$  — вещественный параметр (можно использовать любую параметризацию);

$$u_1 = x'(s)y''(s) - x''(s)y'(s), u_2 = x'(s)z''(s) - x''(s)z'(s),$$

$$u_3 = z'(s)y''(s) - z''(s)y'(s);$$

$C$  — минимальный разрешенный радиус кривизны маршрута;

$C_v$  — минимальный разрешенный радиус кривизны в вертикальном профиле (ограничение на перепад высот).

Ниже представлен метод построения кривой (3), который является развитием подхода, предложенного в работе [14]. Особенностью его является возможность учета ограничения (4), в том числе на местности с рельефом, что достигается за счет применения оптико-геометрического подхода.

### Метод трассировки

Оптико-геометрический подход основан на том, что с точки зрения геометрической оптики выражение (3) определяет время, за которое свет, выпущенный из точки  $A$ , достигает точки  $B$ , двигаясь в оптически неоднородной среде с местной скоростью  $f(x, y)$ . Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка, которой достигает фронт волны, становится самостоятельным источником света. Таким образом, выпустив световую волну из точки  $A$ , можно построить фронты волн и зафиксировать момент времени, когда волна достигнет точки  $B$ .

На рис. 1 представлен алгоритм, который позволяет зафиксировать множество точек, образующих фронт волны в конкретный момент времени, и определить на  $k$ -м шаге такую

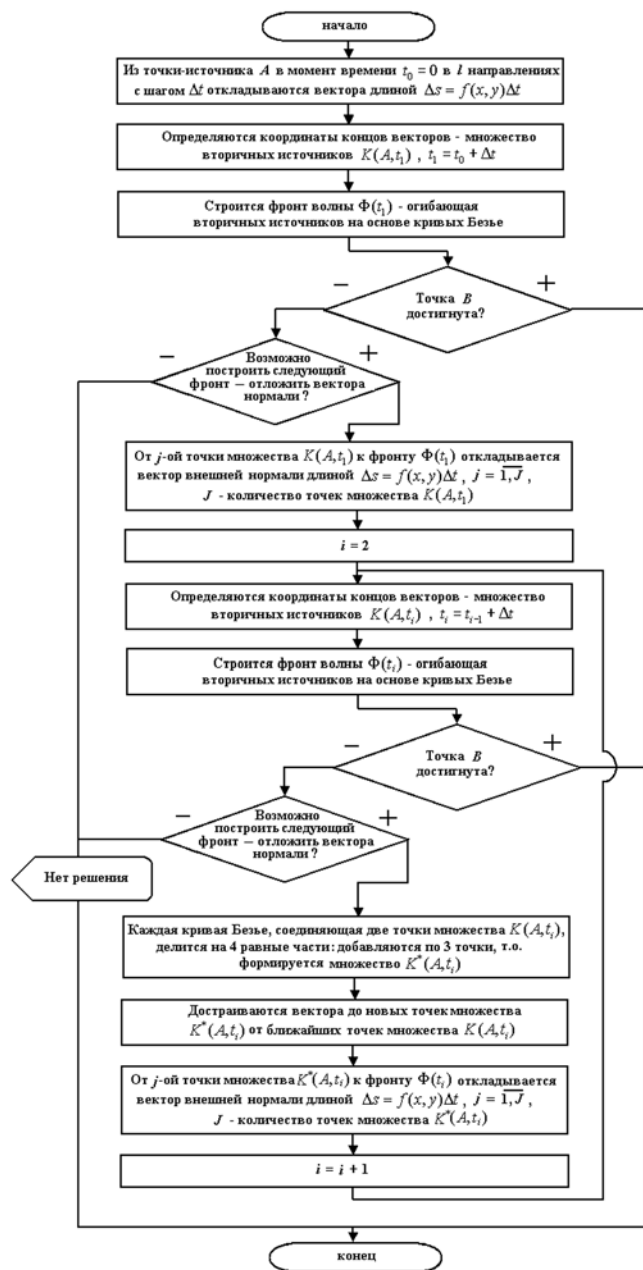


Рисунок 1 — Алгоритм построения фронтов волны

точку фронта  $\Phi(t_k)$ , которая наиболее близко расположена к конечной точке  $B$ .

Поскольку, согласно принципу Ферма, луч света в своем движении выбирает маршрут, минимизирующий оптическую длину пути, можно, двигаясь в обратном направлении по времени от фронта к фронту, приближенно восстановить траекторию, которая и будет искомым кривой  $\Gamma^*$ .

Представленный на рис. 2 алгоритм построения оптимального маршрута за конечное число шагов позволяет приближенно построить экстремаль (3), если, конечно, она существу-

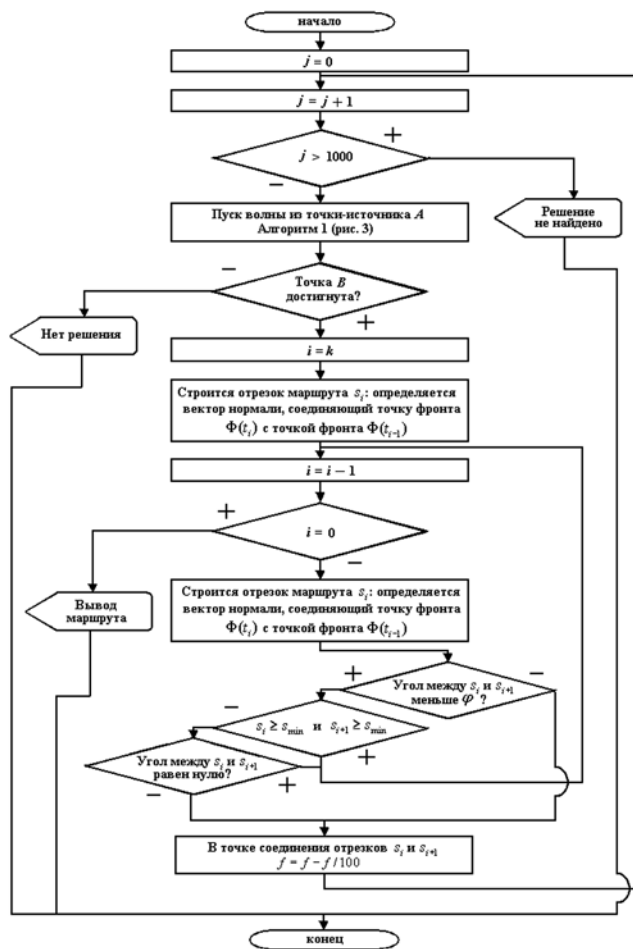


Рисунок 2 — Алгоритм построения кривой

ет. В противном случае также за конечное число шагов мы убедимся в том, что задача решения не имеет.

Разработанный алгоритм является обобщением волнового алгоритма Ли [15], позволяющим, в отличие от последнего, строить фронты волны в среде с переменной проницаемостью, учитывая при этом как частично, так и полностью непроходимые для световой волны области, а также ограничения на кривизну (4) определяемой кривой (3).

### Программный комплекс «ВИГОЛТ»

Разработанный авторами метод определения оптимального маршрута реализован в рамках программного комплекса «ВИГОЛТ» [11, 16], интерфейс которого представлен на рис. 3.

Программный комплекс применяется для решения как модельных, так и прикладных задач маршрутизации (трассировки), в частности, решена задача определения оптимального маршрута высокоскоростной магистрали (ВСМ) Иркутск — Красноярск.

В качестве исходной информации приняты данные топографической карты, однако оцифровка такой карты — дело

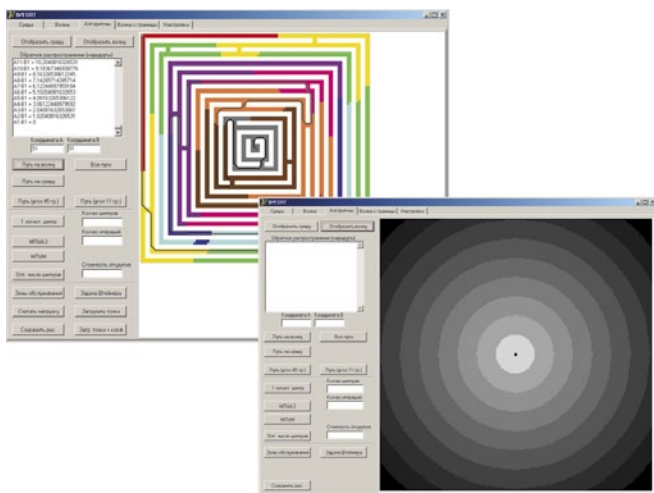


Рисунок 3 — Интерфейс программного комплекса «ВИГОЛТ»

весьма трудоемкое, поэтому была выполнена интеграция комплекса «ВИГОЛТ» с географической информационной системой (ГИС) Territor (ООО «Системы обработки информации», Иркутск).

Особенностью ГИС Territor является формат хранения данных о высоте над уровнем моря в виде линий уровня: совокупность географических координат прикреплена к определенному значению высоты над уровнем моря (рис. 4). В то время как для проведения корректных вычислений в комплексе «ВИГОЛТ» необходима сеточная организация данных: задание значения высоты над уровнем моря в конкретной географической координате.



Рисунок 4 — Линии высоты над уровнем моря

В связи с этим потребовалась разработка специального алгоритма, позволяющего проводить преобразование формата хранения данных ГИС Territor в формат хранения данных программного комплекса «ВИГОЛТ».

Для определения высоты над уровнем моря  $h_C$  (рис. 5) в точке  $C(x_2, y_2)$  выполняются следующие операции.

1. Определяется высота в точках ближайших линий уровня:  $A(x_1, y_1)$  ( $h_1 = 250$ ),  $B(x_3, y_3)$  ( $h_2 = 200$ ).
2. Вычисляется длина отрезка  $AC$  и  $CB$ :

$$AC = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2};$$

$$CB = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}.$$

3. Вычисляется высота над уровнем моря  $h_C$  в точке  $C(x_2, y_2)$

$$h_C = \frac{(h_1 - h_2)(AC + CB)}{CB} + h_2.$$

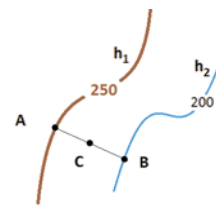


Рисунок 5 — Определение высоты над уровнем моря в точке

Информация о высоте над уровнем моря необходима для того, чтобы учесть ограничение на допустимый перепад высот на заданной местности.

Интеграция с ГИС Territor позволила решить проблему оцифровки топографических карт и провести вычислительный эксперимент без предварительной подготовки необходимых данных (расположение сети дорог, населенных пунктов, водоемов, высоты над уровнем моря), что, в свою очередь, существенно увеличивает гибкость разрабатываемого алгоритма программно-математического и алгоритмического обеспечения.

#### Участок маршрута ВСМ Иркутск — Красноярск

При низкой доле ВСМ в общей протяженности магистральных железных дорог (0,8%) объем выполняемой ими пассажирской работы в мире превысил 7,5% [17] от общего объема пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте. Это свидетельствует о высокой конкурентоспособности и востребованности ВСМ, которые, с одной стороны, в полном объеме отвечают требованиям современной глобальной экономики, а с другой — ведут к положительным эффектам масштаба и роста региональных экономик.

Приводимые ниже расчеты основаны на директиве 96/48/ЕС и техническом регламенте о безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта [18]. Директива 96/48/ЕС действует с середины 1990-х годов в пределах трансъевропейской высокоскоростной железнодорожной сети, именно она определила «Технические требования по эксплуатационной совместимости» (TSI). В этом документе содержатся основные требования к подвижному составу и высокоскоростным железным дорогам, входящим в трансъевропейскую сеть (TEN), и гарантируется свободное обращение таких поездов на высокоскоростной сети. С целью достижения эксплуатационной совместимости в TSI определен ряд базовых параметров, таких как габариты пути и искусственных сооружений, максимальная нагрузка на путь, параметры электроснабжения, сигнализация и управление движением поездов, предельные допустимые параметры, относящиеся к безопасности движения.

Посредством программного комплекса «ВИГОЛТ» проведены численные расчеты для участка высокоскоростной магистрали, соединяющего Иркутск и Красноярск. На рис. 6 красной линией показан участок маршрута ВСМ до границы Иркутской области. В качестве исходных данных

использовалась следующая информация: высота над уровнем моря для каждой точки местности, допустимый перепад высот (не более 10 м на 1 км), ограничение на радиус кривизны ( $C=4$  км), расположение речной сети, сети дорог. Кроме того, предполагается, что в точках расположения населенных пунктов, озер, болот  $f(x,y)=0$  (непроходимая область).

Как видно из рис. 6, маршрут ВСМ обладает большей гладкостью, чем маршрут существующей железной дороги (черная линия). При построении маршрута соблюдены необходимые ограничения, исключение составляют два участка на местности (переход через горный хребет), отмеченные пунктирной рамкой. В данных местах потребуется строительство туннелей.

Представленные на рис. 6 изображения построены в ГИС Territor.

### Заключение

Описана математическая модель оптимальной организации коммуникаций с ограничениями на маршруты на основе аппарата непрерывной оптимизации. Разработан метод исследования построенной модели, являющийся обобщением известного волнового алгоритма Ли. Выполнена реализация в рамках программного комплекса «ВИГОЛТ».

Разработанный метод применен для решения задачи определения маршрута высокоскоростной железнодорожной магистрали Иркутск — Красноярск с учетом спец-

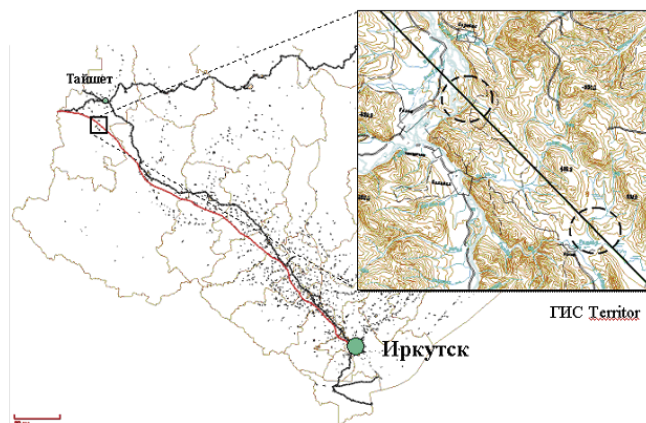


Рисунок 6 — Участок маршрута ВСМ Иркутск — Красноярск

ифических особенностей: плавности поворотов, высоты над уровнем моря, допустимого перепада высот, расположения дорожной сети, рек, озер, болот и населенных пунктов.

Для обеспечения возможности получения топографических данных, необходимых для проведения вычислительного эксперимента, выполнена интеграция программного комплекса «ВИГОЛТ» с географической информационной системой Territor.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 13-06-00653, 12-07-13116\_офи\_м\_РЖД, 11-07-00245.

## Литература

1. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. М. : Вильямс, 2005. 1296 с.
2. Гудман С., Хидетниемеи С. Введение в разработку и анализ алгоритмов. М. : Мир, 1981. 368 с.
3. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Курейчик В.М. Применение графов для проектирования дискретных устройств. М. : Наука, 1974. 304 с.
4. Чеблоков И.Б., Ченцов А.Г. Об одной задаче маршрутизации с внутренними работами // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2012. Вып. 1. С. 96 — 119.
5. Гимади Э.Х., Глазков Ю.В., Глебов А.Н. Алгоритмы приближенного решения задачи о двух коммивояжерах в полном графе с весами ребер 1 и 2 // Дискретный анализ и исследование операций. 2007. №. 2. С. 41 — 61.
6. Лозовану Д.Д., Трубин В.А. Задача о минимаксном пути в сети и алгоритм ее решения // Дискретная математика. 1994. Вып. 2. С. 138 — 144.
7. Hwang F.K., Richards D.S., Winter P. The Steiner tree problem. Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V. 1992. 352 p.
8. Mitsuo G., Runwei C., Lin L. Network models and optimization: Multiobjective genetic algorithm approach. London : Springer, 2008. 692 p.
9. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики. М. : Мир, 1965. 408 с.
10. Ланцош К. Вариационные принципы механики. М. : Физматгиз, 1965. 408 с.
11. Бухаров Д.С., Казаков А.Л. Программная система «ВИГОЛТ» для решения задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике // Вычислительные методы и программирование. 2012. Раздел 2. С. 65 — 74 [Электронный ресурс]. URL: <http://num-meth.srcc.msu.ru/>.
12. Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт. В прошлом, настоящем и будущем. Т. 1 / под общ. ред. В.И. Ковалева. СПб.: Издательство ПГУПС, 2001. 319 с.
13. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. М. : Наука, 1974. 176 с.
14. Журавская М.А., Казаков А.Л., Лемперт А.А., Бухаров Д.С. О методе решения задачи оптимальной прокладки высокоскоростных железнодорожных магистралей с учетом региональных особенностей // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 2. С. 41 — 44.
15. Деньдобренко Б.Н., Малика А.С. Автоматизация конструирования РЭА : учебник для вузов. М. : Высшая школа, 1980. 384 с.
16. Бухаров Д.С., Казаков А.Л., Лемперт А.А. Программная система «ВИГОЛТ» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013613246. М. : Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2013.
17. Киселев И.П. Первая высокоскоростная магистраль [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hsrail.ru/information/articles/27.html> (дата обращения 21.06.2011).
18. Об утверждении технического регламента о безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта // Постановление Правительства РФ № 533 от 15.07.2010.

## References

1. Corman T., Leiserson C., Rivest R., Stein K. *Algoritmy: postroyeniye i analiz*. [Algorithms: Construction and Analysis]. M. Williams, 2005. 1296 p.
2. Goodman S., Hidetniemi S., *Vvedeniye v razrabotky I analiz algoritmov*. [Introduction to the Design and Analysis of Algorithms]. Moscow: Mir, 1981, 368 p.
3. Melikhov A.N., Bernstein L.S., Kureichik V.M. *Primeneniye grafov dlya proyektirovaniya diskretnikh ustroystv* [The Use of Graphs for Discrete Devices Design]. Moscow: Nauka, 1974, 304 p.
4. Cheblovok I.B., Chentsov A.G. *Ob odnoy zadache marshrutizatsii s vnutrennimi rabotami* [On a Routing Problem with the Inside Work.] // *Vestnik udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Computernye nauki*, 2012. Ed. 1. p. 96-119.
5. Gimadi E.H., Glazkov J.V., Glebov A.N. *Algoritmi priblizhennogo resheniya zadachi o dvykh kommivoyazherakh v polnom grafe s vesami reber 1 i 2* [Algorithms for the Approximate Answer of the Problem of the Two Travelling Salesmen in a Complete Graph with Edge Weights 1 and 2] // *Diskretniy analiz I issledovaniye operatsiy*. 2007. №. 2. p. 41-61.
6. Lozovanu D.D., Trubin V.A. *Zadacha o minimaksnom puti v seti i algoritm ee resheniya* [The Problem of Minimax Path in the Network and the Algorithm for its Solution] // *Discretnaya matematika*, 1994., Ed.2. p. 138-144.
7. Hwang F.K., Richards D.S., Winter P. *The Steiner tree problem*. Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V. 1992. 352 p.
8. Mitsuo G., Runwei C., Lin L. *Network models and optimization: Multiobjective genetic algorithm approach*. London : Springer, 2008. 692 p.
9. Courant R., Hilbert D., *Metody matematicheskoy fiziki* [Methods of Mathematical Physics]. Moscow: Mir, 1965. 408 p.
10. Lanczosh C. *Variatsionniye printsipy mekhaniki* [The Variational Principles of Mechanics], Moscow: Fizmatgiz, 1965, 408 p.
11. Bukharov D.S., Kazakov A.L. *Programmnaya sistema "VIGOLT" dlya resheniya zadach optimizatsii, voznikayshikh v transportnoy logistike* [The Software System "VIGOLT" for Solving Optimization Problems Arising in Transport Logistics] // *Vichislitelniye metodi and programmirovaniye*, 2012, Section 2. p. 65-74 (<http://num-meth.srcc.msu.ru/>).
12. *Skorostnoy I visokoskorostnoy zheleznodorozhniy transport. V proshlom, nastoyashem I bydeshem* [Rapid and High-speed Railway Transport. In Past, Present and Future. V.1.]/ Under the editorship of Kovalev V.I. St. Petersburg.: Publishing PGUPS, 2001. 319.
13. Pogorelov A.V. *Differentsialnaya geometriya* [Differential Geometry.] Moscow: Nauka, 1974. 176 p.
14. Zhuravskaya M.A., Kazakov A.L., Lempert A.A., Bukharov D.S. [On a Method of Solving the Problem of Optimal Installation of High-speed Railway Lines with Regard to the Regional Characteristics] // *Transport: nauka, technologya, upravleniye*, 2012. №2. p. 41-44.
15. Dendobrenko B.N., Malika A.S. *Avtomatizatsiya konstruirovaniya REAL uchebnik dlya vuzov* [Automating Design of REE: Textbook for high schools]. Moscow: Visshaya shkola, 1980, 384 p.
16. Bukharov D.S., Kazakov A.L., Lempert A.A. *Programmnaya sistema "VIGOLT"* [The Software System "VIGOLT"] // *Sertifikat o gosudarstvennoy registratsii programmi dlya EVM №2013613246*. Moscow: Federalnaya sluzhba po intellektualnoj sobstvennosti (Rospatent), 2013.
17. Kiselev I.P. *Pervaya visokoskorostnaya magistral*[The First High-speed Line [Web resource]] // February 2011. URL: <http://www.hsrail.ru/information/articles/27.html> (date of accessed 21/06/2011).
18. *Ob utverzhdenii tekhnicheskogo reglamenta o bezopasnosti visokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta* [On Approval of Technical Rules on Safety of High-speed Railway Transport] // *Postanovleniye previlstva* ot 15.07.2010, № 533.

УДК 656.212

**Илья Александрович Назипов**, аспирант кафедры «Строительные конструкции и строительное производство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), начальник Свердловской дистанции гражданских сооружений Свердловской дирекции инфраструктуры — филиала Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД», Екатеринбург

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ СТАНЦИЙ НА МАЛОДЕЯТЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ СВЕРДЛОВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

**Il'ya A. Nazipov**, Head of the Sverdlovsk division of civil works of the Sverdlovsk infrastructure administration – branch of the Central Directorate of infrastructure – branch of OJSC “Russian Railways,” Postgraduate, «Building Structures and Building Industry» Department, Urals State University of Railway Transport (USURT)

### Sverdlovsk Railway Low-Density Sections Stations Facilities Upgrading

#### Аннотация

Анализ рациональности использования объектов станций на малодеятельных участках выявил значительные резервы для оптимизации эксплуатационных расходов, улучшения качества эксплуатации и повышения энергоэффективности данных объектов. Оценка практического использования аналогичных решений позволяет утверждать, что применение интеллектуальных модульных систем на отдельных участках Свердловской железной дороги соответствует технологии производства работ, оправдано экономически и климатически. Большое разнообразие технологических решений по модульным системам максимально адаптирует их под конкретные требования станций и повышает уровень защищенности объектов. Экономическая эффективность применения данных технологических решений инвестиционно привлекательна.

**Ключевые слова:** содержание инфраструктуры, производственные площади, энергоэффективность зданий, малодеятельные станции, интеллектуальные модульные системы.

#### Abstract

The performed analysis of low-density sections stations facilities efficiency revealed considerable provisions for operating costs optimization, service quality improvement and energy efficiency of these facilities. Evaluation of practical application of similar decisions suggests that the use of smart modular systems in some sections of the Sverdlovsk Railway complies with the works technology, being economically and climatically justified. Wide range of solutions for modular systems provides for their adapting to the specific stations' requirements and increases the level of facilities protection. The economic efficiency of these technological solutions is investment- attractive.

**Key words:** infrastructure maintenance; use of operating areas; energy performance of building; low-density stations; smart modular systems.

**Х**озяйство гражданских сооружений — инфраструктурная система жизнеобеспечения перевозочного процесса и стабильного функционирования ОАО «РЖД». Реорганизация данного хозяйства должна способствовать достижению целей повышения эффективности ОАО «РЖД», определенных Стратегической программой развития до 2030 г.

В марте 2008 г. утверждена концепция реорганизации и развития хозяйства гражданских сооружений, водоснабжения и водоотведения до 2010 г. и на период до 2015 г. В соответствии с этим документом и с учетом концепции системы управления компании холдингового типа, образуемой в результате реформирования ОАО «РЖД», необходимо определить эффективные подходы в системе содержания и управления объектами недвижимости ОАО «РЖД». От своевременности проведения этой работы зависит качество содержания объектов инфраструктуры.

Одним из способов эффективного и рационального управления объектами недвижимости на Свердловской железной дороге является модернизация объектов недвижимого имущества малодеятельных станций, что впоследствии позволит без увеличения эксплуатационных расходов улучшить качество их содержания, технического обслуживания и ремонта.

Станции на малодеятельных участках (участки с размерами движения пассажирских и грузовых поездов по графику не более 8 пар в сутки, согласно правилам технической эксплуатации железных дорог РФ) характеризуются малым пассажиропотоком и объемом грузовой работы. Доля малодеятельных станций на Свердловской дистанции гражданских сооружений составляет 18,5% от общего количества станций. Практически все объекты малодеятельных станций состоят из служебно-технических зданий постройки середины прошлого века. Это в основном деревянные здания с печным отоплением, физически и морально устаревшие и не отвечающие современным требованиям, предъявляемым к сооружениям инфраструктуры.

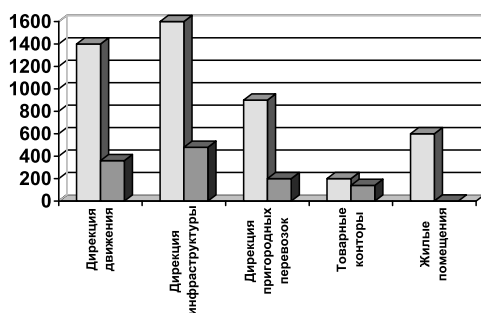
Эффективность управления и качество содержания недвижимого имущества при дальнейшей эксплуатации таких объектов снижают следующие факторы.

1. Нерациональное использование производственных площадей смежными структурами вследствие морально устаревшей планировки зданий и технологии, наличие неэксплуатированных помещений.

2. Неоправданно высокие затраты на энергоносители из-за большого строительного объема, отсутствия энергосберегающих технологий и физического износа ограждающих конструкций, не отвечающих современным строительным нормам и правилам.

3. Наличие в зданиях помещений, используемых под жилой фонд, что приводит к риску возникновения чрезвычайных ситуаций (пожаров) и несоблюдению режимности объекта.

Пример такого нерационального использования производственных площадей дает сравнительный анализ имеющихся и необходимых площадей в служебно-технических зданиях малодеятельных станций (рис. 1).



□ Имеющиеся площади 4700 кв.м ■ Необходимые площади 1180 кв.м

**Рисунок 1** — Сравнительный анализ имеющихся и необходимых площадей

Имеющиеся на малодеятельных станциях площади почти в 4 раза превышают необходимые по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, что влечет за собой необоснованное превышение эксплуатационных расходов.

Свердловской дистанцией гражданских сооружений в соответствии со СНиП 23-02-2003 сделан расчет теплопотерь через наружные ограждающие конструкции существующих типовых объектов станций на малодеятельных участках. При затратах на отопление здания 56416,73 кВт/год теплопотери составляют до 20241,1 кВт/год. На основании расчетов можно сделать вывод, что теплопотери через существующие ограждающие конструкции доходят до 35% от затраченной на отопление здания энергии. Это подтверждает и обследование зданий, выполненное методом тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций в соответствии с ГОСТ 26629-85. В 2012 г. в Сургутском регионе проведено комплексное обследование существующих модулей на станциях Тугуньям, Обский и 502 км. Исходя из результатов обследования, проведенных в соответствии с ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» и включающего изучение степени эксплуатационной пригодности несущих строительных конструкции и здания в целом, а также грунтов их основания, категории технического состояния, установленная в зависимости от доли снижения несущей способности и эксплуатационных характеристик,

определена как работоспособное техническое состояние. Это категория технического состояния, при которой некоторые из оцениваемых контролируемых параметров не отвечают требованиям проекта или норм, но имеющиеся нарушения в конкретных условиях эксплуатации не приводят к утрате работоспособности, а необходимая несущая способность конструкций и грунтов основания с учетом влияния имеющихся дефектов и повреждений обеспечивается. По результатам проведенной работы составлено заключение о комплексном обследовании технического состояния блок-модуля станции Тугуньям, а также паспорт здания и энергетический паспорт, где определен класс С энергетической эффективности.

В настоящее время одна из приоритетных задач, стоящих перед государством, — это обеспечение эффективного расходования всех видов энергии, вырабатываемой на территории Российской Федерации. Для реализации данного направления постановлением правительства принят Федеральный закон № 261 от 23.11.09 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности». С целью достижения классов А и В СНиП 23-02-2003 рекомендует администрация субъектов Федерации принимать меры по экономическому стимулированию участников проектирования и строительства, а также меры технического характера для повышения энергетической эффективности здания.

Есть ли альтернатива морально и физически устаревшим служебно-техническим зданиям?

Одним из вариантов решения этой проблемы может быть замена устаревших объектов на интеллектуальные модульные системы. Такие системы представляют собой блок-модули с энергетической эффективностью класса А, изготовленные в заводских условиях и укомплектованные всеми необходимыми автономными и автоматическими системами жизнеобеспечения. Преимущества данных модульных систем перед существующими служебно-техническими зданиями заключаются в следующем.

- Изготовление в заводских условиях, укрупненный монтаж, следовательно, низкая себестоимость изготовления и монтажа 1 м<sup>2</sup>, сжатые сроки установки.
- Применение интеллектуальных и энергосберегающих технологий, автономных систем жизнеобеспечения, селективности блоков, следовательно, низкие эксплуатационные расходы, прозрачность учета.
- Высокая унификация объектов, а значит, возможность быстрого подбора конфигурации объекта под технологический процесс.
- Мобильность, т. е. возможность быстрого подбора конфигурации станции, отсутствие необходимости регистрации объекта как недвижимого имущества и возможность перемещения.
- Высокая защищенность объектов от внешнего проникновения и повреждения третьими лицами (рольставни, сейф-двери, металлическая обшивка модуля).
- Технологии заводского производства, обеспечивающие соблюдение современных требований энергоэффективности и возможность энергетического обследования отдельных конструктивных элементов и готового модуля в целом.



К недостаткам таких систем можно отнести низкую архитектурную выразительность и однотипность объектов. Однако современные дизайнерские решения способны минимизировать этот недостаток.

Предварительный расчет экономического эффекта от внедрения модульных систем на малодеятельных станциях показал следующее:

- эксплуатационные расходы по малодеятельным станциям за 2012 г. (20 станций, площадь объектов 4700 м<sup>2</sup>) составили 11439 тыс. руб.;
- расходы на демонтаж существующих объектов составят 5640 тыс. руб. (сумма определена на основании сметных расчетов и работ по разборке зданий и сооружений, выполненных дистанцией в 2012 г.);
- расходы на приобретение и монтаж интеллектуальных блок-модулей составят 35872 тыс. руб. Необходимая площадь для обеспечения технологического процесса по малодеятельным станциям равна 1180 м<sup>2</sup> (в среднем 60 м<sup>2</sup> на станцию);
- ожидаемые эксплуатационные расходы по малодеятельным станциям после установки блок-модулей за год (20 станций, площадь объектов 1180 м<sup>2</sup>) составят 4766 тыс. руб.;
- экономия эксплуатационных расходов по малодеятельным станциям после монтажа блок-модулей составит 6673 тыс. руб./год.

Таким образом, окупаемость проекта с учетом демонтажа существующих сооружений составит 6,2 года. На седьмом году чистый доход проекта составит 5201 тыс. руб. Чистый доход от проекта с учетом дисконтирования экономии эксплуатационных расходов на восьмом году составит 761 тыс. руб.

Экспресс-оценка технического состояния существующих объектов на малодеятельных участках Свердловской желез-

ной дороги требует незамедлительных мер по их модернизации. Внедрение инновационных систем, таких как интеллектуальные модульные системы, позволит холдингу ОАО «РЖД» выйти на новый виток управления объектами недвижимости и их содержания в соответствии с современными требованиями экономики. В сложной системе централизации управления это позволит значительно снизить эксплуатационные расходы, повысить прозрачность формирования затрат и реакцию на постоянно изменяющиеся требования экономического пространства. Такой принцип модернизации актуален не только для малодеятельных станций. Технологии энергосбережения и автономных систем жизнеобеспечения неминуемо получат широкое применение в общей системе управления объектами недвижимости ОАО «РЖД» и их содержания.

### Выводы

1. Практически все объекты малодеятельных станций не отвечают современным требованиям, предъявляемым к сооружениям инфраструктуры. Это вызывает необходимость незамедлительных мер по их модернизации.

2. Проведенное в соответствии с ГОСТ Р 53778-2010 и СНиП 23-02-2003 комплексное обследование объектов подтверждает низкую энергоэффективность существующих зданий и сооружений.

3. Одним из вариантов решения может быть замена устаревших объектов на интеллектуальные модульные системы с энергетической эффективностью класса А (в соответствии с Федеральным законом № 261-ФЗ от 23.11.09 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности»), укомплектованные всеми необходимыми автономными и автоматическими системами жизнеобеспечения.

УДК 656.212.2.073.22

Хабидулла Туранович Туранов, доктор технических наук, профессор кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
 Елена Дмитриевна Псеровская, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск

## РАСЧЕТ ПРОДОЛЬНОГО СДВИГА ГРУЗА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ И УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ КРЕПЛЕНИЯ ПРИ ВАРИАЦИИ КОЛИЧЕСТВА КРЕПЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Khabibulla T. Turanov, DSc in Engineering, Professor, "Stations, Junctions and Freight Work" Department, USURT (Ekaterinburg)

Elena D. Pserovskaya, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the "Logistics, Commercial Work and Rolling Stock" Department, USURT (Novosibirsk)

## Calculation Of Cylindrical Freight Longitudinal Shift And Fastening Elements Traction With Variation Of Fasteners Quantity

### Аннотация

В статье впервые представлены результаты вычисления сдвига груза вдоль вагона, удлинения и усилия в гибких элементах крепления при вариации количества крепежных элементов (гвоздь). Отмечено, что при вариации количества крепежных элементов в сторону его увеличения снижается величина удерживающей силы. Уменьшение этой силы также происходит из-за увеличения силы трения от перпендикулярно расположенных к продольной оси вагона гибких элементов крепления (обвязки). По этой причине снижается значение продольной силы, воспринимаемой гибкими и упорными элементами крепления. Результатами расчетов доказано, что перпендикулярно расположенные к продольной оси вагона гибкие элементы крепления оказывают заметное влияние на величину силы трения по продольной оси вагона. Соответственно увеличивается значение удерживающей силы. Построены графические зависимости удлинения и усилия в каждом гибком элементе крепления при вариации количества крепежных элементов. Результаты построенных графических зависимостей позволили установить то минимальное количество крепежных элементов, при котором появляются возможности обеспечить их гарантированную прочность без разрушения.

**Ключевые слова:** груз цилиндрической формы, упругие элементы крепления с произвольной геометрией, упорные элементы крепления, сила трения от усилия перпендикулярно расположенных к продольной оси вагона элементов крепления, вариация количества крепежных элементов (гвоздь).

### Abstract

This paper for the first time presents the results of calculation of freight shift along the freight car, elongation and traction in the flexible fastening elements with variation of fasteners (nails) quantity. It is noted that the upward variation in the number of fasteners leads to the holding force decrease. This force decrease is also due to increase of the friction force from flexible fastening elements (binding) perpendicular to the freight car longitudinal axis. For this reason, the longitudinal force value perceived by flexible and thrust fastening elements decreases. Calculation results proved that flexible fastening elements perpendicular to the longitudinal axis of the freight car have a significant impact on the value of the friction force along the longitudinal axis of the freight car. The holding force increases in accordance with this value. The elongation and traction graphs have been constructed for each flexible fastening element with variation of fasteners quantity. The comparison of elongation of each of the flexible fastening element was carried out calculated with variation of fasteners quantity with tolerance values. Results of the plots constructed allowed to establish the minimum quantity of fasteners providing for opportunities to ensure their guaranteed durability without breaking.

**Key words:** cylindrical freight, elastic fastening elements with random geometry, thrust fastening elements, friction force on the traction of flexible fastening elements perpendicular to the longitudinal axis of the freight car, variation of fasteners (nails) quantity.

### Актуальность темы

Особо отметим, что вместо научно несостоятельных методик ТУ [1] в [2 — 10] разработаны новые методики инженерного расчета упругих элементов крепления груза при отсутствии и наличии упорных элементов при воздействии продольных и поперечных сил в условиях движения подвижного состава по прямому участку пути. Причем в [9] приведены конкретные примеры инженерных расчетов против продольного сдвига по предложенным в [8, 10] новым методикам.

Общеизвестно, что количество гибких элементов крепления груза интуитивно выбирают в зависимости от силы тяжести груза, а количество упорных деревянных брусков и соответственно количество крепежных элементов (гвоздь)<sup>1</sup> подбирают произвольно в зависимости от очертания груза и полезной площади пола вагона. По выбранному значению количества крепежных элементов на основе формулы (46) приложения 14 к СМГС [1] находят величину реакции упорных брусков.

К сожалению, до настоящего времени отсутствует научно обоснованный выбор количества крепежных элементов, при котором будет обеспечена гарантированная прочность гибких элементов крепления груза даже по новой методике [8, 10].

Исходя из этого можно отметить, что конкретный пример инженерного расчета сдвига груза вдоль вагона, удлинения и усилия в гибких элементах крепления и нахождение такого числа крепежных элементов, при котором будет обеспечена гарантированная прочность гибких элементов, способом вариации количества крепежных элементов по новой методике [8, 10] является актуальной для транспортной науки технической проблемой.

### Формулировка задачи

Доказать на конкретном примере расчета по новой методике возможность управления (прогнозирования) процессом проведения инженерного расчета сдвига груза вдоль вагона при наличии перпендикулярно расположенных к продольной оси вагона элементов крепления (обвязки). Доказать возможность нахождения такого количества крепежных элементов, при котором будет обеспечена гарантированная прочность гибких элементов крепления, способом вариации количества крепежных элементов.

*Условия задачи.* Условия проведения расчетов такие же, как и в [9].

*Пример расчета.* Для крепления твердотельных грузов различной конфигурации (например, сушильного барабана) на открытом подвижном составе (далее — на вагоне) в практике перевозки часто используются перпендикулярно расположенные к продольной оси вагона гибкие элементы крепления (обвязки) (рис. 1).

Анализ реальной схемы размещения и крепления груза силой тяжести  $G = 200$  кН, представленной на рис. 1, показывает, что груз удерживается распорными 5 и упорными 6, 7 брусками в сочетании с двумя парами гибких элементов крепления (растяжка) в виде 1, 1а, 2, 2а и 1р, 1ар, 2р, 2ар как

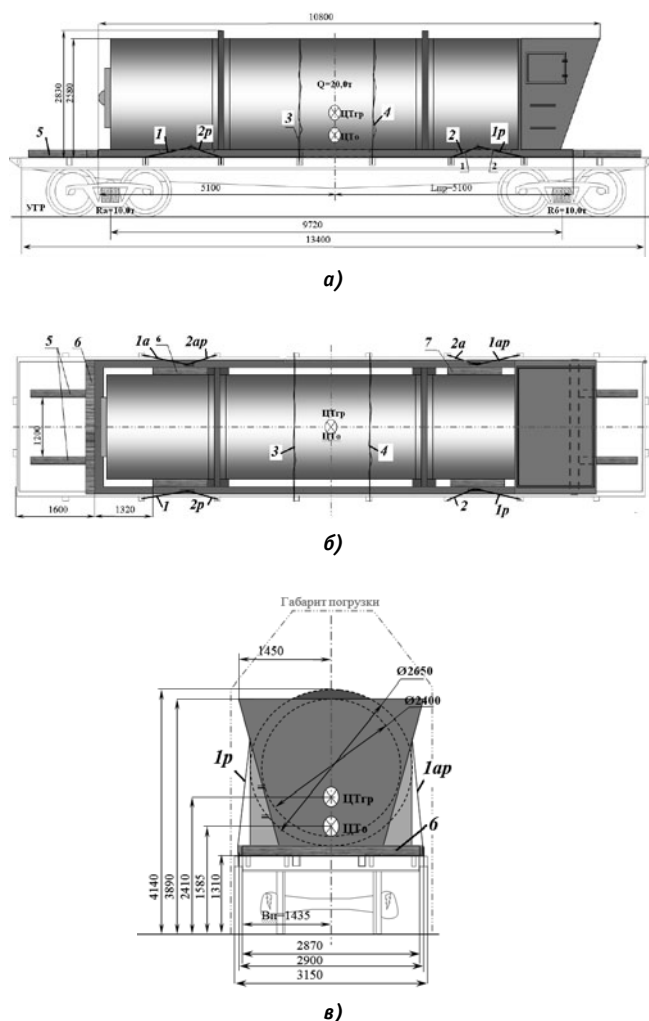


Рисунок 1 — Реальная схема размещения и крепления груза на вагоне совместно с упругими и упорными средствами крепления: 1 — 3 и 1р — 3р — упругие элементы крепления одного направления (1а — 3а и 1ар — 3ар — другого направления); 3 и 4 — перпендикулярно расположенные к продольной оси элементы крепления; 5 — распорные брусочки; 6 и 7 — упорные брусочки; а — главный вид; б — вид сверху; в — вид сбоку

одного, так и другого направления, а также двумя перпендикулярно расположенными к продольной оси вагона гибкими элементами 3 и 4 (обвязки).

### Определение физико-геометрических параметров крепления груза

1. Параметры гибких элементов крепления (задаваемые и принимаемые из чертежа груза величины).

1.1. Физические и геометрические параметры упругих элементов крепления (как и в [8 — 10]):

$E = 1 \cdot 10^7$  — модуль упругости упругих элементов крепления с учетом скрутки проволоки, кН/м<sup>2</sup>;  $d = 6$  — диаметр проволоки упругого элемента крепления, мм;  $n$  — количество нитей проволоки упругого элемента крепления (для растяжек  $n = 8$ ,

<sup>1</sup> Здесь и далее крепежные элементы — гвозди.

для обвязок  $n = 6$ ), шт.;  $R0 = 20$  — принятое среднее значение усилия предварительных скруток проволоки крепления, кН.

Как и в [8 — 10], особо отметим, что при неучете физико-геометрических параметров упругих элементов крепления не представляется возможным прогнозировать сдвиг груза вдоль вагона.

1.2. Вычисленные по данным чертежа (см. рис. 1) значения проекции упругих элементов крепления на продольную ось вагона, м:

— одного направления:

$$a1 = 0,98; a1a = 0,98; a2 = 0,635; a2a = 0,635; a3 = 0; a3a = 0; a4 = 0; a4a = 0;$$

— другого направления:

$$a1p = 0,98; a1ap = 0,98; a2p = 0,635; a2ap = 0,635; a3p = 0; a3ap = 0; a4p = 0; a4ap = 0.$$

1.3. Вычисленные по данным чертежа (схемы погрузки груза) значения проекции упругих элементов крепления на поперечную ось вагона, м:

— одного направления:

$$b1 = 0,165; b2 = 0,165; b3 = 0,165; b4 = 0,165; b1p = 0,165; b2p = 0,165; b3p = 0; b4p = 0;$$

— другого направления:

$$b1a = 0,165; b2a = 0,165; b3a = 0,165; b4a = 0,165; b1ap = 0,165; b2ap = 0,165; b3ap = 0; b4ap = 0.$$

1.4. Вычисленные по данным чертежа (см. рис. 1) значения проекции упругих элементов крепления на вертикальную ось, м:

— одного направления:

$$h1 = 0,228; h1a = 0,228; h2 = 0,228; h2a = 0,228; h3 = 1,767; h3a = 1,767; h4 = 1,767; h4a = 1,767;$$

— другого направления:

$$h1p = 0,228; h1ap = 0,228; h2p = 0,228; h2ap = 0,228; h3p = 0; h3ap = 0; h4p = 0; h4ap = 0.$$

1.5. Длина упругих элементов крепления, м:

$$l_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + h_1^2} \quad l_1 = 1,02; l_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + h_2^2} \quad l_2 = 0,695 \text{ и т. д.}$$

Вычисленные значения длин упругих элементов крепления, м:

— одного направления:

$$l_1 = 1,02; l_2 = 0,695; l_3 = 1,775; l_4 = 1,775; l_{1p} = 1,02; l_{2p} = 0,695; l_{3p} = 0; l_{4p} = 0;$$

— другого направления:

$$l_{1a} = 1,02; l_{2a} = 0,695; l_{3a} = 1,775; l_{4a} = 1,775; l_{1ap} = 1,02; l_{2ap} = 0,695; l_{3ap} = 0; l_{4ap} = 0.$$

### Определение продольных сил

1. Продольная переносная сила инерции  $I_{ex}$  (см. формулу (1) [8, 10]):

$$a_{ex} = 1,6g \text{ — поперечное переносное ускорение вагона (1,2÷2), м/с}^2;$$

$$k_{dx} = a_{ex}/g = 1,6 \text{ — коэффициент продольной динамики вагона (продольное переносное ускорение вагона с грузом в долях от g);}$$

$$I_{ex} = k_{dx} G = 1,6 \cdot 200 = 320 \text{ — продольная переносная сила инерции, кН.}$$

2. Сила трения (см. формулу (2) [8] и формулу (2a) [10]):

$$F_{тр.х} = f \cdot G = 0,28 \cdot 200 = 56 \text{ — сила трения при скольжении, кН (} f = 0,28 \text{ — коэффициент трения при скольжении «металл — дерево»).$$

3. Продольная сдвигающая сила (см. формулу (3) [8, 10]):

$$F_{пр.} = I_{ex} = 320 \text{ или } F_{сд.х} = F_x = F_{пр.} = 320 \text{ кН.}$$

4. Продольная сила, воспринимаемая упругими элементами крепления груза при учете только силы трения скольжения груза вместо силы трения сцепления, как в ТУ (см. формулу (4a) [10]):

$$\Delta F_{пр.} = \Delta F_x = F_{сд.х} - F_{тр.х} = 320 - 56 = 264 \text{ кН.}$$

### Вычисление усилия в упругих элементах крепления по рекомендуемым формулам

1. Определение проекции упругих сил крепления на продольную ось при учете усилия предварительных скруток проволоки крепления  $R0$ .

1.1. Расчет проекции упругих сил от усилия предварительных скруток проволоки крепления только одного направления по формуле (12) [8], кН,

$$R0_{x1} = R0 \times \left( \frac{a_1}{l_1} + \frac{a_{1a}}{l_{1a}} + \frac{a_2}{l_2} + \frac{a_{2a}}{l_{2a}} \right).$$

Подставляя в последнюю формулу исходные данные и учитывая симметричное размещение груза относительно продольной оси вагона (см. формулу (12a) [8] или формулу (8a) [10]), получим:

$$R0_{x1} = 20 \times 2 \times \left( \frac{0,98}{1,02} + \frac{0,635}{0,695} \right) = 40 \times (0,961 + 0,914) = 40 \times 1,875 = 75;$$

$FR0_{удх1} = R0_{x1} = 75$  — удерживающая сила в элементах крепления от усилия предварительных скруток проволоки одного направления.

1.2. Расчет проекции упругих сил от усилия предварительных скруток проволоки крепления другого направления, кН,

$$R0_{x2} = R0 \times \left( \frac{a_{1p}}{l_{1p}} + \frac{a_{1ap}}{l_{1ap}} + \frac{a_{2p}}{l_{2p}} + \frac{a_{2ap}}{l_{2ap}} \right).$$

Подставляя в последнюю формулу исходные данные и учитывая симметричное размещение груза относительно продольной оси вагона, имеем

$FR0_{удх2} = R0_{удх1} = 75$  — удерживающая сила в элементах крепления от усилия предварительных скруток проволоки другого направления, кН.

Как видно, здесь не учитываются элементы крепления 3 и 4, расположенные перпендикулярно продольной оси вагона (обвязки), из-за того что их проекции вдоль вагона как в одном, так и в другом направлении воздействия продольных сил равны нулю, т. е.  $a3 = 0; a3a = 0; a4 = 0; a4a = 0$  и  $a3p = 0; a3ap = 0; a4p = 0; a4ap = 0$  (см. рис. 1).

Таким образом, можно отметить, что наличие перпендикулярно расположенных к продольной оси вагона элементов крепления груза при расчете проекции усилия от таких сил вдоль вагона не учитываются, поскольку их проекции на такую ось вагона равны нулю.

2. Определение проекции усилия (упругих сил) предварительных скруток проволоки крепления  $R0$  на вертикальную ось (см. формулу (13) [8]).

2.1. Расчет проекции усилия предварительных скруток проволоки крепления одного направления

$$R0_{z1} = R0 \times \left( \frac{h_1}{l_1} + \frac{h_{1a}}{l_{1a}} + \frac{h_2}{l_2} + \frac{h_{2a}}{l_{2a}} + \frac{h_3}{l_3} + \frac{h_{3a}}{l_{3a}} + \frac{h_4}{l_4} + \frac{h_{4a}}{l_{4a}} \right).$$

Подставляя в последнюю формулу исходные данные и учитывая симметричное размещение груза относительно продольной оси вагона (см. формулу (13а) [8] или формулу (9а) [10]), имеем:

$$R_{0z1} = 20 \times 2 \times \left( \frac{0,228}{1,02} + \frac{0,228}{0,695} + \frac{1,767}{1,775} + \frac{1,767}{1,775} \right) = 40 \times (0,224 + 0,328 + 0,996 + 0,996) = 40 \times 2,543 = 101,7;$$

$$R_{0z1x} = R_{0z1} = 101,7 \text{ кН.}$$

2.2. Расчет проекции усилия предварительных скруток проволоки крепления на вертикальную ось другого направления

$$R_{0z2} = R_0 \times \left( \frac{h_{1p}}{l_{1p}} + \frac{h_{1ap}}{l_{1ap}} + \frac{h_{2p}}{l_{2p}} + \frac{h_{2ap}}{l_{2ap}} + \frac{h_3}{l_3} + \frac{h_{3a}}{l_{3a}} + \frac{h_4}{l_4} + \frac{h_{4a}}{l_{4a}} \right).$$

Подставляя в последнюю формулу исходные данные и учитывая симметричное размещение груза относительно продольной оси вагона и то, что перпендикулярно расположенные к продольной оси вагона элементы крепления 3 и 4 (так называемые обвязки) и в этом случае участвуют в прижатии груза к полу вагона, будем иметь:

$R_{0z2x} = R_{0z1x} = R_{0z1} = 101,7$  — проекции упругих сил от предварительных скруток проволоки крепления на вертикальную ось другого направления, кН.

Как видно, здесь учитываются элементы крепления 3 и 4, расположенные перпендикулярно продольной оси вагона, поскольку такие элементы крепления как в одном, так и в другом направлении проецируются на вертикальную ось, т. е.  $h_3 = 1,767$ ;  $h_4 = 1,767$  и  $h_{3a} = 1,767$ ;  $h_{4a} = 1,767$  (см. рис. 1).

3. Определение силы трения скольжения от усилия предварительных скруток проволоки крепления  $R_0$  на вертикальную ось (см. формулу (6) [8]).

Расчет силы трения скольжения:

$$FR_{0\text{тр.}x} = f \times \sum_{i=1}^{n_p} R_{0iz},$$

где  $FR_{0\text{тр.}x1} = f \times R_{0z1x} = 0,28 \times 101,7 = 28,5$  — сила трения скольжения от предварительных скруток проволоки крепления одного направления, кН;

$FR_{0\text{тр.}x2} = f \times R_{0z2x} = 0,315 \times 101,7 = 28,5$  — сила трения скольжения от предварительных скруток проволоки крепления в силу симметричности другого направления, кН.

Таким образом, результатами расчетов, как и в [10], доказано, что перпендикулярно расположенные к продольной оси вагона элементы крепления оказывают влияние на величину силы трения по продольной оси вагона. При этом увеличивается значение удерживающих сил. Отсюда становится очевидным влияние таких элементов крепления для удержания груза от сдвига вдоль вагона. По этой причине усилия в данных элементах крепления в принципе не должны определяться по научно несостоятельной формуле (41) приложения 14 к СМГС [1].

4. Определение реакции упорных брусков (см. формулу (12) [10]):

$[R_{\text{кр}}] = 1,08$  — допускаемое значение силы на одно крепежное изделие, кН (см. табл. 32 приложения 14 к СМГС);

$n_{\text{бр.}x} = 3$  — принятое количество упорных брусков согласно схеме размещения и крепления груза на вагоне, шт. (см. рис. 1);

$k_1 = 0,6$  — коэффициент прочности крепления упорных брусков, учитывающий состояние пола вагона, шт. (обычно принимают 0,5 — 0,6);

$n_{\text{кр.}x} = 21$  — принятое значение потребного количества гвоздя на каждый упорный брусок, шт.;

$R_{\text{бр.}x} = k_1 \cdot n_{\text{кр.}x} \cdot n_{\text{бр.}x} \cdot [R_{\text{кр}}] = 0,6 \cdot 21 \cdot 3 \cdot 1,08 = 40,8$  — реакция упорных брусков с принятым количеством гвоздя, кН (см. формулу (46) приложения 14 к СМГС).

5. Определение суммы всех «удерживающих» сил вдоль вагона:

$FR_{0x1} = F_{\text{тр.}x} + FR_{0x1} + FR_{0\text{тр.}x1} = 56 + 75 + 28,48 = 159,5$  — «удерживающие» силы без учета реакции упорных брусков одного направления, кН (см. формулу (4) [8]);

$\Delta FR_{0\text{уд.}x1} = FR_{0x1} + R_{\text{бр.}x} = 160,5 + 40,82 = 200,3$  — «удерживающие» силы с учетом реакции упорных брусков одного направления, кН (см. формулу (14а) [10]);

$FR_{0x2} = F_{\text{тр.}x} + FR_{0x2} + FR_{0\text{тр.}x2} = 56 + 75 + 28,48 = 159,5$  — «удерживающие» силы без учета реакции упорных брусков другого направления, кН (см. формулу (4) [8]);

$\Delta FR_{0\text{уд.}x2} = FR_{0x2} + R_{\text{бр.}x} = 160,5 + 40,8 = 200,3$  — «удерживающие» силы с учетом реакции упорных брусков другого направления, кН (см. формулу (14а) [10]).

6. Продольная сила, воспринимаемая элементами крепления груза:

$\Delta FR_{0x1} = F_{\text{сд.}x} - FR_{0\text{уд.}x1} = 320 - 200,3 = 119,7$  кН (см. формулу (15а) [10]) — разность между сдвигающей и удерживающими силами одного направления, кН;

$\Delta FR_{0x2} = F_{\text{сд.}x} - FR_{0\text{уд.}x2} = 320 - 200,3 = 119,7$  кН (см. формулу (15а) [10]) — разность между сдвигающей и удерживающими силами другого направления, кН.

Положительный знак продольной силы  $\Delta FR_{0x}$  означает, что сдвигающая сила по величине больше, чем удерживающая. В этом случае явно произойдет сдвиг груза вдоль вагона, что будет сопровождаться выдергиванием крепежных изделий упорных брусков и выворачиванием этих брусков относительно дальней от торцевой поверхности груза грани.

7. Вычисление эквивалентной жесткости элементов крепления вдоль вагона  $c_{\text{экв.}x}$  при коэффициенте трения скольжения (после того, как произойдет сдвиг груза).

7.1. Расчет в силу несимметричности элементов крепления относительно поперечной оси одного направления (см. формулу (15) [8] или формулу (17а) [10]):

$$c_{\text{экв.}x} = 7,854 \times d_i^2 \times \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_i}{l_i} \times \left( f \times \frac{h_i}{l_i} + \frac{a_i}{l_i} \right) \times \frac{a_i}{l_i},$$

или при  $f = 0,28$ ,  $d_i = 6$  мм,  $n_i = 8$  шт.

$$c_{\text{экв.}x1} = 7,854 \times 6^2 \times 2 \times \left[ \frac{8}{1,02} \times \left( 0,28 \times \frac{0,228}{1,02} + \frac{0,98}{1,02} \right) \times \frac{0,98}{1,02} + \frac{8}{0,695} \times \left( 0,28 \times \frac{0,228}{0,695} + \frac{0,635}{0,695} \right) \times \frac{0,635}{0,695} \right],$$

или

$$c_{\text{экв.}x1} = 565,744 \times \left[ 7,846 \times (0,28 \times 0,224 + 0,961) \times 0,961 + 11,518 \times (0,28 \times 0,328 + 0,914) \times 0,914 \right],$$

или

$$c_{\text{экрв.х1}} = 565,744 \times \left[ 7,846 \times (0,063 + 0,961) \times 0,961 + \right. \\ \left. + 11,518 \times (0,092 + 0,914) \times 0,914 \right]$$

или

$$c_{\text{экрв.х1}} = 565,744 \times [7,846 \times 1,024 \times 0,961 + 11,518 \times 1,006 \times 0,914]$$

или

$$c_{\text{экрв.х1}} = 565,744 \times (7,72 + 10,595) = 565,744 \times 18,315 = 1036,$$

Окончательно получим:  $c_{\text{экрв.х1}} = 1036$  кН/м.

Результаты вычисления в системе MathCAD:

$$C0x1 := \left[ \begin{array}{l} \left[ \frac{n1}{l1} \cdot \left( f \cdot \frac{h1}{l1} + \frac{a1}{l1} \right) \right] \cdot \frac{a1}{l1} + \left[ \frac{n1a}{l1a} \cdot \left( f \cdot \frac{h1a}{l1a} + \frac{a1a}{l1a} \right) \right] \cdot \frac{a1a}{l1a} \dots \\ + \left[ \frac{n2}{l2} \cdot \left( f \cdot \frac{h2}{l2} + \frac{a2}{l2} \right) \right] \cdot \frac{a2}{l2} + \left[ \frac{n2a}{l2a} \cdot \left( f \cdot \frac{h2a}{l2a} + \frac{a2a}{l2a} \right) \right] \cdot \frac{a2a}{l2a} \end{array} \right]$$

$$C0x1 = 36.63 \quad c_{\text{экрвх1}} := 7.854 \cdot d^2 \cdot C0x1 \quad c_{\text{экрвх1}} = 1.036 \times 10^4$$

7.2. В силу симметричности элементов крепления относительно продольной оси другого направления примем  $c_{\text{экрв.х2}} = c_{\text{экрв.х1}} = 1036$  кН/м.

Результаты вычисления в системе MathCAD:

$$C0x2 := \left[ \begin{array}{l} \left[ \frac{n1p}{l1p} \cdot \left( f \cdot \frac{h1p}{l1p} + \frac{a1p}{l1p} \right) \right] \cdot \frac{a1p}{l1p} + \left[ \frac{n1ap}{l1ap} \cdot \left( f \cdot \frac{h1ap}{l1ap} + \frac{a1ap}{l1ap} \right) \right] \cdot \frac{a1ap}{l1ap} \dots \\ + \left[ \frac{n2p}{l2p} \cdot \left( f \cdot \frac{h2p}{l2p} + \frac{a2p}{l2p} \right) \right] \cdot \frac{a2p}{l2p} + \left[ \frac{n2ap}{l2ap} \cdot \left( f \cdot \frac{h2ap}{l2ap} + \frac{a2ap}{l2ap} \right) \right] \cdot \frac{a2ap}{l2ap} \end{array} \right]$$

$$C0x2 = 36.63 \quad c_{\text{экрвх2}} := 7.854 \cdot d^2 \cdot C0x2 \quad c_{\text{экрвх2}} = 1.036 \times 10^4$$

8. Вычисление сдвига груза вдоль вагона:

$\Delta FR0x = 119,7$  кН — сдвигающая сила, воспринимаемая средними частями крепления груза (см. пп. б);

$\Delta x0 = 0,006$  — начальный сдвиг груза совместно с упорными брусками, м.

8.1. Расчет сдвига груза (см. формулу (16) [8] или формулу (19) [10]) для одного направления

$$\Delta x = \Delta FR0x / c_{\text{экрв.х}} + \Delta x_0$$

где  $\Delta x1 = \Delta FR0x / c_{\text{экрв.х1}} + \Delta x0 = 119,7/1036 + 0,006 = 0,012 + 0,006 = 0,018$  — сдвиг груза в одном направлении, м (18 мм).

8.2. Расчет сдвига груза для другого направления [8, 10]:  $\Delta x2 = \Delta FR0x / c_{\text{экрв.х2}} + \Delta x0 = 119,7/1036 + 0,006 = 0,012 + 0,006 = 0,018$  — сдвиг груза в другом направлении, м (18 мм).

9. Вычисление удлинения и усилия каждого гибкого элемента крепления при воздействии продольных сил.

9.1. Вычисление удлинения и усилия каждого гибкого элемента крепления, соответствующего сдвигу груза вдоль вагона (см. формулу (20) [10])

$$\Delta l_{\text{упр.ix}} = \Delta x \times \frac{a_i}{l_i} \leq [\Delta l_{\text{упр.i}}]$$

где  $[\Delta l_{\text{упр.i}}]$  — допустимое значение удлинения каждого гибкого элемента,

$$[\Delta l_{\text{упр.i}}] = [R_{i0}] \times \frac{1}{7,854 d_i^2} \times \frac{l_i}{n_i}$$

Здесь  $[R_{i0}]$  — допустимое значение усилия в  $i$ -м упругом элементе крепления, определяемое по табл. 30 приложения 14 к СМГС в зависимости от количества нитей  $n_i$  (8 шт.) и диа-

метра  $d_i$  (6 мм) проволоки крепления с учетом натяжения предварительных скруток проволоки  $R0_i = 20$  кН, т. е.  $[R_{i0}] = [R_i] + R0_i = 24,8 + 20 = 44,8$  кН и  $R0_i = 18,6 + 20 = 38,6$  кН для  $n_i = 6$  шт. и  $d_i = 6$  мм.

Для заданных исходных данных допустимые значения удлинения каждого элемента крепления оказались равными, м:  $[\Delta l_{\text{упр.1}}] = 0,02$ ,  $[\Delta l_{\text{упр.2}}] = 0,014$ ,  $[\Delta l_{\text{упр.3}}] = 0,04$ ,  $[\Delta l_{\text{упр.4}}] = 0,04$  — для одного направления;

$[\Delta l_{\text{упр.1p}}] = 0,02$ ,  $[\Delta l_{\text{упр.2p}}] = 0,014$ ,  $[\Delta l_{\text{упр.3}}] = 0,04$ ,  $[\Delta l_{\text{упр.4}}] = 0,04$  — для другого направления.

Расчет удлинения каждого гибкого элемента крепления: — одного направления:

$$\Delta l_{\text{упр.1x}} = \Delta x1 \times \frac{a_1}{l_1} = 0,018 \times \frac{0,98}{1,02} = 0,018 \times 0,961 = 0,017;$$

$$\Delta l_{\text{упр.2x}} = \Delta x1 \times \frac{a_2}{l_2} = 0,018 \times \frac{0,638}{0,695} = 0,018 \times 0,914 = 0,016;$$

$$\Delta l_{\text{упр.3x}} = \Delta x1 \times \frac{a_3}{l_3} = 0,018 \times \frac{0}{1,767} = 0; \quad \Delta l_{\text{упр.3x}} = \Delta l_{\text{упр.4x}} = 0;$$

— другого направления:

$$\Delta l_{\text{упр.1px}} = \Delta x2 \times \frac{a_{1p}}{l_{1p}} = 0,018 \times \frac{0,98}{1,02} = 0,018 \times 0,961 = 0,017;$$

$$\Delta l_{\text{упр.2px}} = \Delta x2 \times \frac{a_{2p}}{l_{2p}} = 0,018 \times \frac{0,638}{0,695} = 0,018 \times 0,914 = 0,016;$$

$$\Delta l_{\text{упр.3px}} = \Delta x2 \times \frac{a_{3p}}{l_{3p}} = 0,018 \times \frac{0}{1,767} = 0;$$

$$\Delta l_{\text{упр.3px}} = \Delta l_{\text{упр.4px}} = 0;$$

9.2. Вычисление усилия каждого гибкого элемента крепления при воздействии продольных сил (см. формулу (21) [10])

$$R_{\text{упр.i}} = 7,854 \times d_i^2 \times \frac{n_i}{l_i} \times \Delta l_{ix} \leq [R_{i0}]$$

В силу симметричного размещения элементов крепления как одного, так и другого направления получим:

$$R_{\text{упр.1.1}} = 7,854 \times 6^2 \times \frac{8}{1,02} \times 0,017 = 7,854 \times 36 \times 7,846 \times 0,017 = 37,4;$$

$$R_{\text{упр.1.2}} = 7,854 \times 6^2 \times \frac{8}{0,695} \times 0,016 = 7,854 \times 36 \times 11,518 \times 0,016 = 53,3;$$

$$R_{\text{упр.1.3}} = 7,854 \times 6^2 \times \frac{6}{1,775} \times 0 = 0; \quad R_{\text{упр.1.3}} = R_{\text{упр.1.4}} = 0;$$

$$R_{\text{упр.1.1p}} = R_{\text{упр.1.1}} = 37,4; \quad R_{\text{упр.1.2p}} = R_{\text{упр.1.2}} = 53,3;$$

$$R_{\text{упр.1.3p}} = R_{\text{упр.1.4p}} = 0.$$

Как видно, для заданных исходных данных (т. е. при коэффициенте продольной динамики вагона  $k_{\text{дх}} = 1,6$ ) усилие во втором гибком элементе крепления почти в 2 раза

(53,3/44,8 ≈ 1,18) превышает допустимое значение (24,8 + 20 = 44,8 кН). Отметим, что принятое значение коэффициента продольной динамики вагона ( $k_{д.х} = 1,6$ ) соответствует маневровому соударению вагона на подгорочном парке сортировочной станции. В этом случае для обеспечения безопасности перевозки, сохранности перевозимого груза и деталей подвижного состава требуются дополнительные средства крепления. Здесь есть возможность управлять процессом проведения расчета, т. е. заранее прогнозировать возможные случаи нарушения безопасности движения. При этом если очертания груза и полезная площадь вагона позволяют, то можно увеличить количество крепежных изделий, в противном случае — количество упругих элементов крепления, а иногда выполнить и то и другое. Например, если вместо принятого количества гвоздей  $n_{кр.х} = 21$  шт. с изменением длины двух параллельно расположенных распорных брусков 5, прибитых к полу вагона вплотную к поперечно расположенному упорному бруску 6 (см. рис. 1), принять  $n_{кр.х} = 38$  шт., оставляя при этом количество упорных брусков  $n_{бр.х} = 3$  шт., то сдвиг груза вдоль вагона  $\Delta x$  уменьшится почти в 1,3 раза (точнее, вместо 18 мм как для одного, так и для другого направления станет равным 14 мм). Аналогично этому уменьшится удлинение второго элемента крепления на 3 мм (вместо  $\Delta l_{упр.2} = 16$  мм станет 13 мм). Соответственно усилие в самом коротком по длине втором элементе (т. е. в  $l_2 = 0,965$  м) окажется равным  $R_{упр.1.2} = 42,8$  кН, т. е. почти 1,25 раза (53,3/42,8 = 1,25) меньше, чем было при  $n_{кр.х} = 21$ . Отсюда можно сделать вывод о том, что если усилия в коротких по длине парных упругих элементах крепления при воздействии продольных сил окажутся меньше, чем допустимые, то будет обеспечена прочность во всех остальных элементах крепления с большим запасом.

Как видно, усилия в перпендикулярно расположенных к продольной оси вагона элементах крепления 3 и 4 (обвязки), согласно пп. 9.2, равны нулю, поскольку проекции этих элементов вдоль вагона равны нулю, т. е.  $a_3 = 0$ ;  $a_3a = 0$ ;  $a_4 = 0$ ;  $a_4a = 0$  (см. также формулу (27) [10]). Вместе с тем, согласно [10], покажем результаты расчетов усилия в обвязках от воздействия продольной силы по величине сдвига груза вдоль вагона  $\Delta x$ . Приведем результаты вычисления удлинения и усилия в обвязках в среде MathCAD (см. формулы (26) и (27) [10]):

$$\Delta l_{3x} := \sqrt{\Delta x_1^2 + l_3^2} - l_3 \quad \Delta l_{3x} = 9.128 \times 10^{-5}$$

$$\Delta l_{3ax} := \sqrt{\Delta x_1^2 + l_3a^2} - l_3a \quad \Delta l_{3ax} = 9.128 \times 10^{-5}$$

$$R_{пр3} := 7.584 \cdot 6^2 \cdot \frac{n_3}{l_3} \cdot \Delta l_{3x} \quad R_{пр3a} := 7.584 \cdot 6^2 \cdot \frac{n_3a}{l_3a} \cdot \Delta l_{3ax}$$

$$R_{пр3} = 0.084$$

$$R_{пр3a} = 0.084$$

Отсюда становится очевидным, что сдвиг груза вдоль вагона  $\Delta x$  практически не оказывает влияния на величину усилия в элементах крепления 3, т. е. обвязки практически не испытывают воздействия продольной силы.

### Определение сдвига груза вдоль вагона, удлинения и усилия в гибких элементах крепления в зависимости от количества крепежных элементов

Ниже впервые покажем возможности нахождения такого количества крепежных элементов (гвоздь)  $n_{кр.х}$ , при котором будет обеспечена гарантированная прочность гибких элементов крепления груза, способом вариации количества крепежных элементов  $n_{кр.х}$  от 20 до 40 с шагом  $\Delta n_{кр.х} = 1$  шт. Исходя из этого построим графические зависимости продольной силы  $\Delta FR_{0x}$ , воспринимаемой гибкими элементами крепления груза, сдвига груза вдоль вагона  $\Delta x$ , удлинения  $\Delta l_{упр.i}$  и усилия  $R_{упр.х}$  в каждом гибком элементе крепления (рис. 2 — 5). Например, графические зависимости реакции упорных брусков  $R_{бр.х}$  (см. пп. 4) и продольной силы  $\Delta FR_{0x}$ , воспринимаемой элементами крепления груза (см. пп. 6), от вариации количества крепежных элементов  $n_{кр.х}$  показаны на рис. 2.

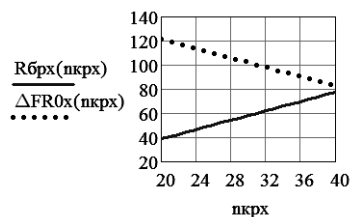


Рисунок 2 — Зависимости  $R_{бр.х}$  и  $\Delta FR_{0x}$  от вариации  $n_{кр.х}$

Как видно, с увеличением количества крепежных элементов  $n_{кр.х}$  уменьшается величина продольной силы  $\Delta FR_{0x}$ , воспринимаемой гибкими и упорными элементами крепления груза.

Согласно пп. 8, от величины продольной силы  $\Delta FR_{0x}$  линейно зависит величина сдвига груза вдоль вагона. Представим графические зависимости сдвига груза вдоль вагона  $\Delta x$  от вариации количества крепежных элементов  $n_{кр.х}$  (см. рис. 3).

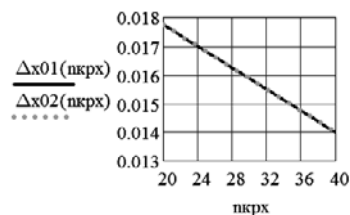


Рисунок 3 — Зависимости сдвига груза вдоль вагона  $\Delta x$  от вариации количества крепежных элементов  $n_{кр.х}$

Анализ построенных графических зависимостей показывает, что с увеличением количества крепежных элементов  $n_{кр.х}$  по линейной зависимости уменьшается величина сдвига груза вдоль вагона  $\Delta x$ , поскольку при этом увеличивается удерживающая сила (см. рис. 2).

Теперь в соответствии с пп. 9.1 покажем графические зависимости удлинения каждого элемента крепления  $\Delta l_{упр.i}$  при вариации количества крепежных изделий (гвоздь)  $n_{кр.х} = 20, 21 \dots 40$  шт. (см. рис. 4).

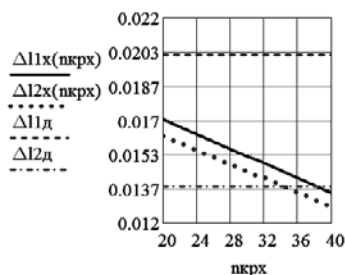


Рисунок 4 — Зависимости удлинения элементов крепления  $\Delta I_{упр.и}$  от вариации количества крепежных элементов  $n_{кр.х}$

Анализ полученных графических зависимостей показывает, что удлинения второго элемента крепления как одного, так и другого направления при воздействии продольных сил больше, чем допустимое ( $\Delta I_{2д} = 14$  мм), в 1,12 раза ( $0,016/0,014 \approx 1,12$ ) при количестве гвоздей менее 35 шт. (т. е.  $n_{кр.х} < 35$  шт.) на две распорные 5 и один упорный 6 бруски (см. рис. 1). В этом случае груз удерживается от сдвига вдоль вагона только первым гибким элементом крепления, у которого допустимое значение удлинения  $\Delta I_{1д} = 20$  мм. Поэтому требуются дополнительные средства крепления груза в виде большего количества либо крепежных элементов, либо гибких элементов крепления.

Полученные результаты исследований показывают, что на этом же этапе расчета можно предпринять меры по уменьшению величины удлинения каждого элемента крепления. Например, можно увеличивать значение «удерживающей» силы  $\Delta FRO_{уд.х}$  (см. пп. 5) путем увеличения количества крепежных изделий, что приведет к уменьшению продольной силы  $\Delta FRO_x$  (см. пп. 6), воспринимаемой гибкими элементами крепления, а следовательно, и величины сдвига груза вдоль вагона.

Согласно пп. 9.2, на рис. 5 приведены графические зависимости усилия в каждом гибком элементе крепления  $R_{упр.иx}$  от вариации количества крепежных элементов  $n_{кр.х}$ .

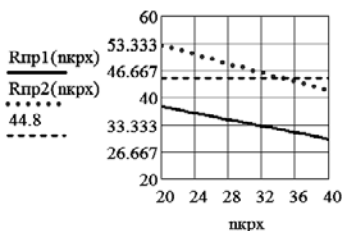


Рисунок 5 — Зависимости усилия в элементах крепления  $R_{упр.иx}$  от вариации количества крепежных элементов  $n_{кр.х}$

Анализ построенных графических зависимостей показывает, что усилия второго элемента крепления как одного, так и другого направления при воздействии продольных сил больше, чем допустимое ( $24,8 + 20 = 44,8$  кН), при количестве гвоздей менее чем 35 шт. (т. е.  $n_{кр.х} < 35$  шт.) на две распорные 5 и один упорный 6 бруски (см. рис. 1). В этом случае груз удерживается от сдвига вдоль вагона только первым гибким элементом крепления. Поэтому, как видно из рис. 5, следует увеличить количество крепежных элементов (т. е.  $n_{кр.х} > 35$  шт.). Так можно управлять процессом крепления груза на вагоне, обеспечив прочность всех элементов крепления еще на

стадии разработки схемы размещения и крепления груза. В случае если прочность крепления упорных брусков окажется недостаточной для удержания груза от сдвига вдоль вагона, то следует увеличить количество гибких элементов крепления.

### Выводы

1. Впервые представлены результаты вычисления сдвига груза вдоль вагона, удлинения и усилия в гибких элементах крепления при вариации количества крепежных элементов. Отмечено, что при вариации количества крепежных элементов в сторону его увеличения снижается величина удерживающей силы. Уменьшение этой силы также происходит из-за увеличения силы трения от перпендикулярно расположенных к продольной оси вагона гибких элементов крепления (обвязки). По этой причине снижается значение продольной силы, воспринимаемой гибкими и упорными элементами крепления. Результатами расчетов доказано, что перпендикулярно расположенные к продольной оси вагона элементы крепления оказывают заметное влияние на величину силы трения по продольной оси вагона. Соответственно увеличивается значение удерживающей силы. Построены графические зависимости удлинения и усилия в каждом гибком элементе крепления при вариации количества крепежных элементов. Выполнено сравнение величины удлинения каждого гибкого элемента крепления, вычисленного при вариации количества крепежных элементов, с допускаемыми значениями. Результаты построенных графических зависимостей позволили установить то минимальное количество крепежных элементов, при котором появляются возможности обеспечить их гарантированную прочность без разрушения.

2. Преимущество новой методики расчета, основанной на классических понятиях механики, в сравнении с ранее известной методикой ТУ состоит в том, что она позволила произвести вычисления:

- «удерживающей» и «сдвигающей» силы, а следовательно, и продольной силы, воспринимаемой гибкими элементами крепления, при вариации количества крепежных элементов;
- силы трения от проекции усилия предварительной скрутки проволоки крепления с произвольной геометрией на вертикальную ось;
- эквивалентных жесткостей гибких элементов крепления в направлении воздействия продольной силы с учетом их физико-геометрических характеристик, но без учета таких характеристик перпендикулярно расположенных к продольной оси вагона элементов крепления;
- сдвига груза вдоль вагона, удлинения и усилия в гибких элементах крепления при вариации количества крепежных элементов еще на этапе разработки схемы размещения и крепления груза на вагоне.

Вариации количества крепежных элементов дали возможность установить то минимальное их число, при котором будет обеспечена прочность гибких элементов крепления без их разрушения, что позволит обеспечить безопасность движения, сохранность перевозки грузов в пути следования, а также сохранить срок службы деталей подвижного состава.



3. На конкретном примере расчета доказана возможность управления (прогнозирования) процессом расчета сдвига груза вдоль вагона и усилий в элементах крепления с произвольной геометрией. Также доказано, что перпендикулярно расположенные к продольной оси вагона элементы крепления практически не воспринимают продольные силы. Такие гибкие элементы крепления служат для прижатия груза к полу

вагона, увеличивая тем самым величину силы трения (см. также формулу (27) [10]).

Приведенный пример может служить важным руководящим материалом для инженеров-расчетчиков при разработке схем размещения и крепления грузов на вагоне при наличии перпендикулярно расположенных к продольной оси вагона элементов крепления по новой методике [10].

## Литература

1. Приложение 14 к СМГС «Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах». М. : Планета, 2008. 191 с.
2. Туранов Х.Т., Тимухина Е.Н., Волков Д.В. Нагрузочные способности гибких упругих элементов креплений при размещении груза со смещением центра масс вдоль вагона // *Транспорт Урала*. 2007. № 4. С. 25 — 35.
3. Туранов Х.Т. *Теоретическая механика в задачах грузовых перевозок : монография*. Новосибирск : Наука, 2009. 376 с.
4. Туранов Х.Т., Оленцевич В.А. Моделирование технологии креплений груза в вагоне при воздействии пространственной системы сил // *Транспорт Урала*. 2010. № 2. С. 35 — 38.
5. Туранов Х.Т., Тимухина Е.Н. Математическое моделирование нагруженности гибких элементов креплений груза с подкладкой при воздействии пространственной системы сил // *Транспорт Урала*. 2011. № 1. С. 29 — 34.
6. Туранов Х.Т. Обобщенная математическая модель креплений груза с подкладками совместно с гибкими и упорными элементами при воздействии пространственной системы сил // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2012. № 2. С. 145 — 152.
7. Туранов Х. *Теория крепления твердотельного груза на открытом подвижном составе : монография*. Saarbrücken : LAP LAMBERT Palmarium Academic Publishing, 2012. 259 с.
8. Туранов Х.Т. Новая методика расчета упругих элементов крепления груза на вагоне против продольного сдвига // *Транспорт: Наука, техника и управление*. 2013. № 2. С. 17 — 24.
9. Туранов Х.Т. Пример расчета упругих элементов крепления груза на вагоне против продольного сдвига // *Транспорт: Наука, техника и управление*. 2013. № 2. С. 40 — 46.
10. Туранов Х.Т. Новая методика определения продольного сдвига при одновременном наличии упругих и упорных элементов крепления груза на вагоне // *Транспорт: Наука, техника и управление*. 2013. № 6. С. 11 — 16.

## References

1. Attachment 14 to SMGS (Agreement on International Cargo Transportations) "Pravila razmeshcheniya i krepneniya грузов в vagonakh i konteynerakh" [Allocation and securing cargo in freight cars and containers]. M.: Planeta, 2008. 191 s.
2. Turanov Kh.T., Timukhina E.N., Volkov D.V. "Nagruzochnyye sposobnosti gibkikh uprugikh elementov krepneniy pri razmeshchenii gruzа so smeshcheniyem tsentra mass vdol' vagonа" [The load capacity of flexible elastic fastening elements when loading cargo with the center of mass shifting along the freight car] // *Transport of the Urals*. 2007. No. 4. s. 25— 35.
3. Turanov Kh.T. "Teoreticheskaya mekhanika v zadachakh gruzovykh perevozok: Monografiya." [Theoretical Mechanics in the problems of freight transportation: Monograph]. Novosibirsk: Nauka, 2009. 376 s.
4. Turanov Kh.T., Olentsevich V.A. "Modelirovaniye tekhnologii krepneniy gruzа v vagone pri vozdeystvii prostranstvennoy sistemy sil" [Modeling of cargo attachment technology in the freight car under the impact of the spatial system of forces] // *Transport of the Urals*. 2010. No. 2. s. 35–38.
5. Turanov Kh.T., Timukhina E.N. "Matematicheskoye modelirovaniye nagruzhonnosti gibkikh elementov krepneniy gruzа s podkladkoy pri vozdeystvii prostranstvennoy sistemy sil" [Mathematical modeling of the loaded flexible elements of cargo fastening with pads under the impact of the spatial system of forces] // *Transport of the Urals*. 2011. No. 1. s. 29 – 34.
6. Turanov Kh.T. "Obobshchyonnaya matematicheskaya modeli krepneniy gruzа s podkladkami sovmestno s gibkimi i upornymi elementami pri vozdeystvii prostranstvennoy sistemy sil" [Generalized mathematical model of cargo fastening with pads together with flexible and thrust elements under the impact of the spatial system of forces] // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2012. No.2. s. 145–152.
7. Turanov Kh. "Teoriya krepneniya tvordotel'nogo gruzа na otkrytom podvizhnom sostave: monografiya" [Theory of solid cargo fastening on open rolling stock: monograph] // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Palmarium Academic Publishing, 2012. 259 c.
8. Turanov Kh.T. "Novaya metodika raschyota uprugikh elementov krepneniya gruzа na vagone protiv prodol'nogo sdviga" [A new method of calculating the elastic elements of cargo fastening on the freight car against longitudinal shift] // *Transport: Nauka, tekhnika i upravleniye*. 2013. No. 2. s. 17—24.
9. Turanov Kh.T. "Primer raschyota uprugikh elementov krepneniya gruzа na vagone protiv prodol'nogo sdviga" [Example of calculating the elastic elements of cargo fastening on the freight car against longitudinal shift] // *Transport: Nauka, tekhnika i upravleniye*. 2013. No. 2. s. 40—46.
10. Turanov Kh.T. "Novaya metodika opredeleniya prodol'nogo sdviga pri odnovremennom nalichii uprugikh i upornykh elementov krepneniya gruzа na vagone" [A new method of determining the longitudinal shift in the simultaneous presence of elastic and thrust cargo fasteners on the freight car] // *Transport: Nauka, tekhnika i upravleniye*. 2013. No. 6. s. 11 — 16.

УДК 539.3

**Валерий Владимирович Стружанов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Высшая и прикладная математика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,**  
**Елена Александровна Бахарева, аспирант Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), Екатеринбург**

## К РАСЧЕТУ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЧИСТОМ ИЗГИБЕ

**Valeriy V. Struzhanov, DSc in Physics and Mathematics, Professor of the Department of 'Higher and Applied Mathematics' of Urals State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,**  
**Elena A. Bahareva, postgraduate of Institute of Engineering Science of Ural branch of Russian Academy of Sciences (IMach UrO RAN)**

### To Calculation Of Ultimate Loads Of Beam Elements In Case Of The Pure Bend

#### Аннотация

Разработана методика расчета предельной несущей способности балочных элементов на примере чистого изгиба балок с произвольным поперечным сечением. Методика может быть использована при проектировании нового поколения подвижного состава железных дорог с повышенной надежностью и безопасностью эксплуатации. Методика основана на включении в рассмотрение свойства материала (разупрочнение), которое ранее не учитывалось в расчетах на прочность. Расчет предельных нагрузок осуществляется исходя из критерия потери устойчивости, отождествляемого с появлением микродефектов в материале. Исследование устойчивости процесса деформирования основано на методе специальной математической теории катастроф, в соответствии с которым скачкообразный переход от устойчивого к неустойчивому равновесию происходит в вырожденных критических точках, отвечающих вырождению матрицы Гессе. Приведен ряд примеров, иллюстрирующих предложенную методику.

**Ключевые слова:** уравнения равновесия чистого изгиба, полная диаграмма с падающей ветвью, устойчивость деформирования, матрица Гессе, критическая нагрузка.

#### Abstract

The method of calculation of limit bearing capacity of beam elements on the example of a pure bend of beams with arbitrary cross section is developed. The technique can be used in case of design of new generation of railroads rolling stock with increased reliability and safety of maintenance. The technique is based on including material property in surveying (weakening) as it was not considered earlier in calculations on durability. Calculation of ultimate loads is carried out proceeding from criterion of stability loss, identified with appearance of micro flaws in material. Research of deforming process stability is based on the method of special mathematical catastrophe theory according to which spasmodic transition from stable to unstable equilibrium happens in single critical points responding to degeneration of Hessian matrix. A number of examples illustrating the offered technique are given.

**Key words:** equilibrium equations of a pure bend, full chart with a falling branch, stability of deforming, Hessian matrix, ultimate load.

**П**одвижной состав железных дорог содержит множество сложных конструктивных элементов, надежность которых обеспечивает безопасность и безаварийность перевозок. Весьма распространенными являются балочные конструкции. Например, шкворневые и надрессорные балки, вагонные оси колесных пар и т. п. При проектировании таких изделий расчет, как правило, проводится по допускаемым напряжениям [1 — 3]. Поэтому предельная нагрузка определяется по пределу прочности материала. Это приводит к неоправданно высоким запасам прочности и увеличению материалоемкости изделий и в то же время не позволяет получить реальную несущую способность.

В работах [4, 5] показано, что момент разрушения связан с переходом материала в состояние разупрочнения (закритическую, неустойчивую стадию деформирования), которая характеризуется падающим участком диаграммы деформирования. Учет при расчетах разупрочнения позволяет вычислить значение реальной предельной нагрузки и найти реальный момент разрушения.

В данной работе на примере чистого изгиба балок произвольного поперечного сечения показана методика расчета критических нагрузок разрушения при введении в рассмотрение неустойчивых состояний материала (разупрочнение). Методика может быть использована в конструкторских бюро, проектирующих технику нового поколения для железнодорожного транспорта.

Рассмотрим балочный элемент конструкций высотой  $2h$ , длиной  $L$ , поперечное сечение которого ограничивает контур, заданный гладкой или кусочно-гладкой функцией  $\Gamma(y)$  и симметричный относительно вертикальной оси  $Oy$  (в плоскости  $Oyz$ ) (рис. 1). Примером таких балочных элементов могут служить круглые валы, элементы кузовных рам, прямоугольные, двутавровые, цилиндрические, шкворневые, хребтовые и надрессорные балки, используемые при строительстве подвижного состава и транспортной инфраструктуры [1, 2].

Рассмотрим балку произвольного поперечного сечения (см. рис. 1). Ось  $Ox$  направлена вдоль балки, начало системы координат расположено на оси симметрии на равном расстоянии от верхней и нижней плоскостей балки. К торцам балки при постоянной температуре прикладывается изгибающий момент  $M$ , реализую-

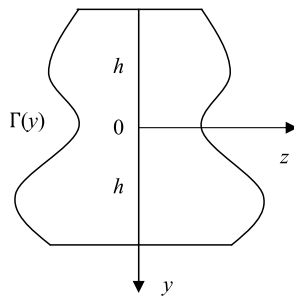


Рисунок 1 — Поперечное сечение балки

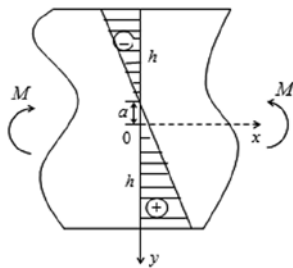


Рисунок 2 — Распределение деформаций

ций в ней состояние чистого изгиба (рис. 2). При таком нагружении в балке возникают только продольные напряжения  $\sigma_x = \sigma(y)$  [6], а продольные деформации линейно распределены по ее высоте  $\varepsilon_x = \varepsilon(y)$  (см. рис. 2) и вычисляются по формуле

$$\varepsilon = \kappa(y + a),$$

где  $\kappa$  — кривизна балки;

$a$  — отклонение нейтральной линии от оси симметрии, возникающее из-за несимметричности поперечного сечения относительно оси  $Oz$  (рис. 1).

В задаче о чистом изгибе дифференциальные уравнения равновесия и условия совместности деформаций удовлетворяются тождественно [6]. В процессе деформирования волокна балки выше нейтральной линии находятся в состоянии сжатия, волокна ниже нейтральной линии — в состоянии растяжения. Полагаем, что свойства при растяжении и сжатии одинаковые, и определим их полной диаграммой растяжения  $\sigma(\varepsilon)$ , обладающей восходящей и падающей до нуля ветвями (рис. 3). Последняя отвечает эффекту деформационного разупрочнения материала [4 — 5], для которого характерно появление микродефектов, приводящих к деградации материала. На рис. 3 деформация  $\varepsilon_B$  отвечает пределу прочности, а деформация  $\varepsilon_Z$  — это деформация разрушения, осуществляемая в условиях жесткого нагружения при контроле за степенью деформации.

Наклон диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  характеризует функция касательного модуля  $E^P(\varepsilon) = d\sigma/d\varepsilon$ . Если в некоторых точках  $E^P(\varepsilon) > 0$ , то имеет место упрочнение материала, при  $E^P(\varepsilon) < 0$  — его разупрочнение (падающая ветвь диаграммы деформирования, см. рис. 3). На рис. 3  $E$  — модуль Юнга в упругости.

Предположим, что в процессе активного деформирования материал балки неотличим от нелинейно-упругого материала и характеризуется потенциалом напряжений

$$W(\varepsilon) = \int_0^\varepsilon \sigma(e)de,$$

равным работе деформаций материального элемента [7]. Тогда состояние системы описывает функция потенциальной энергии

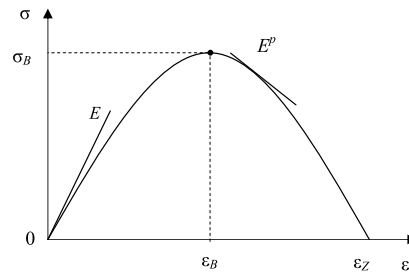


Рисунок 3 — Полная диаграмма деформирования

$$\begin{aligned} \Pi &= \Pi(a, \kappa; M) = \iiint_V W(\varepsilon) dV - L \int_0^\kappa M d\kappa = \\ &= 2L \int_{-h}^h \Gamma(y) W(\kappa(y + a)) dy - L \int_0^\kappa M d\kappa. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь первое слагаемое — работа напряжений, затраченная на деформирование всего балочного элемента объемом  $V$ . Второе слагаемое — работа изгибающего момента.

Равенства нулю производных потенциальной функции  $\Pi$  по параметрам  $a$  и  $\kappa$  после преобразований приводят к уравнениям статического равновесия:

$$2 \int_{-h}^h \Gamma(y) \sigma(\kappa(y + a)) dy = 0, \quad 2 \int_{-h}^h \Gamma(y) \sigma(\kappa(y + a)) y dy = M. \quad (2)$$

Уравнения (2) совпадают с граничными условиями в задаче о чистом изгибе балки и связывают параметр управления системой (изгибающий момент  $M$ ) с параметрами состояния (отклонение  $a$  и кривизна  $\kappa$ ) в устойчивых и неустойчивых положениях равновесия балки.

Для исследования устойчивости воспользуемся методами специальной математической теории катастроф, в соответствии с которой критические точки определяют максимумы и минимумы потенциальной функции (1) и находятся из равенства нулю частных производных по параметрам состояния

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a} = 0 \text{ и } \frac{\partial \Pi}{\partial \kappa} = 0 \quad [7],$$

совпадающих с уравнениями (2). Отсюда точки экстремума функции (1) совпадают с положениями равновесия балки (устойчивыми и неустойчивыми). По принципу максимального промедления [8] смена типов равновесия с устойчивого на неустойчивое происходит в вырожденных критических точках, для которых матрица устойчивости

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Pi}{\partial a^2} & \frac{\partial^2 \Pi}{\partial a \partial \kappa} \\ \frac{\partial^2 \Pi}{\partial \kappa \partial a} & \frac{\partial^2 \Pi}{\partial \kappa^2} \end{pmatrix}$$

вырождается [7, 8] и ее определитель обращается в нуль  $\det H = 0$ . После вычисления вторых частных производных функции (1) последнее уравнение примет вид

$$\begin{aligned} \frac{\det H}{4L^2} &= \kappa^2 \int_{-h}^h \Gamma(y) E^P dy \cdot \int_{-h}^h \Gamma(y) E^P \cdot y^2 dy - \left( \kappa \int_{-h}^h \Gamma(y) E^P y dy \right)^2 - \\ &- \left( \int_{-h}^h \Gamma(y) \sigma dy \right)^2 - 2\kappa \int_{-h}^h \Gamma(y) \sigma dy \cdot \int_{-h}^h \Gamma(y) E^P \cdot y dy - \\ &- 2a\kappa \int_{-h}^h \Gamma(y) \sigma dy \cdot \int_{-h}^h \Gamma(y) E^P \cdot y dy = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $E^P = E^P(\varepsilon) = E^P(\kappa(y+a))$ .

Очевидно, что в начале процесса нагружения напряженно-деформированное состояние балки устойчивое. В каждой точке сечения касательный модуль  $E^P > 0$  и  $\det H \neq 0$ . При постепенном возрастании прикладываемого изгибающего момента  $M$  балка будет сохранять устойчивое равновесие до тех пор, пока ее параметры не удовлетворяют уравнению (3). В этот момент критическая точка становится вырожденной, и процесс нагружения скачкообразно теряет устойчивость.

Потеря устойчивости процесса деформирования сопровождается появлением микродефектов [9], которые при дальнейшем нагружении приводят к полному разрушению балки. Поэтому условие потери устойчивости процесса деформирования (3) можно рассматривать как критерий разрушения балки [9]. Отсюда, используя (3), возможно определить критическую нагрузку  $M$  и соответствующие ей параметры состояния системы  $a$  и  $\kappa$ .

Алгоритм расчета предельной несущей способности балки:

- задаем геометрические характеристики балочного элемента — высоту  $h$ , длину  $L$ , граничный контур  $\Gamma(y)$  — и зависимость  $\sigma(\varepsilon)$ , характеризующую свойства материала;
- выписываем уравнения статического равновесия (2);
- находим функцию касательного модуля  $E^P = d\sigma/d\varepsilon$  и выписываем условие потери устойчивости (3);
- находим вырожденные критические точки — все пары параметров состояний  $(a, \kappa)$ , удовлетворяющих уравнению (3);
- из множества вырожденных критических точек выбираем параметры истинных, физически реализуемых равновесий системы, т. е. такие  $a$  и  $\kappa$ , для которых выполняется первое уравнение (2);
- подставляем полученные параметры  $a$  и  $\kappa$  во второе уравнение статического равновесия (2)

$$2 \int_{-h}^h \Gamma(y) \sigma(\kappa(y+a)) y dy = M$$

и, вычислив интеграл, находим искомую критическую нагрузку.

Отметим, что в основном при строительстве железнодорожного транспорта используют прямоугольные, круглые и двутавровые балки, т. е. такие, которые имеют три оси симметрии [1]. В этом случае, учитывая, что свойства материала одинаковые при растяжении и сжатии, нейтральная линия совпадает с осью симметрии  $Ox$  и не отклоняется от нее в процессе деформирования. Отсюда в уравнениях равновесия (2) и условии потери устойчивости (3) параметр  $a = 0$ . Тогда полные деформации вычисляются по формуле  $\varepsilon = \kappa y$ . Это приводит к тому, что условие потери устойчивости (3) принимает вид

$$\frac{\det H}{4L^2} = \kappa^2 \int_{-h}^h \Gamma(y) E^P(\kappa y) dy \cdot \int_{-h}^h \Gamma(y) E^P(\kappa y) \cdot y^2 dy - \left( \kappa \int_{-h}^h \Gamma(y) E^P(\kappa y) y dy \right)^2 = 0. \quad (4)$$

Для балок с тремя осями симметрии алгоритм расчета критической нагрузки состоит из следующих этапов:

- задаем геометрические характеристики балки — высота  $h$ , длина  $L$ , граничный контур  $\Gamma(y)$  — и зависимость  $\sigma(\varepsilon)$ , характеризующая свойства материала;
- выписываем уравнения статического равновесия (2) и условие потери устойчивости (4);
- уравнение (4) решаем численно относительно кривизны  $\kappa$ ;
- найденное значение  $\kappa$  подставляем во второе уравнение равновесия (2)

$$2 \int_{-h}^h \Gamma(y) \sigma(\kappa y) y dy = M$$

и определяем критический изгибающий момент.

Проиллюстрируем предложенную методику для расчета критической нагрузки стальной прямоугольной балки высотой  $2h = 100$  мм и шириной  $b = 50$  мм. В этом случае граничный контур  $\Gamma(y) = b/2$ . Свойства материала балки определяет полная диаграмма деформирования, заданная функцией

$$\sigma(\varepsilon) = E \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_B}\right),$$

где модуль Юнга  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\varepsilon_B = 0,01$ .

Считаем, что материал разрушен при  $\varepsilon > \varepsilon_z = 0,09$ . Касательный модуль диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  равен

$$E^P = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_B}\right) \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_B}\right).$$

Уравнения статического равновесия принимают вид

$$b \int_{-h}^h \sigma(\kappa y) dy = 0, \quad b \int_{-h}^h \sigma(\kappa y) y dy = 2b \int_0^h \sigma(\kappa y) y dy = M. \quad (5)$$

Условие потери устойчивости для прямоугольной балки есть

$$b^2 \kappa^2 \int_{-h}^h E^P(\kappa y) dy \cdot \int_{-h}^h E^P(\kappa y) \cdot y^2 dy - \left( b \kappa \int_{-h}^h E^P(\kappa y) y dy \right)^2 = 0.$$

Распишем второе слагаемое в последнем уравнении, используя метод интегрирования по частям и учитывая первое уравнение равновесия (5) и симметричность функции  $\sigma(\kappa y)$ ,

$$b \int_{-h}^h E^P y dy = b \int_{-h}^h E^P(\kappa y) \kappa \frac{1}{\kappa} y dy = b \int_{-h}^h \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{\kappa} \frac{1}{\kappa} y dy = b \cdot y \frac{\sigma(y)}{\kappa} \Big|_{-h}^h - b \int_{-h}^h \frac{\sigma(y)}{\kappa} dy = b h \frac{\sigma(h)}{\kappa} - b(-h) \frac{\sigma(-h)}{\kappa} - \frac{1}{\kappa} b \int_{-h}^h \sigma(y) dy = 0.$$

Преобразуем теперь первый множитель первого слагаемого

$$\int_{-h}^h E^P(\kappa y) dy = \int_{-h}^h \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dy} \frac{1}{\kappa} dy = \frac{1}{\kappa} \sigma(y) \Big|_{-h}^h = \frac{2}{\kappa} \sigma(\kappa h),$$

зависящий от величины напряжений в граничных, наиболее растянутых волокнах балки  $\sigma(\gamma)$ ,  $\gamma = \kappa h$ . Очевидно, что  $\sigma(\kappa h) = \text{const}$ . Тогда условие потери устойчивости процесса деформирования (4) упростится до уравнения

$$2b^2 \kappa \sigma(\kappa h) \cdot \int_{-h}^h E^P(\kappa y) y^2 dy = 0,$$

сократив которое на  $\text{const}$  окончательно имеем

$$\kappa \int_{-h}^h E^P(\kappa y) y^2 dy = 0. \quad (6)$$

Распишем (6) для заданной балки, подставляя функцию касательного модуля,

$$2 \cdot 10^5 \kappa \int_{-50}^{50} (1 - 100\kappa y) \exp(-100\kappa y) y^2 dy = 0.$$

Разрешив интеграл в вычислительном пакете Mathematica 7.0., последнее уравнение сведется к виду

$$\frac{8 \cdot \exp(-5 \cdot 10^3 \kappa) \cdot (1 - \exp(5 \cdot 10^3 \kappa) + 5 \cdot 10^3 \kappa + 1,25 \cdot 10^7 \kappa^2 + 3,125 \cdot 10^{10} \kappa^3)}{5 \kappa^2} = 0.$$

Корни полученного нелинейного алгебраического уравнения найдем в том же вычислительном пакете методом Ньютона с начальным приближением к решению  $\kappa_0 = 0,0001 \text{ мм}^{-1}$ . В результате значение предельной кривизны  $\kappa^* = 0,00029025 \text{ мм}^{-1}$ . Отсюда с помощью второго уравнения (5) критический изгибающий момент определим по формуле

$$M^* = 2b \int_0^h \sigma(\kappa^* y) y dy = 2 \cdot 10^7 \kappa^* \int_0^{50} \exp(-100 \kappa^* y) y^2 dy = \frac{40 \exp(-5 \cdot 10^3 \kappa^*) \cdot (-1 + \exp(5 \cdot 10^3 \kappa^*) - 5 \cdot 10^3 \kappa^* - 1,25 \cdot 10^7 (\kappa^*)^2)}{(\kappa^*)^2}$$

$$M^* = 35,0139 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

Сравним полученный результат с расчетом по допускаемым напряжениям  $[\sigma] = \sigma_B$  с использованием теории неупругого изгиба [6], в которой полагается, что в процессе нагружения разрушение произойдет в крайних наиболее растянутых волокнах балки ( $y = h$ ) при достижении деформации предела прочности  $\varepsilon = \varepsilon_B = 0,01$ . Тогда предельная кривизна  $\kappa_{[\sigma]} = \frac{\varepsilon_B}{h} = 0,0002 \text{ мм}^{-1}$ . По второй формуле (5)

критический момент есть  $M_{[\sigma]} = 80,3 \text{ кН}\cdot\text{м}$ . Данное значение изгибающего момента отличается от  $M^*$  на  $\Delta = 6\%$ .

Также были проведены расчеты балки с круглым поперечным сечением радиуса  $R = 50 \text{ мм}$  и граничным контуром  $\Gamma(y) = \sqrt{R^2 - y^2}$  и двутавровой балки с высотой  $2h = 100 \text{ мм}$  и шириной  $b = 30 \text{ мм}$ , высотой и шириной полков  $d = 15 \text{ мм}$  и  $c = 20 \text{ мм}$ . Граничный контур двутавровой балки определяет следующая кусочно-постоянная функция:

$$\Gamma(y) = \begin{cases} c/2, & -h \leq y < -h + d, \\ b/2, & -h + d \leq y < h - d, \\ c/2, & h - d \leq y < h. \end{cases}$$

Результаты расчетов критического изгибающего момента  $M_{[\sigma]}$  вычисленного традиционным методом, и  $M^*$  с учетом деформационного разупрочнения материала, а также относительная погрешность  $\Delta$  представлены в табл. 1.

Таблица 1 — Значения предельного изгибающего момента, вычисленные по различным теориям

Сечение	$M^*$ , кН·м	$M_{[\sigma]}$ , кН·м	$\Delta$ , %
Прямоугольное	85	80,3	6
Круглое	55,86	50,79	9
Двутавровое	87,83	85,1	3

Таким образом, на примере расчета чистого изгиба балок произвольного сечения из разупрочняющегося материала показана возможность определения реальной критической нагрузки. Данная методика продемонстрирована для определения предельной несущей способности прямоугольной, круглой и двутавровой балок. Показано, что расчет традиционными методами сопротивления материалов приводит к занижению предельных значений разрушающих напряжений. Распространение данной методики на расчет элементов подвижного состава может привести к удешевлению и снижению материалоемкости изделий и деталей подвижного состава железных дорог.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-00186).

## Литература

1. Лукин В.В., Анисимов П.С., Котуранов В.Н. Конструирование и расчет вагонов. М.: ФГОУ «УМЦ», 2011. 688 с.
2. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. М.: Министерство путей сообщения Российской Федерации, 2000. 196 с.
3. Серенсен С.В., Козаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
4. Стружанов В.В., Миронов В.И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. 190 с.
5. Радченко В.П., Еремин Ю.А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. М.: Машиностроение-1, 2004. 265 с.
6. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов. М.: Мир, 1976. 669 с.
7. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. М.: Мир, 1980. 608 с.
8. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф: в 2. кн. М.: Наука, 1977. 742 с.
9. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1970. 492 с.

## References

1. Lukin V. V., Anisimov P. S., Koturanov V. N. Konstruirovaniye i raschet vagonov. [Design and calculation of cars.] M.: FGOU 'UMC', 2011. 688 s.
2. Pravila tehnicheckoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii. [Rules of technical maintenance of the Russian Federation railroads.] M.: Ministerstvo putey soobshheniya Rossijskoy Federatsii [Ministry of Railways of the Russian Federation], 2000. 196 s.
3. Serensen S. V., Kogaev V. P., Shnejderovich R. M. Nesushhaya sposobnost' i raschety detaley mashin na prochnost. [Bearing capacity and calculations of machines details on durability] M.: Mashinostroyeniye [Engineering], 1975. 488 s.
4. Struzhanov V.V., Mironov V.I. Deformatsionnoye razuprochneniye materiala v elementah konstruktsiy. [Deformation weakening of material in constructions elements.] Ekaterinburg: UrO RAN, 1995. 190 s.
5. Radchenko V.P., Eremin Yu.A. Reologicheskoye deformirovaniye i razrusheniye materialov i elementov konstruktsiy. [Rheological deforming and corrupting of materials and constructions elements.] M.: Mashinostroyeniye [Engineering]-1. 2004. 265 s.
6. Timoshenko S.P., Gere Dzh. Mehanika materialov. [Mechanics of materials.] M.: Mir [The World], 1976. 669 s.
7. Poston T., Styuart I. Teoriya katastrof i ee prilozheniya [Catastrophe theory and its applications] M.: Mir [The World], 1980. 608 s.
8. Gilmore R. Prikladnaya teoriya katastrof: v 2. kn. [Gilmore R. Applied catastrophe theory: in two books.] M.: Nauka [Science], 1977. 742 s.
9. Sedov L. I. Mehanika sploshnoy sredy. [Mechanics of continuous medium.] M.: Nauka [Science], 1970. T.1. 492 s.

УДК 656.7.08.3:629.735

**Алексей Валерьевич Малишевский**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Летная эксплуатация и профессиональное обучение авиационного персонала» Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (СПбГУГА),

**Ольга Викторовна Ариничева**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Летная эксплуатация и профессиональное обучение авиационного персонала» Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (СПбГУГА),

**Павел Евгеньевич Бровкин**, аспирант кафедры «Летная эксплуатация и профессиональное обучение авиационного персонала» Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (СПбГУГА)

## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПАРАХ ПИЛОТОВ

**Aleksey V. Malishevsky**, PhD in Engineering, Associated Professor of the Department of 'Flight maintenance and vocational training of aviation staff' of Saint Petersburg State University of Civil Aviation (SPb GU GA).

**Olga V. Arinicheva**, PhD in Engineering, Associated Professor of the Department of 'Flight maintenance and vocational training of aviation staff' of Saint Petersburg State University of Civil Aviation (SPb GU GA).

**Pavel E. Brovkin**, postgraduate of the Department of 'Flight maintenance and vocational training of aviation staff' of Saint Petersburg State University of Civil Aviation (SPb GU GA)

## The Analysis Of Experiments By Interaction Efficiency In Couples Of Pilots

### Аннотация

Исследованы результаты оценки эффективности взаимодействия в парах пилотов с использованием интертипных отношений В.В. Гуленко. Это анализ результатов ряда экспериментов, которые были проведены в течение 1999 — 2012 гг. В статье предложен новый прогностический соционический критерий для оценки эффективности взаимодействия в экипаже воздушного судна. Авторы приводят корреляции полученных соционических параметров с результатами цветовой социометрии по методике А.М. Эткинды и с результатами специальных компьютерных испытаний. Рассмотрено новое специальное компьютерное упражнение «КроссЧек 2». Приводятся результаты выполненного эксперимента.

**Ключевые слова:** интертипные отношения, соционические модели, психодиагностика, управление ресурсами экипажа.

### Abstract

In this article, we researched results of efficiency assessment of interaction in couples of pilots with the use of intertype relations of V. V. Gulenko. It is the analysis of number of experiments results which took place during 1999-2012. In the article the new prognostic socionomic criterion for an efficiency assessment of interaction in aircraft crew is offered. In this article, we also give correlations of the received socionomic parameters with results of color sociometry by A.M. Etkind's technique and special computer tests results. New special computer exercise 'KrossChek 2' is considered. Results of the made experiment are given.

**Key words:** intertype relations, socionomic models, psychodiagnostics, crew resource management.

**В** настоящее время в авиации, как и во многих других сложных технологических системах, остро стоит проблема управления рисками с целью реализации прогностических или хотя бы проактивных методов управления безопасностью. При этом в соответствии с существующими международными нормами принимается следующее общее для сложных систем определение безопасности по ISO-8402: «Безопасность — состояние, при котором риск вреда (персоналу) или ущерб ограничены допустимым уровнем».

Отсюда безопасность полетов (БП) воздушных судов гражданской авиации представляет собой состояние авиационной транспортной системы, при котором риск причинения вреда людям или нанесения ущерба имуществу снижен до приемлемого уровня и поддерживается на этом либо более низком уровне посредством непрерывного процесса выявления источников опасности и контроля факторов риска.

Меру риска предлагается определять с учетом свойств изучаемых случайных событий и процессов. Двойственное толкование понятия «риск» и как меры, и как события отвечает запросам практики. Отсюда принимаются следующие предложения [1, 2]:

- постулат 1 — о структуре риска: риск случайное событие, определяемое некоторой структурой процессов;
- постулат 2 — о двойственности свойств риска: правомерно принять несколько возможных мер риска для отражения разных его свойств.

На основании постулата 1 принимается, что риски порождаются системами  $S_R$  в которых случайное рискованное событие осуществляется как некоторая цепочка событий, образующих сценарий развития процесса в заданной системе (транспортной и т. д.). Такие системы  $S_R$  являются носителями

риска. В соответствии с постулатом 2 вводятся две возможных меры риска [1, 2]:

- мера 1-го рода  $\mu_{R1}$ , оценивающая возможность появления рисков события и зависящая от меры случайности возникновения отдельных событий в заданных структурах изучаемых процессов в конкретном сценарии;
- мера 2-го рода  $\mu_{R2}$ , обозначающая непосредственную измеримую опасность возможной рисков ситуации или событий с учетом структуры процессов.

В объектах  $S_R$  такого типа, как авиационная транспортная система (АТС), при возникновении рисков события порождается некоторый ущерб  $H_{R'}$ , что обозначает ухудшение или потерю свойств материального объекта. К  $S_R$  можно отнести и системы обеспечения БП, так как в них могут иметь место потери материальных объектов и персонала (пассажиров). Ущерб  $H_R$  для  $S_R$  может быть выражен в стоимостном эквиваленте объекта или в виде материальных потерь (потери единиц боевой техники, количество разбившихся ВС, число человеческих жертв и т. п.). Меры  $\mu_{R1}$  и  $\mu_{R2}$  — первого и второго рода, очевидно, некоторым образом связаны, но не совпадают, так как отражают различные свойства и стороны риска как события. Задача состоит в разработке схемы оценивания величины риска, степени риска и других показателей опасности с помощью введенных мер риска. По мнению Е.А. Куклева, схема решения такой задачи о вычислении рисков основана на использовании понятия БП с учетом человеческого фактора (ЧФ) как составного элемента среди множества свойств в агрегированной системе SHELL [3]. Определение безопасности принимается по ISO-8402 в представленном выше виде. Величина риска оценивается с помощью введенных мер 1-го и 2-го рода. Новым и приоритетным шагом Е.А. Куклева является использование меры 2-го рода для оценки и измерения опасности в рисков ситуации [2, 4], и один из основных тезисов теории авторов данной работы заключается в том, что риск — это дискретное событие  $A_i$  в виде цепи

$$A_i = L_i(q_{i0}, q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in}), \quad (1)$$

где  $q_{ij}$  — элементы цепи.

Далее, если в цепи событий имеются элементы или звенья с определенным уровнем опасности или риска  $m_i$ , где  $i$  — номер элемента в цепи, то общий риск опасности, а точнее, мера риска  $\mu_{R2}$  для данной цепи  $L_i$ , аддитивна и является суммой рисков элементов

$$\mu_{R2} \sum_{\xi \in \Xi} \beta_{\xi} = \sum_{i(\beta)} m_i(P), \quad (2)$$

где  $\beta_{\xi}$  — номер цепи событий на множестве  $\Xi$  альтернативных цепей;

$P$  — распределение вероятностей, от которых в общем случае могут зависеть (теоретически) частные риски  $m_i$ .

Элементарные риски  $m_i(P)$  назначаются, например, экспертным путем, как в CFIT [4], или на основе нечеткой логики [5]. В основе этого выражения лежат свойства агрегированной системы, базирующейся на идее SHELL [3] и аксиоматике, вероятностного пространства, кроме того, используется теория цепей Дж. Ризона [3].

В случае управляемых рисков [1 — 2, 6] для оценки степени риска может быть применен метод «суммы рисков и шансов» [1 — 2, 6]. При этом учитываются факторы, увеличивающие опасность, и факторы воздействия на ситуацию по уменьшению опасности. Соответственно можно записать

$$\mu_{R\Sigma} = \sum_1 m_{i1}(L_R) - \sum_2 m_{i2}(L_R) = \Delta_{12}, \quad (3)$$

где  $m_{i1}$  — коэффициенты риска опасности со знаком минус;  $m_{i2}$  — шансы благоприятных результатов при воздействии на риск как событие со знаком плюс;  $\Delta_{12}$  — невязка или дефект риска [1 — 2].

Величина дефекта риска  $\Delta_{12}$  вычисленная, например, в ГА с помощью шкалы Check-List [1, 4], дает фактический обнаруживаемый предел опасности полета или риска опасности. Если эта величина  $\Delta_{12}$  близка к границам допустимых значений  $\Delta_{12}^*$ , то риск считается большим. Теоретически соотношение (3) означает воздействие на цепочку Дж. Ризона [1, 3] или управление рисками. Практически же производится коррекция работы в транспортной системе по критерию безопасности.

Общепризнано, что большинство происшествий обусловлены ошибками человека, являющегося последним звеном в цепочке факторов, которые приводят к происшествию, т. е. человеческим фактором, и одна из важнейших составляющих этого фактора — взаимодействие в экипаже летательного аппарата (ЛА), которое также необходимо оценить с точки зрения его влияния на безопасность. Но чтобы можно было ставить вопрос о воздействии на этот фактор риска, необходимо рассмотреть ситуацию с комплектованием экипажей в целом.

В настоящее время идеология таких фирм, как Boeing и Airbus, не предполагает исследование проблемы комплектования экипажей ЛА гражданской авиации (ГА), хотя психологическая совместимость членов экипажа очевидным образом напрямую связана с проблемой БП. Считается, что пилот-профессионал, прошедший обучение по программе CRM [3, 7, 8], способен взаимодействовать с другим подобным ему профессионалом без каких-то особых проблем. Практика полетов показывает, что по крайней мере для нашей страны этого обучения по программе CRM явно недостаточно. (Если вспомнить катастрофы в Ярославле, Донецке и особенно в Перми, где в выводах МАК напрямую сказано, что «по мнению независимых экспертов-психологов, при комплектовании экипажа не были учтены психологические особенности личностей пилотов».) Причины этого, судя по всему, кроются в серьезных особенностях российского менталитета, что было частично рассмотрено в монографии [8], и обсуждение этих причин выходит далеко за пределы данной работы.

В РФ в настоящее время вопросы комплектования экипажей формально определяются «Руководством» [9], которое в соответствующей главе отсылает к «Рекомендациям» [10], давно и безнадежно устаревшим. Сами авторы упомянутых «Рекомендаций» прямо указывают на то, что «настоящие рекомендации следует рассматривать как начальное звено поэтапно осуществляемой системы мероприятий по организации и совершенствованию производственных и межлич-

ностных отношений в подразделениях ГА. Предполагается, что с получением дополнительных данных будут предложены конкретные мероприятия по коррекции отношений в системе морально-психологического климата коллектива и способы психолого-педагогических воздействий на отдельных лиц» [10], т. е., проще говоря, по мнению самих же авторов, «Рекомендации» [10] являются недоработанными.

Еще сложнее обстоит дело в военной авиации. Согласно «Ежемесячным экспресс-бюллетеням по аварийности» за период 1998 — 2011 гг., ведущее место в совокупности причин авиационных происшествий (АП) по ЧФ занимает нарушение взаимодействия в экипаже [11]. Характер указанных нарушений основан прежде всего на неоптимальном комплектовании летных экипажей, что, в свою очередь, осложняет выполнение полетных заданий. Формирование экипажей, как правило, происходит без научно обоснованных программ, методик и рекомендаций. Командному составу приходится на свое усмотрение составлять боевой расчет, в котором и состоят эти экипажи. Несмотря на то что при формировании экипажей военных самолетов постоянно проводятся тренажи по взаимодействию членов экипажа, этого совсем недостаточно. А других способов решения данной проблемы в строевых частях на данный момент не существует или по крайней мере не используется, так как это не регламентировано ни одним документом. С командным составом не проводятся занятия по специальной подготовке в области ЧФ, так как в армии специалистов в этом виде подготовки не хватает. В строевых частях они и вовсе отсутствуют. Вот и приходится авиационным командирам всех степеней комплектовать экипажи по старинному дедовскому способу [11].

В данной статье, которая является прямым продолжением наших исследований [12 — 16], изучается вопрос комплектования экипажей ЛА на базе соционического подхода. При этом, поскольку речь идет о соционике [14], естественно, рассматривается только информационный аспект взаимодействия между людьми. Для создания прогностического критерия нами была использована предложенная ранее в [17] соционическая модель интертипных отношений (СМИО), построенная на базе теории нечетких множеств, разработанной Л. Заде [5]. В работе [15] был предложен критерий  $\bar{z}_{02}$ , а затем его уточненная версия в виде критерия  $\bar{z}_{03}$  [18, 19]. Однако, поскольку далее вместо четвертой версии [16] соционического теста ММ-1 [20] стала использоваться пятая, был преобразован и критерий  $\bar{z}_{03}$ , который рассчитывается в настоящей статье на основе получаемой для пары людей СМИО из выражения

$$\bar{z}_{04} = \bar{z}_{(+)} - \bar{z}_{(-)}, \quad (4)$$

где  $\bar{z}_{(+)} = (6\Omega_1 + 6\Omega_3 + 6\Omega_5 + 6\Omega_7 + 3\Omega_9 + 3\Omega_{11} + 3\Omega_{13} + 3\Omega_{15})/8$ ;  $\bar{z}_{(-)} = (6\Omega_{16} + 6\Omega_{14} + 6\Omega_{12} + 6\Omega_{10} + 3\Omega_8 + 3\Omega_6 + 3\Omega_4 + 3\Omega_2)/8$ ;  $\Omega_j$  — составляющая СМИО(Г) [9, 10, 14, 15] для  $j$ -го интертипного отношения (ИО) по В.В. Гуленко [21] (табл. 1).

Для проверки правильности данного критерия  $\bar{z}_{04}$  в настоящей статье использованы данные, полученные в период 2003 — 2012 гг., когда под руководством А.В. Малишевского его аспирантами и дипломниками проводился ряд экспе-

Таблица 1 — Корреляции между составляющими соционической модели интертипных отношений (для интертипных отношений по В.В. Гуленко), а также общему прогностическому показателю эффективности взаимодействия  $\bar{z}_{04}$  и суммарной нормативностью  $N$ , определенной по А.М. Эткинду в парах пилотов

Интертипные отношения по В.В. Гуленко			Пилоты (343 человека, 2255 пар)		
			$r_{\text{корр.}}$	Значимость корреляции	Ранг
1	1111	Тожество	-0,0456	$P > 0,95$	4
2	1110	Квазитожество	+0,0432	$P > 0,95$	11
3	1101	Радиородство	-0,0574	$P > 0,99$	1
4	1100	Рациозаказ	+0,0314	$P \leq 0,95$	10
5	1011	Иррациородство	-0,0486	$P > 0,95$	3
6	1010	Иррациозаказ	+0,0470	$P > 0,95$	12
7	1001	Суперэго	-0,0538	$P > 0,95$	2
8	1000	Активация	+0,0290	$P \leq 0,95$	9
9	0111	Нейтрализация	-0,0302	$P \leq 0,95$	8
10	0110	Зеркальность	+0,0570	$P > 0,99$	15
11	0101	Радиомираж	-0,0355	$P \leq 0,95$	5
12	0100	Иррациоревизия	+0,0409	$P \leq 0,95$	14
13	0011	Иррациомираж	-0,0330	$P \leq 0,95$	7
14	0010	Рациоревизия	+0,0596	$P > 0,99$	16
15	0001	Дуализация	-0,0331	$P \leq 0,95$	6
16	0000	Конфликт	+0,0379	$P \leq 0,95$	13
$\bar{z}_{04}$			-0,0517	$P > 0,95$	

риментов в различных авиакомпаниях. В качестве исходных были использованы данные соционической диагностики, полученные с помощью теста ММ-1 [20] (в уточненной пятой версии), и данные цветовой социометрии по А.М. Эткинду, полученные с помощью теста ЦТО [8, 22]. На основе двух этих методик было проведено обследование 343 человек из различных авиакомпаний, таких как «Оренбургские авиалинии», «Нордавиа», «Донавиа», «Ямал», «Норд Винд», «Якутия», «Татарстан», «Белавиа», «Узбекистан Хаво Йуллари» и др. (см. табл. 1).

Географическая принадлежность участников эксперимента была достаточно разнообразной: от Минска до Якутска и от Салехарда до Ташкента. Были обследованы представители России, Белоруссии и Узбекистана. Возраст участников колебался от 20 до 55, но в основном это были люди 25-35 лет, практически все (кроме одной) участники — мужчины.

Для оценки качества критерия  $\bar{z}_{04}$  рассматривалась, как и в более ранних работах [12 — 16, 18, 19, 23, 24], его корреляция с суммарной нормативностью  $N$ , а в ряде случаев и с валентностью  $V$ , а также с суммарной оценкой по ЦТО  $\Sigma_{V/N}$ , рассчитанной по методике А.М. Эткинды [22]. Данные о корреляциях, полученных для составляющих СМИО(Г) и суммарной нормативности в парах для пилотов авиакомпаний РФ, Белоруссии и Узбекистана (343 человека, 2255 пар), приведены в табл. 1.

Подтвердилось, что «благоприятность» ИО по-разному связана с различными психологическими дихотомиями (ПД).





Ранее, например в [14, 18], предполагалось, что на «благоприятность» ИО в паре отрицательно влияет любое несовпадение по любой из четырех ПД. Однако, как хорошо видно из табл. 1, крайне неблагоприятным будет несовпадение по ПД «рациональность — иррациональность» (четвертая позиция в четырехразрядном коде).

Также однозначно неблагоприятным, хоть и в меньшей степени, будет и несовпадение по ПД «экстраверсия — интроверсия» (первая позиция в четырехразрядном коде). А вот с несовпадением по психологическим дихотомиям «логика — этика» (вторая позиция в четырехразрядном коде) и «сенсорика — интуиция» (третья позиция в четырехразрядном коде) уже не все так просто. Их влияние на «благоприятность» ИО вторично и гораздо слабее, чем влияние несовпадения по ПД «экстраверсия — интроверсия» и, тем паче, по ПД «рациональность — иррациональность», фактически им можно пренебречь, ибо оно почти несущественно. Пока что-либо по этому поводу сказать сложно, так как все полученные результаты находятся на пределах точности измерений (и, пожалуй, даже за ее пределами). Разумеется, что суммарная нормативность — это комплексный показатель, учитывающий предысторию отношений в данной паре людей, а критерий  $\chi_{04}$  как и критерии  $\chi$  [12 — 14],  $\chi_{02}$  [15], а также  $\chi_{03}$  [18, 19], оценивает удобство в первую очередь информационного обмена (взаимопонимания, эмоциональной взаимной приемлемости) в паре. Поэтому сила корреляции между этими величинами очень слабая ( $r_{\text{корр.}} < 0,2$ ), что вполне естественно. Зато значимость полученных корреляций довольно высока, невзирая на малые значения коэффициента корреляции. Представляется, что полученные результаты весьма важны не только сами по себе, но и потому, что позволяют более точно планировать дальнейшие эксперименты. Особенно важно учитывать это при планировании экспериментов с использованием различных программных продуктов [13, 14, 16, 23, 24].

В период с 1999 по 2012 г. А.В. Малишевским, Н.Ф. Михайликом, Н.Н. Коротковым, И.А. Парфеновым, П.Е. Бровкиным и Е.В. Власовым велась разработка различных программных продуктов, которые позволили бы осуществлять непосредственное определение эффективности взаимодействия в паре. В проведенных авторами настоящей статьи исследованиях, кроме разработанных А.В. Малишевским и Е.В. Власовым специальных компьютерных программ «Азеф» (описана в [23]) и Ring-2 (описана в [24] как «Кольцо»), «КроссЧек 1» и «КроссЧек 2», были использованы также специальные компьютерные программы «Чкаловский-2», разработанная А.В. Малишевским и П.Е. Бровкиным, и «Гомеостат», разработанная А.В. Малишевским и И.А. Парфеновым (описана в [16]). Как видно из табл. 2 — 5, пока достаточно удовлетворительного решения данной проблемы не найдено. Результаты тестирования не слишком хорошо стыкуются между собою.

В табл. 2 — 5 использованы следующие обозначения:  
 $T_{\text{Azef}}$  — время удержания «планки» в пределах допустимых ограничений;  
 $T_{\text{Chk.}}$  — время прохождения управляемым объектом маршрута № 1 в упражнении «Чкаловский-2»;  
 $T_{\text{Ring}}$  — время прохождения управляемым объектом заданной траектории;  
 $L_{\text{cp.}}$  (м) — среднее линейное боковое уклонение управляемого объекта на заключительном (протяженностью 2 км) участке заданной траектории;  
 $L_{\text{max}}$  (м) — максимальное линейное боковое уклонение управляемого объекта на заключительном (протяженностью 2 км) участке траектории;  
 $N_{\text{ош.}}$  — количество совершенных ошибок за период 300 с;  
 $\psi_1$  — средний балл по двум испытуемым за выполнение упражнения «КроссЧек 2» (худший результат);  
 $\psi_2$  — средний балл по двум испытуемым за выполнение упражнения «КроссЧек 2» (лучший результат).

Таблица 2 — Корреляции, выявленные между показателями  $\chi_{04}$ ,  $N$ , а также величинами  $T_{\text{Ring}}$ ,  $T_{\text{Azef}}$ ,  $N_{\text{ош.}}$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $L_{\text{cp.}}$  и  $L_{\text{max}}$  при обследовании 33 пар участников эксперимента

1-я величина \ 2-я величина	$\chi_{04}$	$N$	$T_{\text{Ring}}$	$T_{\text{Azef}}$	$N_{\text{ош.}}$	$\psi_1$	$\psi_2$	$L_{\text{cp.}}$	$L_{\text{max}}$
$\chi_{04}$		-0,1646	-0,3954	-0,0490	-0,1526	-0,0488	+0,2385	-0,0458	-0,0537
$N$	$P \leq 0,95$		+0,0605	+0,0614	+0,0735	-0,0884	-0,0340	+0,0030	+0,2893
$T_{\text{Ring}}$	$P > 0,95$	$P \leq 0,95$		+0,0526	+0,0174	+0,0891	+0,0499	-0,2168	-0,1898
$T_{\text{Azef}}$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$		+0,2347	-0,0934	-0,0692	-0,1734	-0,1448
$N_{\text{ош.}}$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$		-0,3424	-0,4142	+0,2051	+0,1489
$\psi_1$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$			+0,7493	+0,2024	+0,1808
$\psi_2$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P > 0,95$	$P > 0,999$		-0,0153	+0,0703
$L_{\text{cp.}}$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$		+0,7956
$L_{\text{max}}$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P > 0,999$	

Примечание. В табл. 2 — 5 справа и вверху приведены значения коэффициента корреляции Пирсона между данными показателями эффективности, а слева и внизу — характеристики значимости корреляции [20].

**Таблица 3 — Корреляции, выявленные между показателями  $\Sigma_{04}$ ,  $N$ ,  $V$ ,  $\Sigma_{V/N}$  а также величинами  $T_{Ring}$ ,  $T_{Azef}$ ,  $T_{Chk}$ ,  $N_{ош.}$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $L_{cp.}$  и  $L_{max}$  при обследовании 11 пар участников эксперимента**

1-я величина \ 2-я величина	$\Sigma_{04}$	$N$	$V$	$\Sigma_{V/N}$	$T_{Ring}$	$T_{Azef}$	$T_{Chk}$	$N_{ош.}$	$\psi_1$	$\psi_2$	$L_{cp.}$	$L_{max}$
$\Sigma_{04}$		-0,2083	+0,3476	+0,1089	-0,7946	+0,2702	-0,0498	-0,0008	+0,4159	+0,6146	+0,3452	+0,1368
$N$	$P \leq 0,9$		+0,0382	+0,6989	+0,3037	-0,2454	+0,2485	+0,2391	-0,5270	-0,3068	-0,3863	+0,5029
$V$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$		+0,7413	-0,3062	+0,2576	-0,0151	-0,1361	+0,1651	-0,0244	-0,2802	-0,2769
$\Sigma_{V/N}$	$P \leq 0,9$	$P > 0,95$	$P > 0,999$		-0,0151	+0,0196	+0,1561	+0,0631	-0,2358	-0,2235	-0,4600	+0,1396
$T_{Ring}$	$P > 0,999$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$		-0,4880	+0,0595	+0,0024	-0,4360	-0,5076	-0,3601	+0,0383
$T_{Azef}$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$		-0,6004	+0,2118	-0,1008	-0,2973	-0,0583	-0,3720
$T_{Chk}$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P > 0,9$		-0,2645	+0,4667	+0,3270	-0,2326	-0,0346
$N_{ош.}$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$		-0,1316	-0,2898	+0,5237	+0,5879
$\psi_1$	$P \leq 0,9$	$P > 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$		+0,7262	+0,3372	-0,2606
$\psi_2$	$P > 0,95$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P > 0,95$		+0,4098	+0,0670
$L_{cp.}$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P > 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$		+0,5506
$L_{max}$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P > 0,9$	$P \leq 0,9$	$P \leq 0,9$	$P > 0,9$	

**Таблица 4 — Корреляции, выявленные между показателями  $\Sigma_{04}$ ,  $N$ , а также величинами  $T_{Azef}$ ,  $N_{ош.}$ ,  $\psi_1$  и  $\psi_2$  при обследовании 62 пар участников эксперимента**

1-я величина \ 2-я величина	$\Sigma_{04}$	$N$	$T_{Azef}$	$N_{ош.}$	$\psi_1$	$\psi_2$
$\Sigma_{04}$		-0,1808	-0,0646	+0,0133	+0,0079	+0,0903
$N$	$P \leq 0,95$		-0,0175	+0,1058	-0,2429	-0,0877
$T_{Azef}$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$		+0,1386	-0,0711	-0,0576
$N_{ош.}$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$		-0,1879	-0,2101
$\psi_1$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$		+0,7188
$\psi_2$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P > 0,999$	

**Таблица 5 — Корреляции, выявленные между показателями  $\Sigma_{04}$ ,  $N$ , а также величинами  $T_{Ring}$ ,  $T_{Azef}$ ,  $\psi_1$  и  $\psi_2$  при обследовании 52 пар участников эксперимента**

1-я величина \ 2-я величина	$\Sigma_{04}$	$N$	$T_{Ring}$	$T_{Azef}$	$\psi_1$	$\psi_2$
$\Sigma_{04}$		-0,3029	-0,2302	-0,1489	-0,1091	+0,1108
$N$	$P > 0,95$		-0,0739	+0,0666	-0,0933	-0,0096
$T_{Ring}$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$		+0,0508	-0,0468	-0,1147
$T_{Azef}$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$		-0,0868	-0,0131
$\psi_1$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$		+0,7516
$\psi_2$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P \leq 0,95$	$P > 0,999$	

Как видно из табл. 2 — 5, наибольшие расхождения с остальными результатами дали валентность  $V$ , суммарная оценка по ЦТО  $\Sigma_{V/N}$  [8, 22], а также время удержания «планки» в пределах допустимых ограничений  $T_{Azef}$  в упражнении «Азеф» [23] и время прохождения управляемым объектом маршрута № 1  $T_{Chk}$  в упражнении «Чкаловский-2». «Чкаловский-2» — это разминочная задача для отработки моторного взаимодействия в паре и контроля его эффективности, основанная на принципе гомеостата [25, с. 293]. Она, скорее всего, будет заменена, так как в ней, как и в упражнении Ring-2 [24], очень мал разброс получаемых результатов. Другим упражнением на моторное взаимодействие является упражнение «Азеф» [23], в задачу которого дополнительно входит развитие антиципации у пилота. Будучи очень полезным для обучения и разминки, оно слишком чувствительно к случайным ошибкам, что существенно снижает его возможности для диагностики эффективности взаимодействия.

Упражнение «КроссЧек 1» является задачей для отработки когнитивно-моторного взаимодействия в паре в режиме перекрестного контроля и оценки его эффективности. Как видно из табл. 2 — 5, оно показало достаточно надежное совпадение практически со всеми результатами эксперимента, кроме результатов по упражнению «Азеф». Однако здесь приходится сталкиваться с еще одной проблемой. Для старших возрастных групп возникают трудности, связанные с использованием персонального компьютера: при отличной реакции и достаточной слаженности действий пожилые пилоты имеют недостаточный уровень моторного навыка применения устройств ввода-вывода, что негативно сказывается на времени выполнения упражнения и результате. (Проще говоря, у некоторых пожилых пилотов есть проблемы с нахождением необходимых символов на клавиатуре.) В то же время для молодого поколения эта проблема практически неактуальна, следовательно, возникает дополнительная корреляция результатов эксперимента и возраста испытуемых.

Наиболее интересным и перспективным на данный момент представляется упражнение «КроссЧек 2». Оно преследует те же цели, что и «КроссЧек 1», однако в нем действия испытуемых строго разделены и не имеют ничего общего до возникновения специальных abnormal ситуаций, требующих совместных действий обоих испытуемых. В нормальном режиме первый испытуемый должен определенным образом реагировать на появляющиеся цифры путем нажатия определенных клавиш. В то время как второй испытуемый с помощью управляющих клавиш удерживает две периодически изменяющиеся величины на минимально возможном отклонении от начальной позиции (рис. 1).

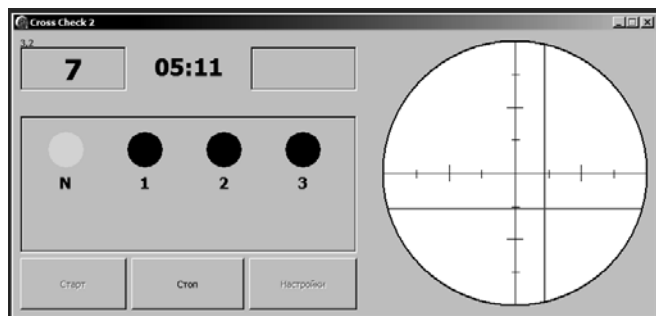


Рисунок 1 — Графический интерфейс программного продукта «КроссЧек 2»

В данном упражнении роли участников строго распределены. Слева располагается pilot monitoring (PM), его зона ответственности — левая часть клавиатуры, находящаяся левее линии, соединяющей клавиши «Prt Scrn» и «←», а также левое окошко (ЛО), которое расположено в верхней части графического интерфейса. Справа располагается pilot flying (PF), его зона ответственности — правая часть клавиатуры, находящаяся правее линии, соединяющей клавиши «F12» и «Ctrl», а также еще и правое окошко (ПО) в верхней части графического интерфейса и курсоглиссадный индикатор (КГИ), занимающий всю правую часть графического интерфейса и имеющий вид окружности с двумя движущимися перпендикулярно друг другу красными планками (см. рис. 1).

В normal ситуации после начала игры планки КГИ под воздействием «помехи» начинают перемещаться вправо-влево и вверх-вниз, и тогда PF должен удерживать их как можно ближе к центру КГИ с помощью управляющих клавиш. В ЛО появляются с определенной периодичностью цифры, на которые уже PM должен тоже определенным образом реагировать с помощью соответствующих управляющих клавиш.

Abnormal ситуация возникает в виде цифры в интервале от 2 до 7 в ПО, на которую участникам также необходимо реагировать до истечения заданного времени (рекомендованное значение — 20 с) последовательным нажатием PF и PM управляющих клавиш в определенной комбинации. Здесь задача участников — не допустить «отказа системы» в abnormal ситуации и сделать минимально возможное количество ошибок в normal ситуации за заданный период времени (5 мин 20 с). Ошибкой считается любое неверное нажатие управляющих клавиш (не тех, несвоевременно или не в том порядке) для PM и отклонение планок КГИ от центрального положения для PF.

Рекомендуемые критерии оценивания эффективности взаимодействия с помощью программного продукта «КроссЧек 2» ( $B_1, B_2, B_3, B_4, B_{3M}, B_{4M}, B_5, B_6$ ) приведены в табл. 6. Наличие хотя бы одного «отказа системы» исключает положительную оценку у обоих участников, а наличие ошибок в abnormal ситуации у любого из участников исключает оценку отлично у данного участника. Оценка участнику дается по итогам его действий в normal ситуации: PM — по числу ошибок, PF — как средняя оценка по 4 параметрам ( $S_{\text{макс.кур.}}$ ,  $S_{\text{макс.гл.}}$ ,  $S_{\text{ср. кур.}}$ ,  $S_{\text{ср.гл.}}$  — отклонения максимальные по курсу и глиссаде и средние по курсу и глиссаде соответственно).

Каждый участник выполняет данное упражнение дважды — как PM и как PF. Порядок выведения итоговой оценки по этому упражнению для пары приведен в табл. 7.

Таблица 6 — Измеряемые показатели эффективности взаимодействия, использованные в процессе эксперимента в упражнении «КроссЧек 2»

№	Источник Данных	Показатель эффективности взаимодействия
Данные упражнения с использованием компьютерных программ «КроссЧек 2»		
1	$B_1$	Количество ошибок в normal ситуации
2	$B_2$	Процент ошибочных действий первого типа в abnormal ситуации
3	$B_3$	Среднее отклонение по курсу
4	$B_4$	Среднее отклонение по глиссаде
5	$B_{3M}$	Максимальное отклонение по курсу
6	$B_{4M}$	Максимальное отклонение по глиссаде
7	$B_5$	Процент ошибочных действий второго типа в abnormal ситуации
8	$B_6$	Количество не ликвидированных abnormal ситуаций

Таблица 7 — Критерии оценки эффективности взаимодействия, использованные в процессе эксперимента в упражнении «КроссЧек 2»

Условие	Оценка
Если $B_6 \neq 0$ то:	$\psi = 0$
Если $B_6 = 0$ то:	
Если $B_2 > 10\%$	$\psi_{PM} = 1$
Если $B_2 \leq 10\%$	
	$\psi_{PMN} = f(B_1)$
Если $B_3 > 10\%$	$\psi_{PF} = 1$
Если $B_5 \leq 10\%$	
	$\psi_{PFN} = (f(B_3) + f(B_{3M}) + f(B_4) + f(B_{4M}))/4$
Если $10\% > B_2 > 0$	$\psi_{PM} = \psi_{PMN} - 0,5$
Если $10\% > B_5 > 0$	$\psi_{PF} = \psi_{PFN} - 0,5$
Если $B_2 = 0$	$\psi_{PM} = \psi_{PMN}$
Если $B_5 = 0$	$\psi_{PF} = \psi_{PFN}$
$\psi = (\psi_{PF} + \psi_{PM})/2$	

Поскольку данное упражнение выполнялось дважды, т. е. каждый испытуемый выступал и в роли PF, и в роли PM, то выводились две оценки: худший результат ( $\psi_1$ ) и лучший результат ( $\psi_2$ ).

К сожалению, недостаточное количество данных, собранных с помощью специальных программных продуктов, не позволяет сделать однозначно достоверных выводов. Тем не менее анализ данных по 2255 парам показал, что в целом корреляции между суммарной нормативностью и критерием  $\chi_{04}$  вполне отвечают теоретическим предпосылкам и хорошо

согласуются с данными, ранее полученными на кафедре 21 СПбГУГА.

Это подтверждает в целом выводы, сделанные в работах [12 — 16, 18, 19, 23, 24], о том, что величина  $\chi_{04}$  и аналогичные ей достаточно приемлемы в качестве прогностического соционического критерия эффективности. Однако незначительная статистика, набранная по непосредственной оценке эффективности с помощью специальных компьютерных программ, не позволяет пока делать какие-либо далеко идущие выводы. Очевидно, что требуется дальнейшее накопление экспериментальных данных.

## Литература

1. Куклев Е.А. Критерии количественного измерения рисков при оценке безопасности на транспорте // *Актуальные проблемы транспорта : сб. науч. тр. Т. 2. РАТ / С.-Петербург. гос. ун-т водн. коммуникаций. СПб., 2001. С. 168 — 171.*
2. Куклев Е.А. Безопасность и управление рисками сложных систем с учетом требований к надежности изделий // *Вестник С.-Петербурга. гос. ун-та гражданской авиации, 2010. № 1. С. 5 — 11.*
3. Руководство по обучению в области человеческого фактора. Док. 9683-AN/950. 1-е изд. Монреаль : ICAO, 1998. 370 с.
4. Кармалев Б.А. Учебно-методическое пособие по проблеме CFIT. СПб. : Изд-во С.-Петербург. академии гражданской авиации, 2002. 91 с.
5. Zadeh L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // *Fuzzy sets and Systems. 1978. № 1. P. 3 — 28.*
6. Буянов В.П., Кирсанов К.А., Михайлов Л.М. Рискология (управление рисками) : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. М. : Экзамен, 2003. 384 с.
7. Блейк Р.Р., Маутон Дж. С. Cockpit Resource Management (CRM). В 2 кн. Кн. 2 : Управление ресурсами кабины согласно сетке «Грид». 2-е изд. Остин : Сайентифик Методс, Инк., 1990. 133 с.
8. Лейченко С.Д., Малишевский А.В., Михайлик Н.Ф. Человеческий фактор в авиации. В 2 т. Т. 1. СПб. : Изд-во С.-Петербург. гос. ун-та гражданской авиации; Кировоград : Гос. летная академия Украины, 2006. 480 с.
9. Руководство по психологическому обеспечению отбора, подготовки и профессиональной деятельности летного и диспетчерского состава гражданской авиации Российской Федерации : утв. Министерством транспорта РФ. М. : Воздушный транспорт, 2001. 279 с.
10. Рекомендации по комплектованию летных экипажей и обеспечению оптимального морально-психологического климата (ч. I и II). М. : ГосНИИГА, 1985. 43 с.
11. Бровкин П.Е. Проблема комплектования летных экипажей в военной авиации вооруженных сил РФ // *Проблемы летной эксплуатации и безопасность полетов : межвуз. сб. науч. тр. Вып. V. СПб. : СПбГУГА, 2011. С. 71 — 75.*
12. Исследование методов управления в сфере воздушного транспорта с использованием соционических моделей / О.В. Ариничева, Г.В. Коваленко, А.В., Малишевский, И.А., Парфенов, М.В. Петрова // *Полет. 2008. № 1. С. 45 — 49.*
13. Малишевский А.В., Ариничева О.В. Исследование методов и средств управления и планирования в сфере воздушного транспорта на базе соционических моделей // *Науч. вестн. МГТУГА. 2008. № 125 (1). С. 186 — 190.*
14. Лейченко С.Д., Малишевский А.В., Михайлик Н.Ф. Человеческий фактор в авиации. В 2 т. Т. 2. СПб. : Изд-во С.-Петербург. гос. ун-та гражданской авиации; Кировоград : Гос. летная академия Украины, 2006. 512 с.
15. Малишевский А.В., Парфенов И.А. Использование соционических моделей для управления и планирования в сфере воздушного транспорта // *Науч. вестн. МГТУГА. 2010. № 154 (4). С. 117 — 123.*
16. Ариничева О.В. Совершенствование методов управления ресурсами системы «экипаж — воздушное судно» путем снижения отрицательного влияния человеческого фактора на безопасность полетов : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.14 : защищена 27.06.08 : утв. 10.10.08. СПб., 2008. 199 с.
17. Лейченко С.Д., Малишевский А.В., Михайлик Н.Ф. Соционическая модель экипажа // *Подготовка авиационного персонала в области человеческого фактора : межвуз. сб. науч. тр. / Академия ГА. СПб., 1998. Вып. 1. С. 30 — 35.*
18. Малишевский А.В., Ариничева О.В., Бровкин П.Е., Шакиров А.Э. Проблема оценки эффективности взаимодействия в паре пилотов с использованием интертипных отношений В.В. Гуленко // *Проблемы летной эксплуатации и безопасность полетов : межвуз. сб. науч. тр. / СПбГУГА, 2010. Вып. IV. С. 47 — 50.*
19. Результаты оценки эффективности взаимодействия в парах пилотов с использованием интертипных отношений В. В. Гуленко / А.В. Малишевский, П.Е. Бровкин, В.В. Тараканов, В.А. Филаретов // *Проблемы летной эксплуатации и безопасность полетов : межвуз. сб. науч. тр. / СПбГУГА, 2011. Вып. V. С. 196 — 201.*
20. Специальная подготовка в области человеческого фактора : методические указания по проведению психологической диагностики / Сост. О.В. Ариничева, А.В. Малишевский. СПб. : СПбГУГА, 2010. 74 с.
21. Гуленко В.В. Какие отношения построил бы Юнг (условия интертипной устойчивости в диаде) // *Соционика, психология и межличностные отношения. 1998. Июль. С. 45 — 52.*
22. Эткинд А.М. Цветовой тест отношений и его применение в исследовании больших невротизмов // *Социально-психологические исследования в психоневрологии : сб. науч. тр. Л. : Изд-во НИИ психоневрологии, 1980. С. 110 — 114.*
23. Анализ результатов эксперимента по оценке эффективности взаимодействия, проведенного со студентами-пилотами Университета гражданской авиации / А.В. Малишевский, Е.В. Власов, А.Ф. Мухаходжаев, Т.Х. Саидханов // *Проблемы летной эксплуатации и безопасность полетов : межвуз. сб. науч. тр. / СПбГУГА. СПб., 2010. Вып. IV. С. 62 — 69.*
24. Результаты экспериментов по оценке эффективности взаимодействия, проведенных со студентами-пилотами Университета гражданской авиации / А.В. Малишевский, Е.В. Власов, Ж.Ж. Адилев, М.А. Вахабов // *Проблемы летной эксплуатации и безопасность полетов : межвуз. сб. науч. тр. / СПбГУГА. СПб., 2011. Вып. V. С. 53 — 59.*
25. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Науч. изд-во «Большая Российская энциклопедия»; СПб. : Изд-во «Норинт», 2001. 1456 с.



## References

1. Kuklev E.A. Kriterii kolichestvennogo izmereniya riskov pri ocenke bezopasnosti na transporte [Criteria of the quantitative measurement of risks in case of transport safety assessment] // Aktualnye problemy transporta : sb. nauch. tr. T. 2. RAT / S.-Peterburg. gos. un-t vodn. kommunikaciy. [Actual problems of transport: collection of scientific treatises of V. 2. RAT / St.-Petersburg State University Of Water Communications.] SPb. 2001. S. 168–171.
2. Kuklev E.A. Bezopasnost i upravlenie riskami slozhnykh sistem s uchyotom trebovaniy k nadyozhnosti izdeliy [Safety and risk management of difficult systems considering requirements to products reliability. ] // Vestn. S.-Peterburg. gos. un-ta grazhdanskoj aviatsii. [Messenger of St.-Petersburg State University Of Civil Aviation] 2010. No. 1. S. 5–11.
3. Rukovodstvo po obucheniyu v oblasti chelovecheskogo faktora. [Manual on training in the field of human factor.] Doc. 9683-AN/950. 1-e izd. [1st edition] Montreal: ICAO, 1998. 370 s.
4. Karmaleev B.A. Uchebno-metodicheskoe posobie po probleme CFIT. [The educational and methodical manual on CFIT problem.] SPb. : Izd-vo S.-Peterburg. akademii grazhdanskoj aviatsii, [St.-Petersburg State University Of Civil Aviation publishing house] 2002. 91 s.
5. Zadeh L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // Fuzzy sets and Systems. 1978. № 1. P. 3 — 28.
6. Buyanov V.P., Kirsanov K.A., Mixajlov L.M. Riskologiya (upravlenie riskami): ucheb. posobie. 2-e izd., ispr. i dop. Moskva [Riskology (risk management): manual. the 2nd edition, revised and corrected, Moscow ] Moskva : Ekzamen [Exam], 2003. 384 s.
7. Bleik R.R., Mauton Dzh. S. Cockpit Resource Management (CRM). V 2 kn. Kn. 2: Upravlenie resursami kabiny soglasno setke 'Grid'. 2-e izd. [In 2 books Book 2: Cabin resource management according to 'Grid'. 2nd edition] Ostin : Sajtentifik Metod, Ink., [Ostin : Scientific Methods, Inc.] 1990. 133 s.
8. Lejchenko S.D., Malishevskij A.V., Mixajlik N.F. Chelovecheskij faktor v aviatsii. V 2 t. T. 1. [Leychenko S. D., Malishevsky A.V. Mixaylik N. F. Human factor in aircraft. In 2 volumes V. 1. ] SPb. : Izd-vo S.-Peterburg. gos. un-ta grazhdanskoj aviatsii; Kirovograd : Gos. lyotnaya akademiya Ukrainy, [SPb. : Publishing house St.-Petersburg. State University Of Civil Aviation; Kirovograd: State Flight Academy Of Ukraine,] 2006. 480s.
9. Rukovodstvo po psihologicheskomu obespecheniyu otbora, podgotovki i professionalnoj deyatel'nosti letnogo i dispatcherskogo sostava grazhdanskoj aviatsii Rossijskoj Federatsii : utv. Ministerstvom transporta RF. M. : Vozdushnyy transport, [Manual on psychological support of selection, preparation and professional activity of flight and dispatcher crew of civil aviation of the Russian Federation, approved by Ministry Of Transport Of The Russian Federation. M: Air transport], 2001. 279 s.
10. Rekomendatsii po komplektovaniyu letnykh ekipazhej i obespecheniyu optimal'nogo moralno-psihologicheskogo klimata (chasti I i II). M. : GosNIIGA, [Recommendations about completing of flight crews and provosion of optimum moral and psychological climate (part I and II). M: GosNIIGA ] 1985. 43 s.
11. Brovkin P.E. Problema komplektovaniya lyotnykh ekipazhej v voennoj aviatsii vooruzhennykh sil RF [Problem of military flight crews in military aircraft of Russian Federation armed forces] // Problemy lyotnoj ekspluatatsii i bezopasnost polyotov : mezhvuz. sb. nauch. tr. Vyp. V. S.-Pb : SPbGUGA, [Problems of flight maintenance and safety of flights: interacademic collection of scientific works Release V. SPb: SPbGUGA ] 2011. S. 71–75.
12. Issledovanie metodov upravleniya v sfere vozdušnogo transporta s ispolzovaniem socionicheskikh modelej [Research of methods of management in the sphere of air transport with use of socionic models] / O.V. Arinicheva, G.V. Kovalenko, A.V., Malishevskiy, I.A., Parfyonov, M.V. Petrova // Polyot. [Flight] 2008. No. 1. S. 45–49.
13. Malishevskiy A.V., Arinicheva O.V. Issledovanie metodov i sredstv upravleniya i planirovaniya v sfere vozdušnogo transporta na baze socionicheskikh modelej [Research of methods, controls and planning in the sphere of air transport on the basis of socionic models] // Nauchn. vestn. MGTUGA. [Scientific Messenger . MGTUGA .] 2008. No. 125 (1). S. 186–190.
14. Lejchenko S.D., Malishevskiy A.V., Mihajlik N.F. Chelovecheskij faktor v aviatsii. V 2 t. T. 2. SPb. [Human factor in aviation] V dveh tomah, t. 2, [In 2 volumes V. 2. SPb. : Izd-vo S.-Peterburg. gos. un-ta grazhdanskoj aviatsii; Kirovograd : Gos. lyotnaya akademiya Ukrainy, [SPb. : Publishing house St.-Petersburg. State University Of Civil Aviation; Kirovograd: State Flight Academy Of Ukraine,] 2006. 512 s.
15. Malishevskiy A.V., Parfenov I.A. Ispolzovanie socionicheskix modelej dlya upravleniya i planirovaniya v sfere vozdušnogo transporta [Use of socionic models for control and planning in the sphere of air transport] // Nauchn. vestn. MGTUGA. [Scientific Messenger . MGTUGA .] 2010. No. 154 (4). S. 117–123.
16. Arinicheva O.V. Sovershenstvovanie metodov upravleniya resursami sistemy 'ekipazh – vozdušnoe sudno' putyom snizheniya otricatelnogo vliyaniya chelovecheskogo faktora na bezopasnost polyotov : dis. ... kand. texn. nauk : 05.22.14 : zashhishhena 27.06.08 : utv. 10.10.08. [Enhancement of methods of resources management of 'crew – aircraft' system by decreasing negative human factor influence on flights' safety: thesis ... PhD in Engineering: defended 05.22.14 : approved 10.10.08. ] SPb., 2008. 199 s.
17. Lejchenko S.D., Malishevskij A.V., Mixajlik N.F. Socionicheskaya model ekipazha [Socionic crew model] // Podgotovka aviacionnogo personala v oblasti chelovecheskogo faktora : mezhvuz. sb. nauch. tr. / Akademiya GA. [Preparation of aviation staff in the field of human factor: interacademic collection of scientific works GA Academy ] SPb. 1998. Vip. 1. [edition 1] S. 30–35.
18. Malishevskiy A.V., Arinicheva O.V., Brovkin P.E., Shakirov A.E. Problema ocenki effektivnosti vzaimodejstviya v pare pilotov s ispolzovaniem intertipnykh otnoshenij V.V. Gulenko [Problem of an assessment of interaction efficiency in couple of pilots with use of the intertype relations of V. V. Gulenko ] // Problemy lyotnoj ekspluatatsii i bezopasnost polyotov : mezhvuz. sb. nauch. tr. / SPbGUGA. S-Pb : Vyp. IV. 2010. [Problems of flight maintenance and safety of flights : interacademic collection of scientific works / SPbGUGA SPb: Release IV. 2010 SPb] S. 47–50.
19. Rezultaty ocenki effektivnosti vzaimodejstviya v parax pilotov s ispolzovaniem intertipnykh otnoshenij V. V. Gulenko [Results of an assessment of interaction efficiency in couples of pilots with use of the intertype relations of V. V. Gulenko ] / A.V. Malishevskij, P.E. Brovkin, V.V. Tarakanov, V.A. Filaretov // Problemy lyotnoj ekspluatatsii i bezopasnost polyotov : mezhvuz. sb. nauch. tr. / SPbGUGA. SPb. 2011. Vyp. V. [Problems of flight maintenance and safety of flights: interacademic collection of scientific works / SPbGUGA SPb: 2011. Release V] S. 196–201.
20. Special'naya podgotovka v oblasti chelovecheskogo faktora: metodicheskie ukazaniya po provedeniyu psixologicheskoy diagnostiki [Special preparation in the field of a human factor: methodical instructions for carrying out psychological diagnostics] / Sost. O. V. Arinicheva, A. V. Malishevskij. SPb. : SPbGUGA, 2010. [Made by O. V. Arinicheva, A. V. Malishevsky. SPb. : SPbGUGA ], 74 s.
21. Gulenko V.V. Kakie otnosheniya postroil by Yung (usloviya intertipnoj ustojchivosti v diade) [What relations would be constructed by Jung (conditions of intertype stability in a dyad)] // Socionika, psixologiya i mezlichnostnye otnosheniya. 1998. iyul. [Socionics, psychology and interpersonal relations. 1998 . July.] S. 45–52.
22. Analiz rezultatov eksperimenta po ocenke effektivnosti vzaimodejstviya, provedyonnogo so studentami-pilotami Universiteta grazhdanskoj aviatsii [The analysis of results of experiment according to efficiency of the interaction made with students pilots of University of Civil Aviation] / A.V. Malishevskiy, E.V. Vlasov, A.F. Musaxodzhaev, T.X. Saidhanov // Problemy lyotnoj ekspluatatsii i bezopasnost polyotov : mezhvuz. sb. nauch. tr. / SPbGUGA. SPb. 2010. Vyp. IV. [Problems of flight maintenance and safety of flights: interacademic collection of scientific works / SPbGUGA SPb: 2010. Release IV. ] S. 62–69.
23. Rezultaty eksperimentov po ocenke effektivnosti vzaimodejstviya, provedyonnykh so studentami-pilotami universiteta grazhdanskoj aviatsii [Results of experiments according to efficiency of the interaction made with students pilots of University of Civil Aviation] / A.V. Malishevskij, E.V. Vlasov, Zh.Zh. Adilov, M.A. Vaxabov // Problemy lyotnoj ekspluatatsii i bezopasnost polyotov : mezhvuz. sb. nauch. tr. / SPbGUGA. SPb. 2011. Vyp. V. [Problems of flight maintenance and safety of flights: interacademic collection of scientific works / SPbGUGA SPb: 2010. Release V. ] S. 53–59.
24. Etkind A.M. Cvetovoy test otnoshenij i ego primenenie v issledovanii bolnykh nevrozami [The color test of the relations and its application in research of neurotic patients] // Socialno-psixologicheskie issledovaniya v psixonevrologii : sb. nauch. tr. L. : Izd-vo NII psixonevrologii, 1980. [Social and psychological researches in psychoneurology: collection of scientific works, L: Psychoneurology Scientific Research Institute Publishing House, 1980.] S. 110–114.
25. Bolshoj enciklopedicheskij slovar / Gl. red. A. M. Proxorov. 2-e izd., pererab. i dop. M. : Nauch. izd-vo 'Bolshaya Rossijskaya enciklopediya'; SPb. : Izd-vo 'Norint', 2001. [Big Encyclopedic Dictionary/ Main editor A.M. Prokhorov. 2nd edition, revised and enlarged M: Scientific Publishing House 'Big Russian Encyclopedia'; SPb.: 'Norint' Publishing House, 2001] 1456 s.

УДК 656.078.1

Доктор Ерки Хамелайнен, профессор, Школа бизнеса Университета Аалто, Финляндия

## КОНЦЕПЦИЯ СУХОГО ПОРТА В ЛОГИСТИКЕ ТРАНСИБИРСКОЙ МАГИСТРАЛИ

Dr. Erkki Hämmäläinen, Professor, Aalto University School of Business, Finland

### Dry Port Concept In The trans-Siberian Railway (TSR) Logistics

#### Аннотация

Сухие порты в логистической цепи стали интересной темой среди международных логистических исследователей. Сухой порт удален от моря и напрямую соединяет морской порт с железной дорогой. Он также действует как интермодальный терминал, предлагая различные дополнительные логистические услуги. В сухом порту грузоотправители предлагают такие логистические услуги как таможенная очистка, обработка контейнеров, ремонт, складирование, сбор, мультимодальные транспортные услуги, консультирование. Транссибирская магистраль играет важную роль в качестве наземного моста в международном западно-восточном грузопотоке и логистической сети.

**Ключевые слова:** Транс-сибирская магистраль, логистика, концепция порта, перевалка контейнеров, складирование, мультимодальные перевозки грузов.

#### Abstract

Dry ports in the supply chain have become an interesting topic among international logistic researchers. Dry port is an inland port and directly connected to the sea port with a railway. It also operates as an intermodal terminal with diverse value-added logistic services. In a dry port shippers offer such logistic services as customs clearance, container handling, repair, warehousing, assembly, multimodal transportation services, consulting, consulting. Trans-Siberian Railway (TSR) has an important role as a land bridge in the international east-west cargo flows and logistic networks.

**Key words:** Trans-Siberian Railway, logistic, Port Concept, cargo, container handling, Warehousing, multimodal transportation serviced.

#### Motivation to a dry port concept

**T**rans-Siberian Railway (TSR) connects EU-markets and Asia by the Russian rail network. There are a number of dry ports along TSR and logistic centres for reloading and transportation. It runs over 10 000 km connecting Russia rail network with the EU-transport network: TEN Corridor 9 (Finland, the Baltic Sea Motorway) and a more southern alternative, Corridor 2 (Poland, Germany). Logistic centres along the TSR invest to infrastructure, multimodality, cargo handling and logistic services. They may also operate in south-northbound transportation to closing or distant markets and customers.

TSR landbridge is competitive against the deep sea transportation in the delivery time: Transportation lead-time is 50 — 80% faster from Asian countries to the EU and Russian markets. Landbridge has, however, still a low market share against the main mode of deep sea transportation via the Suez Canal or Africa in the east-west trade flows. There are positive experiences of regular TRS shuttle trains from South Korea, Vostochny seaport to Kouvola/Finland, to Russia and further to EU/Nordic countries in 2003 — 2005.



Fig. 1 — TSR connects the Asian and EU-markets via diverse dry ports

Finnish and Russian researchers have published field surveys of Kouvola dry port and Russian logistic centres in the TSR logistics 2007 — 2008. These are the Kymenlaakso University of Applied Sciences (Innorail Institute) and three Russian railway universities: Moscow State Transport University (MIIT), St. Petersburg State Transport University (PGUPS) and Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg (USURT).

TSR railway logistics have competitive advantages and dry ports are developing services in the logistic centres and shunt-

ing yards. For future there are still challenges in developing competitive value-added services in dry ports, improving the co-modality in transportation and supply chain management.

**Three types of dry ports**

Railway connects the seaport and inland port, dry port. There are three categories of dry ports according to the distance between the seaport and inland port: distant, close and mid-range dry ports.

*Distant* dry port is several hundred or even thousand kilometers between the ports: in the Trans-Siberian alternative this could be even 10 000 km; a block train from Vostochny/Nakhodka seaport in the Vladivostok area to Kouvola dry port in Finland took two weeks and even less.

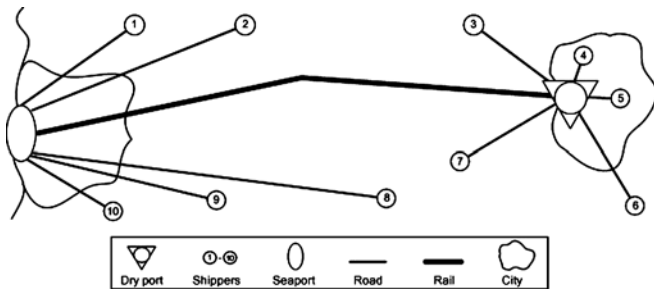


Fig. 2 — Distant dry port (Roso et al. 2009)

In this case the Kouvola dry port has a role as a distant dry port for the east and westbound TSR-logistics. Kouvola has access both Russian markets mainly by truck and EU markets via sea port. In this case Kouvola has a role of a close dry port for HaminaKotka seaport.

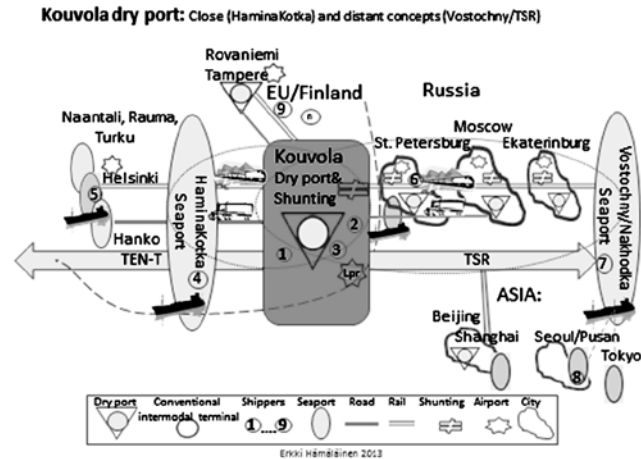


Fig. 3 — Logistic networks of the Kouvola dry port in Finland

Sea ports have high and heavy traffic in a restricted area. A *close* dry port is possibility to enlarge the operative area of the sea port in the inland area. Kouvola dry port is operating as a close dry port to HaminaKotka sea port; distance is 50 km and access to the Baltic motorway, EU TEN Corridor 9 and 1 (north-south), Baltic sea and Nordic Triangle. In this case the sea port

and dry port are operating as a dyad in the exports and imports to Finland, Russia and even further.

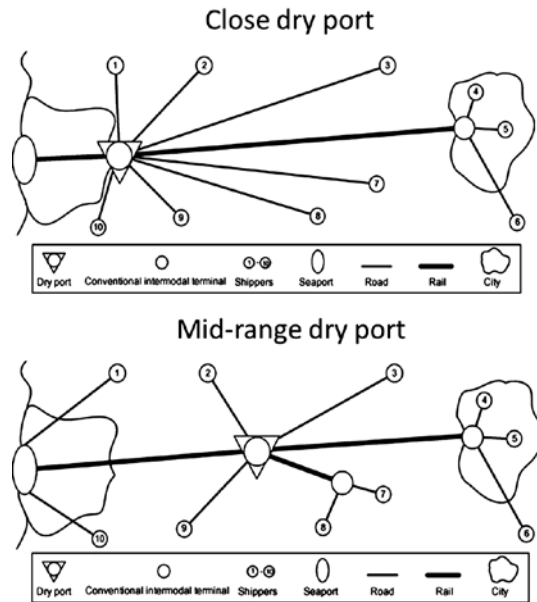


Fig. 4 — Close and mid-range dry ports (Roso et al. 2009)

*Mid-range* dry ports are hundreds and more kilometers from the seaport. Rail is connected to other logistic centers with rail or other traffic modes. Such logistic centres along the TSR as Ekaterinburg and Moscow and St. Petersburg have wide shunting services for container trains and value-added logistic services in the dry port. These dry ports have logistic services with the access to other international trade corridors also in the north-southbound cargo flows.

**Challenges in TSR cargo flows and dry ports**

Russian railway container market has grown rapidly and continues to grow. Investment plans to port infrastructure and TSR dry ports in container handling are substantial. EU is promoting modal shift from road to rail, co-modality is increasing. Container cargo flows are focusing to international freight corridors and logistic centres in the crossing points of the logistic network are developed. TSR is an existing landbridge with many alternatives. Logistic capabilities are improved, safety increased and more environmental aspects are reviewed in transportation.

Secondly, deep sea transportation shall maintain its role as a dominant route. There are, nevertheless, new challengers and route alternatives in the east-west trade: the “Arctic route” via the Barents Sea and the southern landbridge, the “Silkroad”. Both are understood as potential logistic alternatives, but there are still many challenges in the operative supply chain management.

Thirdly, trade corridors, large logistic hubs and centres are developed by public-private enterprises in the crossing points of trade corridors. International customers and logistic service providers are choosing competitive services and routes. TSR has also many other alternatives for reorientation in the international network of dry port — seaport services.

## Литература

1. Баск Ану, Росо Виолета, Андрессон Дан, Хамелайнен Ерки: Система обслуживания морских портов – факты о сухих портах Швеции и Финляндии. Совместная работа Школы бизнеса Университета Аалто, Финляндия и Технического Университета Чалмерса, Швеция, Скандинавская логистическая конференция, Гетеборг 2013.

2. Хамелайнен Ерки, Коровяковский Евгений, исследование логистических факторов железнодорожных операций на Транссибирской магистрали, «Что владельцы Транссибирской магистрали думают о Транссибе?» Университет Прикладных Наук Кюменлааксо, ISSN: 1239-9094, Исследования и доклады В-34, 2007

3. Коровяковский Евгений, Хамелайнен Ерки: Логистические центры в Санкт-Петербурге, Россия: текущее состояние и перспективы, Университет Прикладных Наук Кюменлааксо, ISSN: 1239-9094, Исследования и доклады В-36, 2007

4. Резер Алексей В., Хамелайнен Ерки: Логистические центры в Москве, Транспорт, операторы и логистическая инфраструктура в Московской области, Университет Прикладных Наук Кюменлааксо, ISSN: 1239-9094, Исследования и доклады В-44, 2007

5. Росо Виолета, Воксенюс Йохан, Ламсден Кент: Концепция сухого порта: соединение контейнерных морских портов с пригородными районами, Гетеборг, Журнал транспортной географии, том 17, Выпуск 5, Сентябрь 2009

6. Тимухина Елена, Хамелайнен Ерки, Бизуас-Коппинен Сомма: Услуги железнодорожного маневрового парка в сухом порту, анализ железнодорожных маневровых парков в Свердловске – Россия и Коувале – Финляндия, Университет Прикладных Наук Кюменлааксо, ISSN: 1239-9094, Исследования и доклады В-47, 2008

## References

1. Bask Anu, Roso Violeta, Andersson Dan, Hämläinen Erkki: Service Systems of Sea port — Dry port Dyads, Cases from Sweden and Finland, Joint work Aalto University School of Business, Finland and Chalmers University of Technology, Sweden, NOFOMA, Nordic Logistic Conference, Gothenburg, 2013.

2. Hämläinen Erkki, Korovyakovsky Eugene, Survey of Logistic Factors in the TSR Railway Operation, “What TSR Station Masters Think about the Trans-Siberian?”, Kymenlaakso University of Applied Sciences, ISSN: 1239-9094, Research and reports B-34, 2007.

3. Korovyakovsky Eugene, Hämläinen Erkki: Logistic Centres in St Petersburg, Russia: Current status and prospects, Kymenlaakso University of Applied Sciences, ISSN: 1239-9094, Research and reports B-36, 2007.

4. Rezer Alexey V., Hämläinen Erkki: Logistic Centres in Moscow, Transport, operators and logistics infrastructure in the Moscow Region, Kymenlaakso University of Applied Sciences, ISSN: 1239-9094, Research and reports B-44, 2007.

5. Roso Violeta, Woxenius Johan, Lumsden Kenth: The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland, Gothenburg, Sweden, Chalmers University of Technology, Journal of Transport Geography, Volume 17, Issue 5, September 2009.

6. Timukhina Elena, Hämläinen Erkki, Biswas-Kauppinen Soma: Railway Shunting Yard Services in a Dry-Port, Analysis of the railway shunting yards in Sverdlovsk-Russia and Kouvola-Finland, Kymenlaakso University of Applied Sciences, ISSN: 1239-9094, Research and reports B-47, 2008.



УДК 502.15:621.43.068

Алла Сергеевна Голубева, аспирант кафедры «Экономика природопользования» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург,  
Елена Роменовна Магарил, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Экономика природопользования» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ЭКОНОМИЧЕСКОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO<sub>2</sub> АВТОМОБИЛЯМИ

Alla S. Golubeva, post-graduate student of «Economics of natural resources management» department, The Ural Federal University

Elena R. Magaril, DSc, prof., head of «Economics of natural resources management» department, The Ural Federal University

## Improvement Of Economic Incentives For Reduction Of Motor Transport CO<sub>2</sub> Emissions

### Аннотация

Одно из негативных воздействий автотранспорта на окружающую среду — значительная эмиссия углекислого газа, образованного при сжигании моторного топлива.

Цель данной работы — совершенствование механизма экономического стимулирования сокращения выбросов CO<sub>2</sub> автомобилями путем изменения системы налогообложения нефтепродуктов.

Авторами выделены направления по совершенствованию экономического механизма влияния государства на сокращение эмиссии углекислого газа автотранспортом, приоритетным среди которых должно стать стимулирование производства и потребления более экологичного топлива.

Предложен инструментарий экономического стимулирования сокращения выбросов углекислого газа автотранспортом. Обоснована необходимость дополнения действующей системы налогообложения нефтепродуктов введением налога, учитывающего эмиссию CO<sub>2</sub> от сжигания топлива, при одновременном принятии мер государственного ограничения роста цен на бензин и дизельное топливо.

Разработан методический подход к расчету предлагаемого налога с учетом выявленной зависимости эмиссии CO<sub>2</sub> автотранспортом от качественных характеристик потребляемого топлива.

**Ключевые слова:** эмиссия CO<sub>2</sub>, экономическое стимулирование, налогообложение нефтепродуктов, автотранспорт, моторное топливо.

**А**втомобильный транспорт, мировая численность которого превышает миллиард единиц, является одним из основных потребителей нефтепродуктов и, как следствие, эмиттеров углекислого газа. В современных условиях возрастающей ограниченности топливно-энергетических ресурсов и ассимиляционного потенциала окружающей среды необходима разработка и реализация механизмов оптимального использования этих ресурсов, поиск путей устойчивого экологически сбалансированного экономического развития общества с учетом интересов будущих поколений. В данном контексте поиск путей сокращения выбросов CO<sub>2</sub> автотранспортом, коррелирующих с интенсификацией потребления дефицитных

### Abstract

One of the negative influences of motor transport on environment is CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion.

The aim of the paper is economic incentives improvement for reduction of motor transport CO<sub>2</sub> emissions by changing the system of oil products taxation.

The authors discuss the development directions of economic mechanism of government influence on motor transport CO<sub>2</sub> emissions, where production and consumption incentives of environment-friendly fuel are the main ones.

The toolbox of economic incentive for reduction of motor transport CO<sub>2</sub> emissions is offered. The need of introducing a tax concerning CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion to the present oil products taxation system and state price rise restraints for fuel and diesel fuel is justified.

Methodological approach to the offered tax calculation with regard to dependence of motor transport CO<sub>2</sub> emissions on qualitative characteristics of consumed fuel is developed.

**Key words:** CO<sub>2</sub> emissions; economic incentive; oil products taxation; motor transport.

топлив нефтяного происхождения, становится весьма актуальной задачей.

Согласно оценкам Международного энергетического агентства [1], приоритетным направлением снижения выбросов диоксида углерода автомобилями является повышение их топливной экономичности, определяющую роль в котором играет улучшение качества потребляемого топлива. Один из возможных путей решения этой задачи — эффективное использование инструментов экономического стимулирования производителей нефтепродуктов.

Автотранспорт ежегодно потребляет более 2 млрд т моторных топлив, и в структуре эмиссии CO<sub>2</sub> от сжигания топлива в

мире и Российской Федерации доля автотранспорта составляет 16,4 и 8,8% соответственно (табл. 1) [2].

Таблица 1 — Эмиссия CO<sub>2</sub> от сжигания топлива в мире и России по секторам экономики в 2010 г.

Сектор экономики	В мире		В России	
	Эмиссия, млн т CO <sub>2</sub>	Удельный вес, %	Эмиссия, млн т CO <sub>2</sub>	Удельный вес, %
Энергетическая промышленность	12 480,6	41,2	832,6	52,7
Промышленное производство, и строительство	6 186,4	20,4	294,3	18,6
Транспорт	6 755,8	22,3	242,1	15,3
<b>В том числе автотранспорт</b>	<b>4 972,1</b>	<b>16,4</b>	<b>139,9</b>	<b>8,8</b>
Другие сектора	1 570,8	5,2	63,2	4,0
Прочее	3 282,6	10,8	149,2	9,4
Итого	30 276,1	100,0	1 581,4	100,0

Рассчитав вклад транспортного сектора в глобальную эмиссию CO<sub>2</sub>, Международное энергетическое агентство при оценке снижения потребления нефти в наиболее оптимистичном из сценариев ускоренного развития технологий (Accelerated Technology scenarios) к 2050 г. на долю транспорта отнесло 62% (рис. 1) [1, 3].

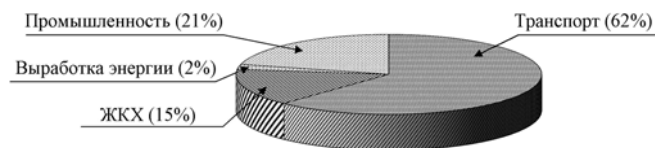


Рисунок 1 — Вклад отдельных источников в сокращение потребления нефти к 2050 г.

Следует отметить, что продолжающийся стремительный рост автомобильного парка (табл. 2) при практически неизменном качестве потребляемого топлива в России сопровождается пропорциональным увеличением эмиссии CO<sub>2</sub> автотранспортом [4].

На основании данных о потреблении топлива автотранспортом в России [5], мы оценили количество углекислого газа, поступившего в атмосферу при эксплуатации автомобилей (рис. 2).

Эмиссию CO<sub>2</sub> рассчитали по формуле

$$G_{CO_2} = 3,67 \cdot G_T \cdot \frac{C}{100}, \quad (1)$$

где  $G_T$  — масса моторного топлива (по видам), потребляемого автотранспортом за год, млн т;

Таблица 2 — Динамика числа автомобилей в РФ, тыс. шт.

Автотранспорт	Год									
	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
Грузовые автомобили	4 401	4 848	4 929	5 168	5 349	5 323	5 414	5 545	5 712	
Автобусы	640	792	824	882	894	896	894	902	925	
Легковые автомобили	20 353	25 570	26 794	29 405	32 021	33 084	34 354	36 415	38 748	
Итого	25 394	31 210	32 547	35 455	38 264	39 303	40 662	42 862	45 385	

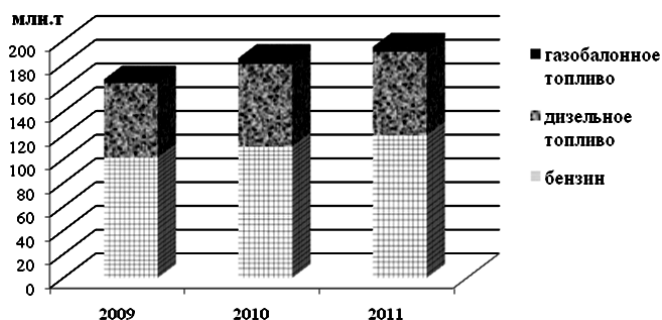


Рисунок 2 — Эмиссия CO<sub>2</sub> при сжигании топлива автотранспортом в России

$C$  — содержание углерода в данном виде топлива, % (для бензина — 85%, дизельного топлива — 87%, газобаллонного топлива — 75%);

3,67 — коэффициент пересчета содержания углерода в топливе в выбросы CO<sub>2</sub> при его сжигании.

Основная доля выбросов CO<sub>2</sub> автотранспортом России формируется за счет сжигания бензина. При этом имеется огромный потенциал перехода на газобаллонное топливо, что особо актуально для нашего государства, занимающего первое место в мире по разведанным доказанным запасам природного газа (23,9% общих запасов [6]). Реализация такого перехода требует использования имеющегося запаса природного газа, а также развития переработки в моторные топлива попутного нефтяного газа, существенная часть которого сегодня сжигается на факелах. Тем самым нефтяные компании наносят не только экономический ущерб государству, но и огромный экологический ущерб [7, 8].

С учетом большего объема производства в процессах нефтепереработки дизельного топлива, потребителем которого является не только автотранспорт, но и железнодорожный, водный транспорт, военная, сельскохозяйственная техника, валовые выбросы углекислого газа при сжигании производимого за год дизельного топлива больше, чем для бензина. В 2012 г. нефтепереработкой России произведено 38,2 млн т бензина и 69,3 млн т дизельного топлива [9]. Выбросы углекислого газа при их потреблении, согласно нашему расчету, составили 119,2 и 221,3 млн т соответственно.

Рассмотрение результатов переговоров стран — участниц Рамочной конвенции ООН об изменении климата на Всемирных климатических конференциях [10], экономических механизмов Киотского протокола и методологии инвентаризации парниковых газов [11] позволяет сделать вывод о том, что механизмы гибкости, предусмотренные Киотским протоколом, на сегодняшний день отработаны и могут быть адекватно реализованы лишь для стационарных



источников (промышленных предприятий). Для мобильных источников, в том числе автотранспорта, сложно добиться точных данных об эмиссии ввиду затруднительного сбора информации для расчетов, и, как следствие, невозможно эффективно применять экономические механизмы Протокола. Это обуславливает необходимость обоснования альтернативных механизмов сокращения потребления дефицитных углеводородных топлив автотранспортом [12].

Согласно оптимистичному сценарию BLUE Map, Международное энергетическое агентство определило, что за счет повышения топливной экономичности возможно снизить 74% выбросов диоксида углерода от общей эмиссии CO<sub>2</sub> автотранспортным сектором, остальные 26% — за счет использования альтернативных видов топлива (рис. 3) [1, 3].

Сокращение выбросов CO<sub>2</sub> автотранспортом может быть реализовано в двух основных направлениях (рис. 4).

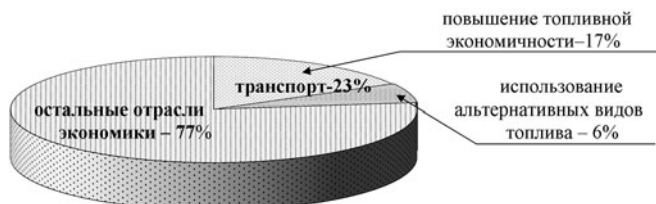


Рисунок 3 — Доля транспорта в глобальном снижении выбросов CO<sub>2</sub>



Рисунок 4 — Направления сокращения эмиссии CO<sub>2</sub> автотранспортом

Проведенные авторами аналитические исследования позволили выявить основные технологические методы повышения топливной экономичности автотранспорта, потребляющего бензин и дизельное топливо (рис. 5).

Следует отметить, что в решении задачи повышения топливной экономичности в условиях России приоритетную роль играет повышение качества производимых бензинов и дизельных топлив [13 — 15].

Задача снижения выбросов CO<sub>2</sub> путем повышения топливной экономичности автотранспорта является для мирового сообщества одной из приоритетных, учитывая необходимость рационального использования невозобновимых источников энергии.

Проведенная систематизация выявленных технологических методов сокращения эмиссии CO<sub>2</sub> автотранспортом дала

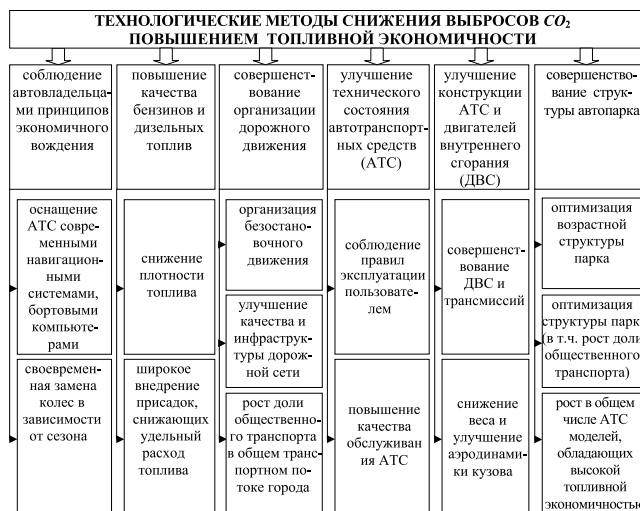


Рисунок 5 — Технологические методы снижения выбросов CO<sub>2</sub> повышением топливной экономичности автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями

возможность определить альтернативные предусмотренным механизмами гибкости Киотского протокола инструменты экономического стимулирования субъектов транспортного процесса к сокращению эмиссий парниковых газов (табл. 3).

Качество производимых в России автомобильных топлив, от которого зависит эмиссия CO<sub>2</sub> в автотранспортном секторе, определяется техническим регламентом «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топчному мазуту», принятым Постановлением Правительства РФ № 118 от 27.02.08 [16]. Техническим регламентом предусмотрена градация автомобильных бензинов и дизельных топлив на 4 экологических класса, в зависимости от которых с 01.01.11 варьируются ставки акцизов [17]. В регламенте были установлены жесткие требования к моторным топливам: с 01.01.13 должно быть прекращено производство бензина Евро 2; с 01.01.15 — Евро 3; Евро 4, согласно регламенту, будет выпускаться до 01.01.16 [16]. Однако в настоящее время переход на требования технического регламента к качеству производимых топлив происходит с существенным отставанием относительно намеченных сроков. Вступление России в ВТО будет в определенной степени способствовать ускорению темпов модернизации нефтепереработки в соответствии с государственной программой [7, 8].

Сегодня уровень фискальной нагрузки на нефтяную промышленность России является самым высоким в сравнении с действующими в других нефтедобывающих странах системами налогообложения. За счет налоговых поступлений от нефтяной отрасли формируется больше половины бюджета страны. В Бюджетном послании [18] ставилась задача по совершенствованию механизмов налогообложения отрасли, для того чтобы осваивались новые месторождения и, что еще важнее, развивалась глубокая переработка нефти.

В России налоговая нагрузка составляет более 50% стоимости бензина. Цены на бензин в США (для сравнения) главным образом зависят от биржевых котировок, так как стои-

Таблица 3 — Инструменты экономического стимулирования сокращения эмиссии CO<sub>2</sub> по ответственным субъектам

Субъект	Направление стимулирования сокращения эмиссии CO <sub>2</sub>	Инструмент	Пояснение
АВТОВЛАДЕЛЬЦЫ (ЧАСТНЫЕ ЛИЦА И АВТОПРЕДПРИЯТИЯ)	Стимулирование соблюдения принципов экономичного вождения	Финансово-кредитный механизм	Система штрафов за несвоевременную замену колес в зависимости от сезона
		Государственная поддержка	Финансирование разработки и внедрения новых технологий по применению интеллектуальных транспортных систем, бортовых навигационных систем
			Строительство сети дорог и реконструкция транспортных систем, способствующая безостановочному движению
	Стимулирование соблюдения правил эксплуатации автомобиля	Финансово-кредитный механизм	Система штрафов за несвоевременное проведение техобслуживания и ремонтов
		Налогообложение	Прогрессивный налог на автовладельцев в зависимости от срока эксплуатации их автомобилей
	Стимулирование приобретения автомобилей с высокой топливной экономичностью, в т. ч. использующих альтернативные виды топлива и энергии	Государственная поддержка	Программы утилизации старых автомобилей
		Ценовая политика	Льготное ценообразование для моделей автомобилей с высокой топливной экономичностью, в том числе использующих альтернативные виды топлива и энергии
		Налогообложение	Льготное налогообложение для автопредприятий на автомобили с высокой топливной экономичностью, в том числе использующих альтернативные виды топлива и энергии
	Стимулирование сокращения времени пользования личным автотранспортом в пользу общественного транспорта	Государственная поддержка	Развитие инфраструктуры общественного транспорта
		Ценовая политика	Модернизация и обновление парка общественного транспорта
		Налогообложение	Государственное ограничение роста цен на пассажирские перевозки
	АВТОПРОИЗВОДИТЕЛИ	Стимулирование разработки и производства усовершенствованных ДВС и автомобилей улучшенной конструкции	Финансово-кредитный механизм
Государственная поддержка			Предоставление экологических субсидий разработчикам и производителям высокотехнологичных ДВС, конструкций автомобилей, позволяющих повысить их топливную экономичность, в том числе использующих альтернативные виды топлива и энергии
Стимулирование соблюдения регламентированных выбросов CO <sub>2</sub> для производимых АТС		Налогообложение	Налог на выброс CO <sub>2</sub> автотранспортом
		Система экологической сертификации	Ужесточение регламентированных выбросов CO <sub>2</sub> в среднем по корпорации/ дифференцированно по автомобилям
ПРОИЗВОДИТЕЛИ ТОПЛИВА	Стимулирование производства топлива с пониженной эмиссией CO <sub>2</sub> при сгорании	Финансово-кредитный механизм	Льготное кредитование при строительстве новых нефтеперерабатывающих заводов
		Государственная поддержка	Модернизация нефтепереработки
		Ценовая политика	Государственное ограничение роста цен на моторное топливо
		Налогообложение	Налог, учитывающий эмиссию CO <sub>2</sub> при сгорании топлива
	Стимулирование производства альтернативных видов топлива	Система экологической сертификации	Введение показателя плотности, учитывающего эмиссию CO <sub>2</sub> при его сгорании, в сертификатах качества производимого топлива
		Финансово-кредитный механизм	Льготное кредитование, инвестиционные субвенции при разработке и производстве альтернативных видов топлива
		Государственная поддержка	Поддержка разработок и производства альтернативных видов топлива
		Стимулирование применения присадок, снижающих удельный расход топлива	Государственная поддержка
Система экологической сертификации	Отражение обязательного применения присадок в стандартах, технических регламентах		

мость нефти занимает основную долю в стоимости бензина (около 70%). Нужно также учитывать, что в России в условиях высокомонопольного рынка нефтепродуктов цена в значительной степени определяется договоренностями между производителями.

Эффективным методом стимулирования производства и потребления экологически более качественного топлива в РФ могло бы стать совершенствование системы налогообложения нефтепродуктов при одновременном принятии мер государственного ограничения роста цен на них.

Основными налогами, входящими в стоимость моторного топлива в России, являются акциз, налог на прибыль, налог на добавленную стоимость, налог на добычу полезных ископаемых. Среди перечисленных налогов лишь акциз (с 01.01.11) учитывает качество реализуемого моторного топлива, так как действующие ставки напрямую зависят от экологического класса бензина и дизельного топлива. Анализ действующего налогообложения нефтепродуктов показал, что в настоящее время налоги на топливо в России, как и в остальных странах мира, не связаны с выбросами углекислого газа и, следовательно, не стимулируют производителей к их сокращению. Хотя действующие в РФ акцизы учитывают экологические свойства топлива, они не зависят от величины выбросов CO<sub>2</sub> при его сгорании, так как топлива в пределах данной категории качества могут существенно отличаться по удельной эмиссии углекислого газа.

Поскольку:

- основным источником эмиссии CO<sub>2</sub> является сжигание ископаемого топлива, среди основных потребителей которого — автотранспорт;
- одним из наиболее эффективных инструментов воздействия на производителей топлива является налоговое стимулирование;
- налоги на топливо на сегодняшний день не связаны с выбросами углекислого газа,

необходимо совершенствование действующей системы налогообложения нефтепродуктов за счет введения нового налога, учитывающего эмиссию CO<sub>2</sub> от сжигания топлива. Стоит отметить, что введение нового налога без государственного регулирования ценообразования приведет к увеличению цен на автомобильное топливо, станет бременем для потребителей, и не будет стимулировать производителей к улучшению его качества. Таким образом, необходимо ввести в действие новый налог, учитывающий эмиссию CO<sub>2</sub> от сжигания топлива при одновременном принятии мер государственного ограничения роста цен на автомобильное топливо. При этом, с учетом того что газ дает значительно меньшие выбросы углекислого газа в расчете на единицу энергии (согласно проведенным нами расчетам по теплотворным способностям и содержанию углерода в топливе: газ — 55 кг CO<sub>2</sub>/ГДж, тогда как бензин — 70 кг CO<sub>2</sub>/ГДж, а дизельное топливо — 75 кг CO<sub>2</sub>/ГДж), а потребление газового топлива (исходя из значительных располагаемых запасов природного газа, потенциала переработки попутного нефтяного газа и сложной экологической обстановки в России) должно увеличиваться, жидкий газ, получаемый при переработке попутного нефтяного газа, следует освободить от такого налога.

Качество моторного топлива и эмиссия CO<sub>2</sub> при сжигании в значительной степени зависят от его плотности, являющейся легко определяемым и контролируемым показателем качества нефтепродуктов. Следует отметить, что снижение плотности топлива в пределах данной категории качества не требует дополнительных капиталовложений и обусловлено температурными диапазонами отбора бензиновых и дизельных фракций при перегонке нефти [13, 14]. Учитывая прямую линейную зависимость выбросов углекислого газа от плотности топлива [13, 14], можно предложить введение налога на плотность моторных топлив, дополняющего действующее налогообложение. Этот налог целесообразно взимать с реализованного производителем топлива без учета нефтепродуктов, являющихся полуфабрикатами для дальнейшей переработки в товарные топлива. Таким образом, предлагаемый налог на плотность моторных топлив должен быть дополнительным к акцизам на нефтепродукты косвенным налогом [19].

Следует отметить, что производство дизельного топлива обходится нефтепереработке значительно дешевле, чем бензина: для получения бензина кроме прямой перегонки нефти требуются дорогостоящие процессы: изомеризация с гидроочисткой, риформинг с гидроочисткой, каталитический крекинг с гидроочисткой, алкилирование. Получение же дизельного топлива требует только прямой перегонки нефти и гидроочистки. Соотношение цен на рынке нефтепродуктов между дизельными топливами и бензинами не соответствует соотношению затрат на производстве и связано с игрой нефтяных компаний на возрастающем спросе на дизельные топлива. Таким образом, с учетом меньших затрат и большего объема производства, больших выбросов углекислого газа как в расчете на тонну топлива, так и на единицу получаемой при сгорании топлива энергии налог на плотность для дизельного топлива должен быть выше относительно бензина.

В общем виде формулу расчета налога на плотность моторного топлива можно записать как

$$T = P_{CO_2} \cdot (G_{CO_{2i}} - G_{CO_{2i\min p}}), \quad (2)$$

где  $T$  — величина налога на плотность автомобильного топлива;

$P_{CO_2}$  — стоимость единицы сокращенных выбросов — 400 руб./1 т CO<sub>2</sub> [20];

$G_{CO_{2i}}$  — эмиссия CO<sub>2</sub> при сжигании реализованного производителем нефтепродуктов автомобильного топлива  $i$ -го типа (бензин/дизельное топливо), т/т топлива;

$G_{CO_{2i\min p}}$  — эмиссия CO<sub>2</sub> при сжигании автомобильного топлива  $i$ -го типа (бензин/дизельное топливо) минимальной плотности, т/т топлива.

Связь выбросов углекислого газа при сгорании топлива ( $G_{CO_2}$ ) с содержанием в нем углерода рассчитали по формуле (1). Содержание углерода в моторном топливе связано с относительной плотностью [15, 16] и определяется по формуле Крэга [8, 13, 14], т. е.

$$C = 74 + 15\rho_{15}^{15}, \quad (3)$$

где  $\rho_{15}^{15}$  — относительная плотность моторного топлива.

С учетом этого рассчитали зависимость предлагаемого налога от плотности моторных топлив (рис. 6).

В масштабах страны при существующих годовых объемах производства моторных топлив введение налога на плотность может привести к увеличению годовых налоговых отчислений оценочно до 2,27 млрд руб. (по данным о производстве топлив в 2012 г. [9]).

Следует отметить, что предлагаемый авторами подход к совершенствованию системы налогообложения нефтепродуктов применим как для России, так и для других стран мира.

Совершенствование системы налогообложения нефтепродуктов за счет введения налога на плотность моторных топлив при одновременном принятии мер государственного ограничения роста цен на них снизит потребление дефицитных углеводородных топлив, уменьшит эмиссию CO<sub>2</sub> в автотранспортном секторе и позволит улучшить экологическую обстановку в мегаполисах.

## Литература

1. *Energy Technology Perspectives. Scenarios and Strategies to 2050.* Paris : International Energy Agency, 2006. 486 p.

2. *CO2 Emissions from Fuel Combustion, 2012 Edition.* IEA/OECD, 2012. 138 p.

3. Гусаров А.П. Потребление топлива и выбросы CO<sub>2</sub> автомобилями // Журнал автомобильных инженеров. 2009. № 3 (56) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aae-press.ru/j0056/art012.htm>.

4. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru>.

5. Новости и инфографика аналитического агентства «Автостат» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.autostat.ru>.

6. *BP Global Statistical Review of World Energy, 2012* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bp.com>.

7. Магарил Е.Р. Модернизация нефтепереработки как фактор устойчивого развития автотранспорта // Вестник УрФУ. Серия экономика и управление. Екатеринбург : УрФУ. 2011. № 4. С. 32 — 37.

8. Магарил Е.Р., Магарил Р.З. Возможности обеспечения экологической безопасности автотранспорта модернизацией нефтепереработки // Известия вузов. Нефть и газ. 2012. № 2. С. 116 — 122.

9. Нефтегазодобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность: тенденции и прогнозы // Аналитический бюллетень. 2012. № 9. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.niarating.ru>.

10. *United Nations Framework Convention on Climate Change.* United Nations, 1992. 24 p.

11. *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006.* В 5 т. / под ред. Х.С. Иглестон, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе. Япония, ИГЕС, 2006. Т. 2. Энергетика. 309 с.

12. Голубева А.С., Магарил Е.Р. Обоснование необходимости сокращения эмиссии CO<sub>2</sub> автотранспортным сектором

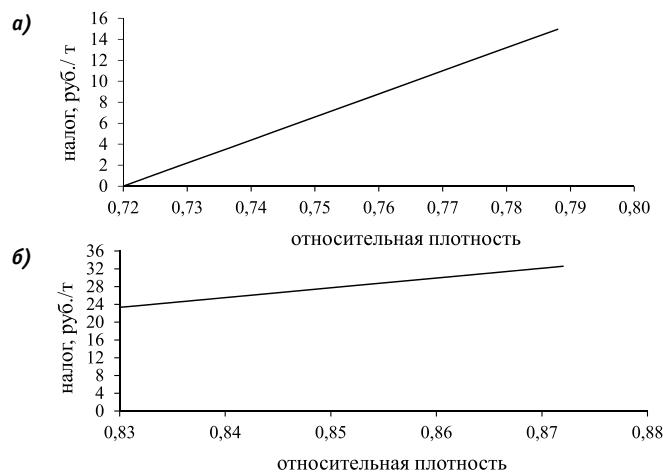


Рисунок 6 — Налог на плотность моторных топлив:

а — бензин; б — дизельное топливо

// Вестник УрФУ. Серия экономика и управление. 2012. № 2. С. 109 — 117.

13. Магарил Е.Р. Влияние качества моторных топлив на эксплуатационные и экологические характеристики автомобилей : монография. М. : КДУ, 2008. 164 с.

14. Магарил Е., Магарил Р. Автомобильные топлива: проблемы энергоэффективности и экологической безопасности: монография / LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co, Saarbrücken. Deutschland, 2012. 206 с.

15. Magaril E. Improving car environmental and operational characteristics using a multifunctional fuel additive // Proc. of 19th Int. Conf. on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution, eds. C.A. Brebbia& J.W.S. Longhurst, WIT Press : Southampton, 2011. P. 373 — 384.

16. О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту : технический регламент // Российская газета. 2008. 5 марта. № 47 (4604).

17. Налоговый кодекс Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=136059>.

18. Кузьмин В. Добыча инвестиций // Российская газета. 2012. 14 июня. № 5806. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rg.ru/2012/06/14/premier.html>.

19. Голубева А.С., Магарил Е.Р. Совершенствование системы налогообложения нефтепродуктов как инструмент экологической безопасности // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. СПб. : Изд-во Политехнического университета. 2012. № 5 (156). С. 138 — 142.

20. Энергоэффективность и развитие энергетики: Государственная программа Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <http://minenergo.gov.ru/upload/iblock/afc/afc90b96ec0fef29f2ededabb6a4a131.pdf>.

## References

1. *Energy Technology Perspectives. Scenarios and Strategies to 2050*. Paris: International Energy Agency, 2006. 486 p.
2. *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion, 2012 Edition*. IEA/OECD, 2012. 138 p.
3. Gusarov A.P. *Potreblenie topliva i vybrosy CO<sub>2</sub> avtomobilyami [Fuel consumption and motor transport CO<sub>2</sub> emissions] // Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov*. 2009. №3 (56) [Web resource]. URL: <http://www.aae-press.ru/j0056/art012.htm>
4. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Federal state statistics]*. [Web resource]. URL: <http://www.gks.ru>
5. *Novosti i infografika analiticheskogo agentstva «Avtostat» [News and infographics of analytic agency «Autostat»]* [Web resource]. URL: <http://www.autostat.ru>
6. *BP Global Statistical Review of World Energy, 2012* [Web resource]. URL: <http://www.bp.com>
7. Magaril E.R. *Modernizatsiya neftepererabotki kak faktor ustoychivogo razvitiya avtotransporta [Modernization of oil processing as a factor of sustained development of motor transport] // Vestnik UrFU. Seriya ekonomika i upravlenie*. Ekaterinburg: UrFU. 2011. № 4. S.32-37.
8. Magaril E.R., Magaril R.Z. *Vozmozhnosti obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti avtotransporta modernizatsiyey neftepererabotki [Ways of motor transport environmental safety protection by oil processing modernization] // Izvestiya vuzov. Neft i gaz*. 2012. № 2. S.116-122.
9. *Neftegazodobyvayushchaya i neftepererabatyvayushchaya promyshlennost [Gas-and-oil producing industry and oil-refining industry]: tendentsii i prognozy: Analiticheskiy byulleten*. 2012. № 9. [Web resource]. URL: <http://www.riarating.ru>
10. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. United Nations, 1992. 24 p.
11. *Rukovodyashchie printsipy natsionalnykh inventarizatsiy parnikovyykh gazov [Guidelines for national inventory of greenhouse gases] MGEIK, 2006. v 5 t /Pod red. H.S. Iggleston, L. Buendia, K. Miva, T. Ngara, K. Tanabe . IGES, Yaponiya, 2006. t.2: Energetika. 309 s.*
12. Golubeva A.S. , Magaril E.R. *Obosnovanie neobkhodimosti sokrashcheniya emissii CO<sub>2</sub> avtotransportnym sektorom [Justification of the need in motor transport CO<sub>2</sub> emissions' reduction] // Vestnik UrFU. Seriya ekonomika i upravlenie*. 2012. № 2. S.109-117.
13. Magaril E.R. *Vliyanie kachestva motornykh topliv na ekspluatatsionnye i ekologicheskie kharakteristiki avtomobiley: monografiya [Influence of fuel quality on operational and environmental characteristics of vehicles]*. M.: KDU, 2008. 164 s.
14. Magaril E., Magaril R. *Avtomobilnye topliva: problemy energoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti [Motor fuels: problems of power efficiency and environmental safety]: monografiya /LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co, Saarbrcken, Deutschland, 2012. 206 s.*
15. Magaril E. *Improving car environmental and operational characteristics using a multifunctional fuel additive // Proc. of 19th Int. Conf. on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution*, eds. C.A. Brebbia& J.W.S. Longhurst, WIT Press: Southampton, pp. 373-384, 2011.
16. *O trebovaniyakh k avtomobilnomu i aviatsionnomu benzinu, dizelnomu i sudovomu toplivu, toplivu dlya reaktivnykh dvigatelej i topchnomu mazutu [About requirements to motor fuel and aircraft fuel]: Tehnicheskii reglament // Rossiyskaya gazeta*. 2008. 05 marta. № 47 (4604).
17. *Nalogovy kodeks Rossiyskoy Federatsii [Internal Revenue Code]* .URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=136059>
18. Vladimir Kuzmin. *Dobycha investitsiy [Investments flow] // Rossiyskaya gazeta*. 2012. 14 iyunya. №5806 [Web resource]. URL: <http://www.rg.ru/2012/06/14/premier.html>
19. Golubeva A.S. Magaril E.R. *Sovershenstvovanie sistemy nalogoooblozheniya nefteproduktov kak instrument ekologicheskoy bezopasnosti [Oil products taxation system development as a tool of environmental safety] // Nauchno – tekhnicheskie vedomosti Sankt – Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki. SPb.: Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta. 2012. № 5 (156). S.138 – 142.*
20. *Energoeffektivnost i razvitie energetiki [Power efficiency and energy development]: Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii [Web resource]*. URL: <http://minenergo.gov.ru/upload/iblock/afcf/afcf90b96ec0fef29f2ededabb6a4a131.pdf>

УДК 656.13.072

**Артур Игоревич Петров**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Тюменского государственного нефтегазового университета (ТюмГНГУ),  
**Владислав Александрович Игнатьюгин**, ведущий инженер управления по транспорту Департамента дорожной инфраструктуры и транспорта г. Тюмени

## ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЕ ТАРИФЫ НА ГОРОДСКОМ ОБЩЕСТВЕННОМ ТРАНСПОРТЕ. МИРОВОЙ ОПЫТ И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РОССИЙСКИХ УСЛОВИЯХ

**Artur I. Petrov, PhD, Associate professor of «Automobile transport exploitation» Department Tyumen state Oil and Gas University**

**Vladislav A. Ignatyugin, leading transport engineer of Tyumen Department of road infrastructure and transport**

### The Differentiated Tariffs On City Public Transport. World Experience And Possibility Of Its Use In The Russian Conditions

#### Аннотация

В статье рассматриваются достоинства и недостатки ныне используемой системы тарифообразования на общественном транспорте. Проанализированы изменения пассажирских тарифов в Тюмени за последние годы, а также мировой опыт в данной сфере. Предложена идеология дифференциации тарифов на городских автобусных маршрутах с учетом особенностей формирования спроса на услуги общественного транспорта населением.

**Ключевые слова:** общественный транспорт, тарифообразование, опыт тарифообразования в Тюмени и других городах мира, дифференцированные тарифы.

#### Abstract

In article questions of advantage and shortcomings of nowadays used system of tariff setting on public transport are considered. Results of the analysis of change in recent years passenger tariffs in Tyumen, and also world experience in this sphere are presented. The ideology of tariffs differentiation on city bus routes taking into account features of formation of demand for services of public transport by the population is offered.

**Key words:** public transport, tariff setting, experience of tariff setting to Tyumen and other cities of the world, the differentiated tariffs.

Эффективность функционирования системы пассажирского общественного транспорта (ПОТ) города формируется под влиянием множества разнообразных факторов. Управление ПОТ предназначено для выбора наилучших стратегических и оперативных решений с целью итогового достижения наилучших показателей эффективности. Главное в оперативной деятельности организаторов транспортного обслуживания населения — выявление актуальных проблем, установление их сути, проработка путей решения задач, направленных на устранение факторов, формирующих эти проблемы.

Проблема всегда формируется как противоречие между желаемым и фактическим сценарием производственного процесса. Сегодня для общественного транспорта среди других проблем есть одна базисная, определяющая формирование частных, — проблема низкой эффективности всей системы ПОТ и ее подсистем. Во многом она определяется несовершенством системы тарифообразования на услуги общественного транспорта в городах РФ. Необходимо отметить, что эта проблема имеет общемировой характер, поэтому полезно изучить опыт в данной сфере в других странах, попытаться выявить в этом опыте что-то рациональное, что можно было бы применить в наших условиях.

Первое, на что обращаешь внимание при изучении опыта в вопросах тарифообразования на ПОТ в зарубежных странах, — большое разнообразие тарифных систем ПОТ.

Интересен пример тарифообразования на общественном транспорте городов Германии, особенно широчайшая система тарифов на услуги ПОТ в столице Германии — Берлине.

В Берлине существуют три тарифные зоны. Зона А окружена кольцом электрички и включает в себя городской центр. Зона В доходит до границы самого города, а зона С охватывает некоторые окрестности, в том числе Потсдам, аэропорт Шенефельд и Ораниенбург [1].

Билеты можно подбирать в зависимости от того, в каких районах города преимущественно будут осуществляться по-



ездки, так как в соответствии с зоной действия билеты, как правило, представлены в трех категориях:

- билеты, действующие в зонах А и В;
- билеты, действующие в зонах В и С;
- билеты, действующие во всех трех зонах — А, В, С.

При этом тарифная система проработана до мельчайших деталей и включает различные виды билетов, позволяющие удовлетворять потребностям широчайшего круга потребителей транспортных услуг (табл. 1).

Разовый билет действителен в течение 2 ч и позволяет прерывать поездку и пересаживаться на другие виды транспорта: трамвай, метро и т. д. При этом отличительная особенность разового билета то, что его не разрешается использовать для возврата в обратном направлении, независимо от того, осуществляется он тем же или иным путем. Билет действует с того момента, когда его прокомпостировали [1]. Суточный проездной дает возможность неограниченного передвижения в зонах, где он действителен, в течение дня, указанного на билете, с момента начала поездки, когда его необходимо прокомпостировать, и до 3 утра следующего дня [1]. Билет на 4 поездки действителен только в зонах А и В. Он состоит из 4 сегментов, каждый из которых действует аналогично разовому билету.

Билет на короткую поездку используется, если расстояние не превышает 3 остановок на метро или городской электричке и 6 остановок на автобусе или трамвае. Для экспресс-автобусов в это число включены и те остановки, на которых он не останавливается. Эти билеты можно использовать и на паромках, кроме маршрута F10 (Ванзее — Кладов). Кроме того, такой билет можно применять при перемещениях между зонами А и В, В и С, а также при поездках внутри зоны С исключительно на городской электричке. Возможны пересадки только с метро на электричку и наоборот. Прерывать поездку и совершать обратный путь по тому же маршруту не разрешается. Билет должен быть прокомпостирован, если он это предусматривает [1].

Все вышеупомянутые билеты имеют 2 планки стоимости: обычную и льготную. Обычный тариф рассчитан на взрослого человека, сниженный по стоимости льготный предназначен для ребенка от 6 до 14 лет, дети до 6 лет могут ездить бесплатно (на паромках — не более 3 детей одновременно), что распространяется также на детские коляски и багаж. При использовании разового билета и билета на короткую поездку необходимо покупать льготный билет на каждую перевозимую собаку. Суточный билет и билет на 4 поездки дают право на провоз одной собаки бесплатно. Для поездок вместе с велосипедом существует специальный тариф [1].

Расширенный билет позволяет продлить действие билетов на зону С или А для билетов, действительных в зонах А и В, или В и С соответственно. Его можно использовать при разовых поездках в зонах А и С и пересадках по основному маршруту. Он действителен в течение 2 ч после компостирования, но не дольше, чем основной билет. В остальном действует аналогично разовому билету. Расширенный билет может быть использован только вместе с основным билетом и должен быть прокомпостирован либо перед началом поездки, либо на последней станции в зоне В [1].

Недельный проездной действителен в течение 7 последовательных дней, начиная с дня, указанного на билете, либо

**Таблица 1 — Основные виды билетов на ПОТ Берлина и их стоимость, евро [1]**

Тарифные зоны	АВ		ВС		АВС	
	Обыч-ный	Льгот-ный	Обыч-ный	Льгот-ный	Обыч-ный	Льгот-ный
Разовый	2,40	1,50	2,80	1,90	3,10	2,20
Суточный	6,50	4,60	6,80	5,00	7,00	5,20
На 4 поездки	8,40	5,40	—	—	—	—
На короткую поездку	1,40	1,10	1,40	1,10	—	—
Расширение	Для зон А или С 1,60				—	—
Недельный проездной	28,00	—	28,90	—	34,60	—
Месячный проездной	77,00	—	78,00	—	95,00	—
Месячный проездной (с 10 утра)	55,50	—	56,50	—	68,00	—
Годовой проездной	710,00	—	740,00	—	895,00	—
Групповой	15,50	—	15,80	—	16,00	—
Групповой для школьников	3,00	—	—	—	3,10	—
Разовый для велосипедистов	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных
На короткую поездку для велосипедистов	1,10	—	1,10	—	—	—
Дневной для велосипедистов	4,60	—	5,00	—	5,20	—
Месячный проездной для велосипедистов	9,80	—	—	—	12,10	—
Berlin CityTourCard (48 ч)	16,90	—	—	—	18,90	—
Berlin CityTourCard (72 ч)	22,90	—	—	—	24,90	—
Berlin CityTourCard (5 сут)	29,90	—	—	—	34,90	—
Berlin WelcomeCard (48 часов)	18,50	—	—	—	20,50	—
Berlin WelcomeCard (72 ч)	24,50	—	—	—	26,50	—
Berlin WelcomeCard Museum Island (72 ч)	24,00	—	—	—	36,00	—
Berlin WelcomeCard (5 сут)	31,50	—	—	—	36,50	—

с момента первой поездки и до полуночи на седьмой день. С понедельника по пятницу с 20.00 и по выходным на протяжении всего дня и официальным праздникам можно ездить по проездному билету и бесплатно провозить 1 взрослого и до 3 детей в возрасте от 6 до 14 лет. Возможность бесплатного провоза сопровождающих заканчивается в 3 часа ночи следующих суток, если это не выходной или не официальный праздник (это правило применяется только к той земле, где этот праздник является официальным). Этот билет также может быть передан другому лицу [1].

Месячный проездной имеет аналогичные особенности применения, за исключением того, что действителен в течение месяца [1].

Годовой проездной обойдется до 23% дешевле, чем покупка 12 месячных проездных. Его срок действия начинается в полночь за день до начала первого календарного месяца года и заканчивается в полночь дня после истечения последнего календарного месяца. В остальном его применение идентично месячному проездному [1].

Месячный проездной (с 10.00) имеет особенности применения, аналогичные месячному проездному, но с некоторыми поправками. Он может использоваться с 10 утра до 3 ночи следующего дня с понедельника по пятницу. По выходным и официальным праздникам можно ездить на протяжении всего дня [1].

С билетом для небольшой группы (до 5 человек) можно передвигаться на общественном транспорте неограниченное число раз в течение всего дня до 3 утра следующих суток. Билет действует в тот день, что на нем указан, либо с момента его первого использования [1].

Специальная группа билетов предусмотрена для велосипедистов.

Резюмируя, отметим, что в Берлине используются самые разнообразные методы дифференциации тарифов как по расстоянию, с учетом тарифных зон, так и по времени. Кроме того, существует обширная гамма различных проездных, позволяющих пассажирам выбирать наиболее приемлемый для них вариант. Проездные дают возможность ездить на ПОТ дешевле, чем постоянно ездить по разовым билетам, причем чем дольше срок действия, тем дешевле в среднем одна поездка.

Во многих других городах Германии находят применение аналогичные подходы к тарифообразованию. Разница заключается в деталях, т. е. сроки действия разовых билетов могут быть иными, равно как и ограничения действия суточных билетов. Чтобы не дублировать информацию, далее вкратце отметим некоторые наиболее интересные отличительные особенности.

Во Франкфурте-на-Майне и его окрестностях существует практика использования так называемых билетов KombiTicket. Суть заключается в том, что по билетам на многие мероприятия (концерты, спортивные состязания, театр, выставки и т. п.) можно ездить и в общественном транспорте. На KombiTicket наносится логотип транспортной системы Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) [2].

В Париже с часу ночи и до половины шестого утра на линию выходят ночные автобусы Noctilien и Noctambus. Они перемещаются по 18 маршрутам в городе и окрестностях. Наиболее примечательно, что в ночном автобусе действительны единые билеты на парижский транспорт — потребуются купить специальный билет у водителя [3]. При этом стоимость ночного билета 2,7 евро, в то время как обычный разовый билет стоит 1,4 евро [4]. Аналогично функционируют ночные тарифы на проезд в автобусах Лондона [5].

В бразильском городе Куритиба существует дифференциация билетов на автобус по дням недели. В рабочий день поездка стоит 2,5 реала, в выходной — 1 реал [6].

В Лондоне для проезда применяются смарт-карты Oyster. С их помощью можно оплачивать поездки во всех видах общественного транспорта: в автобусах, метро, трамваях, DLR и с определенными оговорками — на железной дороге. На эти карточки можно и «записать» несколько различных проездных документов, например Travelcard на 7 дней и более, и по-

ложить наличные деньги, которыми можно расплачиваться за разовые поездки. Оплачивать поездки со смарт-карты дешевле, чем наличными, а в случае нескольких поездок за день с карточки будет снято денег не более стоимости Travelcard на 1 день. Интересна лондонская дифференциация тарифов, связанная с учетом утренних часов пик. Стоимость 1 поездки составляет при оплате наличными £1,50, при оплате смарт-картой — £1,00 в час пик (в будние дни с 7.00 до 9.30) и £0,80 — в любое другое время [7].

В лондонском метро при оплате проезда в нескольких зонах смарт-картами Oyster в будние дни с 7.00 до 19.00 оплата проезда дороже, чем в остальное время [7].

Во многих странах помимо системы билетов и проездных также применяются в качестве универсального билета электронные пластиковые карточки. На их баланс зачисляется определенная сумма, которая может использоваться для оплаты проезда на разных видах транспорта.

В качестве примера можно привести нью-йоркскую MetroCard. Эти карты также можно приобрести в автоматах, начальная стоимость — \$10. Всего на карту можно положить от \$4,50 до \$80. При этом поездка по MetroCard, например, на метро или автобусе обойдется в \$2,25, притом что разовый билет, который продают в автомате, стоит \$2,5. Иначе говоря, поездки по MetroCard дешевле, чем покупка разовых билетов. Кроме того, пассажир получает возможность бесплатного трансфера с метро на автобус и между автобусами. Также при вложении \$10 и более пассажир получает бонус в размере 7%. Эти карты пополняются в автоматах, также есть возможность «прикрепить» их к банковским картам благодаря системе EasyPay. Таким образом, можно избежать постоянной необходимости пополнять карты у автоматов перед входом на станцию метро [8].

В Сингапуре для оплаты услуг ПОТ широкое применение нашли электронные смарт-карты EZ-Link, позволяющие экономить на проезде до 15%. Кроме оплаты проезда, карта EZ-Link служит как дополнительное льготное удостоверение для студентов, пенсионеров (от 60 лет), работников госслужб. Некоторые учебные заведения в Сингапуре используют такие смарт-карты для учета посещаемости студентов, ими можно оплачивать питание в столовой. Кроме того, картой EZ-Link можно рассчитаться в филиалах сети McDonalds и сети супермаркетов 7-Eleven. Картой EZ-Link можно также оплатить поездку на монорельсе Sentosa Express [9].

Итак, выделим несколько критериев, в соответствии с которыми можно рассмотреть мировой опыт системы оплаты и тарифообразования. В этом качестве следует представить:

- дифференциацию тарифной ставки в зависимости от расстояния, иначе говоря, наличие тарифных зон;
- дифференциацию стоимости билетов по дням недели в формате будни/выходные;
- дифференциацию тарифов по времени суток через различные тарифы в дневное и ночное время или гибкую ценовую политику по отношению к часам пик;
- наличие проездных на разные сроки, с уменьшением удельной стоимости проезда обратно пропорционально числу поездок;
- наличие разовых билетов, дающих возможность пересадки;
- наличие единых билетов на все виды ПОТ (в т. ч. смарт-карты);

- наличие разных тарифов для разных слоев населения, т. е. льгот;
- наличие специальных билетов для туристов и жителей города, которые предоставляют право на скидки в культурно-развлекательных и торговых учреждениях.

Информацию о соответствии системы тарифообразования и оплаты проезда этим критериям в том или ином городе представим в виде табл. 2. Графа «Билеты для туристов» в Токио [10] выделен светло-зеленым, так как там имеются специальные проездные для иностранцев, которые стоят несколько дешевле, чем для резидентов Токио, но они не предоставляют никаких скидок в культурно-развлекательных учреждениях.

**Таблица 2 — Применение различных форм оплаты и методов дифференциации тарифов на ПОТ в городах различных стран мира**

Страна (город)	Виды способов оплаты и мер тарифообразования							
	Тарифные зоны	Тарифы по часам суток	Тарифы по дням недели	Наличие системы проездных	Билеты с правом пересадки	Единые билеты на весь ППОТ	Наличие льгот	Билеты для туристов
Австрия (Вена)	+			+	+	+	+	+
Англия (Лондон)	+	+	+	+		+	+	
Бразилия (Куритиба)	Нет данных		+	Нет данных				
Германия (Берлин, Франкфурт)	+	+		+	+	+	+	+
Италия (Рим)		+		+	+	+	+	+
Сингапур (Сингапур)	+			+		+	+	+
США (Нью-Йорк)	+			+		+	+	
Франция (Париж)	+	+		+		+	+	+
Япония (Токио)	+	+	+	+		+	+	+

В целом, анализ данных табл. 2 позволяет сделать вывод о том, что в крупных городах, как правило, используется множество различных подходов, для того чтобы дифференцировать тарифы с учетом различных факторов. При этом организаторы предоставляют пользователям системы ПОТ в зависимости от их потребности, возможность выбирать для себя наиболее выгодные типы билетов и проездных.

Следовательно, дифференциация тарифов не только возможна, но и является мощным маркетинговым фактором привлечения горожан к пользованию ПОТ.

Каким образом можно корректно и обоснованно дифференцировать тарифы на услуги городского ПОТ у нас в стране?

Рассмотрим опыт тарифообразования на общественном транспорте Тюмени, на примере которого становится понятно,

каким образом решался в последние десятилетия этот вопрос в российских муниципалитетах.

В Тюмени до сих пор используется система тарифов на услуги ПОТ, основанная на принципах, применявшихся еще в советское время. Перевозка пассажиров в автобусах осуществляется за плату, уровень которой определяет тариф. Тариф — плановая цена за перевозку. Величина тарифа должна обеспечивать возмещение расходов АТП за осуществление перевозок.

Советская система тарифообразования основывалась на решении Совета Министров СССР 1954 г. Тарифы на перевозку пассажиров автомобильным транспортом на территории РСФСР (включая вопросы оплаты перевозки льготных категорий пассажиров, детей, багажа и штрафов за безбилетный проезд) устанавливались преискурантом № 13-02-01. За проезд в черте города, независимо от расстояния, взимается фиксированная плата. Своей базой она имеет среднюю дальность поездки в 3,3 км и расчетный тариф за проезд 1 км. После денежной реформы 1961 г. этот расчетный тариф составлял 1,5 коп. за 1 км пути в автобусе общего типа. В результате расчетная стоимость проезда составляла для большинства городов РСФСР 5 коп. [11, с. 197 — 198]. В виде исключения был установлен перечень городов РСФСР, для которых тариф составлял не 5 коп. за поездку, а 4, 6, 8 коп. В условиях относительно низких темпов роста государственных цен, в том числе на топливо, и при изначально экономически рационально обоснованных тарифах уже к середине 1980-х гг. эта система была убыточной в крупных и средних городах СССР [11, с. 219]. Так, в Тюменском ПАТП № 1 в 1988 г. в целом по предприятию на 1 руб. доходов приходилось 1,33 руб. расходов.

Основываясь на данных, полученных в МКП ГТ «Тюмень-гортранс», можно проследить ретроспективу изменения тарифов муниципальных операторов на перевозку пассажиров в черте города. Наглядно процесс изменения тарифов на услуги ПОТ в Тюмени представлен на рис. 1 и 2.

Несмотря на постоянный рост тарифов в течение 20 последних лет, все это время система ПОТ Тюмени с точки зрения финансов была убыточной и дотировалась из муниципального бюджета. Основная причина — тарифы на услуги ПОТ устанавливались администрацией Тюмени без учета особенностей формирования доходно-расходных характеристик на различных маршрутах.

Исследования, проведенные в 2012 — 2013 гг. Тюмени, были направлены на выявление фактического разнообразия величин доходности перевозок пассажиров организованным общественным транспортом на различных маршрутах. Изучались причинно-следственные связи между показателями различных факторов внешней среды и доходностью пассажирских перевозок. Цель, которая при этом преследовалась, заключалась в определении возможности введения дифференцированных тарифов на услуги ПОТ Тюмени.

Выводя за рамки рассмотрения такие факторы, как социально-экономические, сезонные, погодноклиматические, примем, что для маршрутов ПОТ важнейшими факторами внешней среды будут группы маркетинговых и транспортных факторов. Именно эти факторы в большей степени в текущем масштабе времени определяют те отличительные особенности перевозочного процесса, которые в итоге формируют эффективность перевозочного процесса.

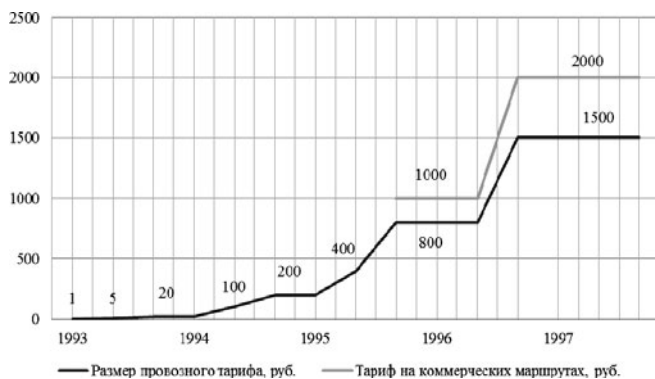


Рисунок 1 — Диаграмма изменения тарифа на общественном транспорте Тюмени в период с 1993 до 1997 г.

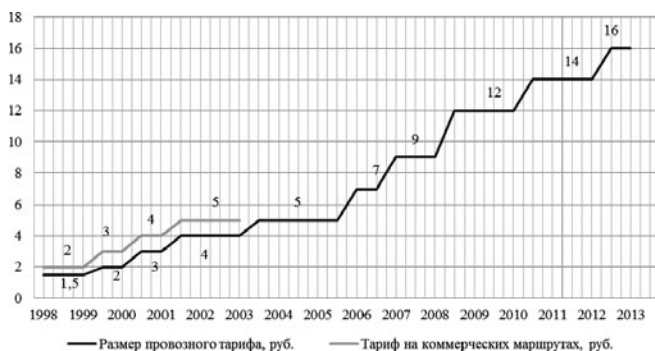


Рисунок 2 — Диаграмма изменения тарифа на общественном транспорте Тюмени в период с 1998 до 2013 г.

Важнейшей характеристикой эффективности ПОТ, формируемой с учетом особенностей пассажиропотоков на маршруте, является удельный показатель объемов перевозок пассажиров (за час  $Q_{час}$  или на 1 км пробега автобуса  $Q_{1 км}$ ). Этот показатель варьируется в широком диапазоне значений на разных маршрутах. Эксплуатационные расходы перевозчиков являются относительной константой (например, в ОАО «ПАТП № 1» — 65,68 руб./1 км).

На рис. 3 и 4 представлены примеры диаграмм изменения пассажиропотока во времени и в пространстве на типичном городском маршруте (маршруте ПОТ № 25 Тюмени).

Аналогично формируются пассажиропотоки на любом другом маршруте. Разница лишь в особенностях формирования абсолютной величины и относительной неравномерности пассажиропотоков во времени и пространстве (характеризуется коэффициентом неравномерности  $K_{нер}$ ), в особенностях характеристик самого маршрута и связи между ними. Также присутствует разница в транспортных условиях движения автобусов по маршрутной сети (характеризуется показателем сложности маршрута  $П_{сл}$ ). Сочетание влияния этих двух групп факторов и определяет разнообразие возможных итоговых экономических результатов для перевозчиков в различных условиях.

Величины коэффициентов неравномерности пассажиропотоков в пространстве и времени  $K_{нер}$  [12, с. 142] определяются как

$$K_{нер.пт} = \frac{Q_{max}}{Q_{cp}}, \quad 1 \leq K_{нер.пт} \leq K_{нер.пт. max} \quad (1)$$

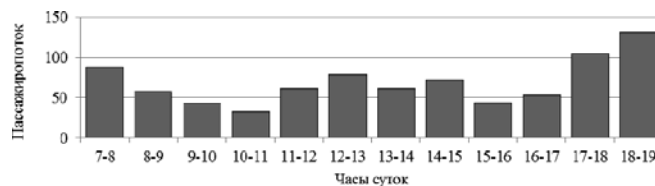


Рисунок 3 — Типичная диаграмма изменения пассажиропотока по часам суток для маршрута № 25 (Железнодорожный вокзал — ул. Таллинская)

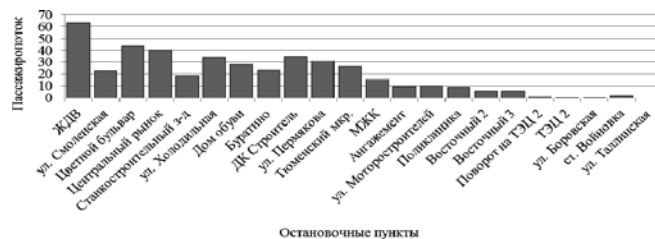


Рисунок 4 — Типичная диаграмма изменения пассажиропотока в прямом направлении для маршрута № 25 (Железнодорожный вокзал — ул. Таллинская)

где  $Q_{max}$  — максимальная мощность пассажиропотока, пасс./ед. времени;

$Q_{cp}$  — средняя мощность пассажиропотока, пасс./ед. времени.

Комплексный коэффициент неравномерности пассажиропотоков  $K_{компл.нер.пт}$  [13] определяется путем перемножения двух частных коэффициентов  $K_{нер.время}$  и  $K_{нер.пространство}$ .

$$K_{компл.нер.пт} = K_{нер.время} \cdot K_{нер.пространство} \quad (2)$$

Фактические значения комплексного коэффициента неравномерности пассажиропотоков  $K_{компл.нер.пт}$  на городских маршрутах ПОТ Тюмени, по данным авторов, могут достигать от 1,3 (при  $K_{нер.время} = 1,15$  и  $K_{нер.пространство} = 1,15$ ) до 7 — 8 (при  $K_{нер.время} = 3,5 - 4$  и  $K_{нер.пространство} = 2$ ).

Численные значения показателя сложности маршрута  $П_{сл}$  (3) определялись по методике А.А. Назарова [14]. При его расчете используются среднестатистические маршрутные значения плановой средней эксплуатационной скорости  $V_{ф}$ , средней длины перегона  $l_{п}$ , удельного числа поворотов на маршруте движения  $n_{п}$ , коэффициента использования пассажироместности  $\gamma$  и средней плотности транспортного потока  $\rho$ :

$$П_{сл} = -0,314 - 0,059 V_{ф} - 0,506 l_{п} + 0,713 n_{п} + 0,764 \gamma + 0,246 \rho \quad (3)$$

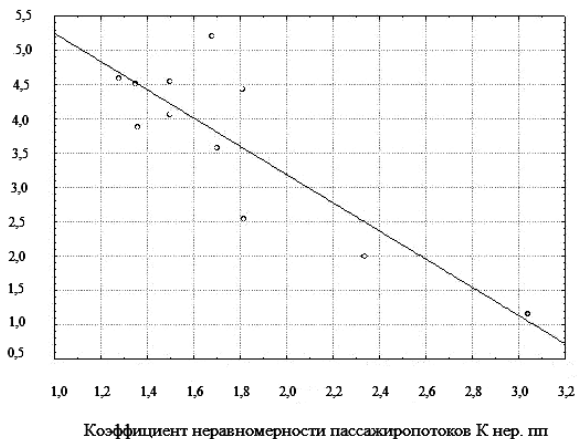
На рис. 5 — 6 представлены зависимости  $Q_{1 км} = f(K_{компл.нер.пт})$  и  $Q_{1 час} = f(П_{сл})$ , построенные для совокупности данных «Маршруты ПОТ Тюмени».

Линейная модель, описывающая зависимость на рис. 5, представлена как

$$Q_{1 км} = 7,31 - 2,06 K_{компл.нер.пт} \quad (4)$$

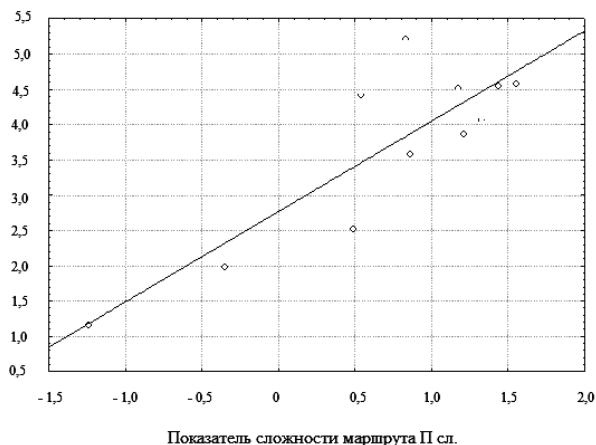
Резюме по зависимости (4): максимальная эффективность характерна для тех маршрутов ПОТ, где пассажиропотоки формируются максимально равномерно как в пространстве (по длине маршрута), так и по времени (в течение суток). При повышении неравномерности пассажиропотоков эффективность перевозочного процесса снижается.

Удельный за 1 км. пробега объем перевозок  $Q_{1 км}$ , пасс./1 км.



**Рисунок 5 — Зависимость  $Q_{1 км} = f(K_{компл. пер. пл.})$ , построенная для совокупности данных «Маршруты ПОТ Тюмени»**

Удельный за 1 км. пробега объем перевозок  $Q_{1 км}$ , пасс./1 км.



**Рисунок 6 — Зависимость  $Q_{1 км} = f(П_{сл.})$ , построенная для совокупности данных «Маршруты ПОТ Тюмени»**

Линейная модель, описывающая зависимость рис. 6,

$$Q_{1 км} = 2,76 + 1,28 \cdot П_{сл.} \quad (5)$$

Вывод по зависимости (5): максимальная эффективность характерна для относительно сложных с позиции транспортного фактора маршрутов ПОТ (обычно такие маршруты обслуживают центральную часть города). При понижении сложности транспортных условий работы эффективность перевозочного процесса снижается. Таким образом, эффективно организовать перевозочный процесс можно только в условиях городского центра, обслуживание периферии практически всегда затратно и неэффективно.

Так как доход перевозчика определяется величиной удельной доходности на 1 км пробега, то эффективность для перевозчиков на различных городских маршрутах ПОТ может различаться в 5 и более раз. Этот факт является одним из подтверждений целесообразности тезиса о возможности и необходимости вве-

дения дифференцированной платы для пассажиров. И это не будет противоречить объективным закономерностям формирования экономики перевозочного процесса.

Можно ли использовать представленный выше зарубежный опыт дифференцирования тарифов на услуги общественного транспорта и модели формирования эффективности пассажирских перевозок (4) — (5) в наших российских городах? По мнению авторов — и можно, и необходимо. Однако следует пояснить, что данный вывод касается в первую очередь крупнейших городов-миллионников, но может быть перспективен и для крупных городов, таких как Тюмень (население в 2013 г. — около 640 тыс. чел.).

Важнейшая задача дифференциации тарифов — повышение заинтересованности жителей города в услугах ПОТ. Эта заинтересованность может проявиться в том числе и через осознание прогрессивности новых методов тарифообразования, понимание того, что разовая поездка на близкие расстояния может стоить на общественном транспорте достаточно дешево. Также важно формирование в сознании горожан представления о прогрессивности специалистов, организующих процессы транспортного обслуживания населения.

Рассмотрим основные принципы применения дифференциации разовых тарифов на общественном транспорте российских городов, предлагаемые авторами.

1. Тарифы могут быть дифференцированы как во времени, так и в пространстве.

2. Дифференциация тарифов во времени по сезонам необходима для учета повышенных затрат перевозчиков в зимнее время года. Зимние тарифы по отношению к летним могут быть выше на 10 — 20%.

3. Дифференциация тарифов во времени по дням недели (тариф выше в будни, чем в выходные) позволит частично положительно повлиять на увеличение мобильности городского населения в выходные и в то же время повысить эффективность перевозок в будни. Тарифы в будни также могут быть выше, чем в выходные, на 20 — 50%.

4. Дифференциация тарифов во времени по часам суток необходима для маршрутов, где наблюдается высокая неравномерность пассажиропотоков во времени (наличие явных пиковых нагрузок и межпиковых спадов). В час пик тарифы могут быть повышены, в межпиковое время — снижены. Этим может быть достигнуто частичное сглаживание пиков пассажиропотоков. Разница в тарифах может достигать 1,5 — 2 крат.

5. Дифференциация тарифов в пространстве (по группам маршрутов) позволит учесть маркетинговые особенности формирования спроса на услуги на отдельных маршрутах и также повысит эффективность перевозок. Разница в тарифах может быть очень значительной (до 2 — 3 крат) и определяется такими параметрами перевозочного процесса, как средняя дальность поездки пассажира и коэффициент сменности за рейс.

6. Широкое использование дифференциации тарифов затруднительно без применения современных информационных технологий. В связи с этим необходимо отметить, что применение дифференцированных тарифных систем на общественном транспорте в первую очередь может быть рекомендовано для крупнейших и крупных городов. Для малых и средних городов внедрение дифференцированных тарифов может быть весьма дорогостоящей и экономически неоправданной процедурой.

7. Методической основой дифференциации тарифов могут быть результаты логистического классифицирования маршрутов ПОТ города по группам с учетом идеологии, рассмотренной в [13].

В заключение отметим, что использование в сфере общественного транспорта дифференцированных тарифов позволит если не решить полностью проблему низкой эффективности деятельности перевозчиков, то хотя бы снизить ее остроту. Не-

маловажно также и то, что пользователи общественного транспорта, особенно те, которые пользуются им редко, в межпиковое время и на незначительные расстояния, прочувствуют не только социальную справедливость в данной сфере, но и прямую выгоду для себя, что будет стимулировать их пользоваться общественным транспортом чаще. А это автоматически приведет к формированию возможностей возрождения городского пассажирского транспорта как явления общественной жизни.

## Литература

1. Tickets & Fares // Официальный сайт BerlinerVerkehrsbetriebe (BVG). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bvg.de/index.php/en/17102/name/Tickets>.
2. Система общественного транспорта региона Рейн-Майн (Франкфурт и окрестности) // Живой журнал пользователя new\_finder. Дневник наблюдений Германия, Европа, путешествия, велосипеды и немного всякой всячины 2013. 25 января. [Электронный ресурс]. URL: <http://new-finder.livejournal.com>.
3. Транспорт в Париже // Туристер.ру — туристическая социальная сеть. 2009. 30 сентября. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tourister.ru>.
4. Городской транспорт во Франции // Портал Travel.ru — всё о туризме и путешествиях. 2009. 25 февраля. [Электронный ресурс]. URL: <http://guide.travel.ru/france/transport/local>.
5. Транспорт в Лондоне // Сайт компании VIP-London. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vip-london.ru/transport-v-londone.html>.
6. Куритиба // Живой журнал пользователя alexander\_loz «Архитектура и жизнь». 2012. 7 октября. [Электронный ресурс]. URL: <http://alexander-loz.livejournal.com>.
7. Общественный транспорт Лондона // Сайт London.ru. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.london.ru/transport>.
8. Транспорт в Нью-Йорке // Туристер.ру — туристическая социальная сеть. 2011. 31 октября. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.tourister.ru/world/america/united-states/city/new\\_york\\_city](http://www.tourister.ru/world/america/united-states/city/new_york_city).
9. Транспорт Сингапура // Туристер.ру — туристическая социальная сеть. 2011. 10 ноября. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tourister.ru/world/asia/singapore/city/singapore>.
10. Транспорт в Токио // Туристер.ру — туристическая социальная сеть. 2013. 8 февраля. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tourister.ru/world/asia/japan/city/tokyo>.
11. Володин Е.П., Громов Н.И. Организация и планирование перевозок автомобильным транспортом : учебник. М. : Транспорт, 1982. 224 с.
12. Пассажирыские автомобильные перевозки / В.А. Гудков, Л.Б. Миротин, А.В. Вельможин, С.А. Ширяев. М. : Горячая линия — Телеком, 2004. 448 с.
13. Петров А.И., Яковенко Е.А. Логистические основания маркетинг-анализа рынка услуг общественного транспорта // Транспорт Урала. 2013. № 1. С. 14 — 19.
14. Назаров А.А. Разработка комплекса мероприятий по совершенствованию функционирования городских автобусов на основе учета сложности маршрута движения : Дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 190 с.

## References

1. Tickets & Fares. // Ofitsialny sait BerlinerVerkehrsbetriebe (BVG) [BVG ServiceCenter]. [Elektronny resurs]. URL: <http://www.bvg.de/index.php/en/17102/name/Tickets>
2. Sistema obshchestvennogo transporta regiona Rein-Main (Frankfurt i okrestnosti) [Public transport system of Rhine-Main region (Frankfurt and its neighborhood)]. // Zhivoy Zhurnal polzovatelya new\_finder. Dnevnik nablyudeniya Germaniya, Evropa, puteshestviya, velosipedy i nemnogo vsyakoy vsyachiny 2013. 25 yanvarya [Elektronny resurs]. URL: <http://new-finder.livejournal.com>
3. Transport v Parizhe [Transport in Paris]. // Turister.ru turisticheskaya sotsialnaya set. – 2009. 30 sentyabrya [Elektronny resurs]. URL: <http://www.tourister.ru>
4. Gorodskoi transport vo Frantsii [Public urban transport in France]. // Portal Travel.ru – vsyo o turizme i puteshestviyakh. 2009. 25 fevralya [Elektronny resurs]. URL: <http://guide.travel.ru/france/transport/local>
5. Transport v Londone [Transport in London]. // Sait kompanii VIP-London. [Elektronny resurs]. URL: <http://www.vip-london.ru/transport-v-londone.html>
6. Kuritiba [Curitiba]. // Zhivoy Zhurnal polzovatelya alexander\_loz «Arhitektura i zhizn» 2012. 7 oktyabrya [Elektronny resurs]. URL: <http://alexander-loz.livejournal.com>
7. Obshchestvenny transport Londona [Public transport in London]. // Sait London.ru. [Elektronny resurs]. URL: <http://www.london.ru/transport>
8. Transport v Nyu-Yorke [Transport in New York]. // Turister.ru turisticheskaya sotsialnaya set. 2011. 31 oktyabrya [Elektronny resurs]. URL: [http://www.tourister.ru/world/america/united-states/city/new\\_york\\_city](http://www.tourister.ru/world/america/united-states/city/new_york_city)
9. Transport Singapura [Transport in Singapore]. // Turister.ru turisticheskaya sotsialnaya set. – 2011. 10 noyabrya [Elektronny resurs]. URL: <http://www.tourister.ru/world/asia/singapore/city/singapore>
10. Transport v Tokio [Transport in Tokyo]. // Turister.ru turisticheskaya sotsialnaya set. 2013. 8 fevralya [Elektronny resurs]. URL: <http://www.tourister.ru/world/asia/japan/city/tokyo>
11. Volodin E. P., Gromov N.I. Organizatsiya i planirovanie perevozok avtomobilnym transportom [Truck traffic organization and planning]: Uchebnik. M.: Transport, 1982. 224 p.
12. Passazhirskie avtomobilnye perevozki [Passenger vehicle transportation] / V.A.Gudkov, L.B. Mirotin, A.V.Velmozhin, S.A. Shiryayev. M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2004. 448 p.
13. Nazarov A.A. Razrabotka kompleksa meropriyatii po sovershenstvovaniyu funktsionirovaniya gorodskikh avtobusov na osnove ucheta slozhnosti marshruta dvizheniya [Development of action plan for city bus operation improvement with regard to traffic route complexity] : Dis. ... kand. tekh. nauk. Moskva, 2006. 190 p.
14. Petrov A.I., Yakovenko E.A. Logisticheskie osnovaniya marketing-analiza rynka uslug obshchestvennogo transporta [Logistics fundamentals of public transport services market analysis] // Transport Urala. 2013. № 1. P. 14 – 19.

УДК 004.896

Андрей Сергеевич Шека, руководитель лаборатории технического зрения и робототехники Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГЕБР ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОТКАЗОВ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Andrey S. Sheka, head of "Computer vision and robotics" laboratory, Ural State University of Railway Transport (USURT)

### Experimental Analysis Of Relational Algebra For Mobile Robots Failure Identification

#### Аннотация

Проведено экспериментальное сравнение алгебр отношений Аллена для идентификации отказов мобильного робота в результате естественных событий при передвижении по некоторому маршруту в рамках помещения. Рассмотрена оптимизация расширенной алгебры отношений Аллена за счет введения дополнительных алгебраических операций, полученных при помощи генетического алгоритма. Также предложена оптимизация алгебры, основанная на введении определяющих соотношений, построенных при помощи генетического алгоритма. На основе вычислительных экспериментов проведено тестирование описанных оптимизаций расширенной алгебры отношений. Предложен алгоритм самосознания на основе комплексного использования рассмотренных в работе методов.

**Ключевые слова:** алгебра отношений, мобильный робот, генетический алгоритм, самосознание, идентификация отказов.

#### Abstract

In this paper have performed an experimental comparison of Allen's temporal algebra to identify the failures of mobile robots arising from natural events during movement on some indoor routes. We consider the optimization of extended Allen's temporal algebra by defining additional algebraic operations, obtained by genetic algorithm. Also proposed algebra optimization based on the definition of pattern relations, built using a genetic algorithm. We have tested by computational experiments described optimization of extended Allen's temporal algebra. We proposed self-awareness algorithm based on complex use of the considered methods.

**Key words:** temporal algebra, mobile robot, genetic algorithm, self-awareness, identification of failures.

Исследования в области мобильной робототехники в последние годы вызывают значительный интерес. В определенной мере это связано с тем, что мобильные роботы используются в качестве как автономных транспортных средств для передвижения по дорогам общественного пользования [1, 2], так и сервисных роботов [3] для выполнения работ внутри помещения. Мобильные роботы — это автоматизированные транспортные средства. Вопросы самостоятельной диагностики неисправностей в мобильных роботах могут быть в дальнейшем использованы для обеспечения транспортной безопасности на полностью автоматизированных транспортных средствах или на транспортных средствах с высоким уровнем автоматизации. В отличие от промышленных, мобильные роботы действуют в открытой среде, наполненной множеством непредвиденных событий. Например, таких, как столкновение с препятствиями. Подобные события могут нарушить нормальную работу управляющего алгоритма робота. Технические возможности не позволяют предсказывать все подобные события. В частности, из-за недостатка разрешающей способности видеокamеры робота невозможно распознавать все препятствия. Для корректировки работы управляющего алгоритма необходимо идентифицировать такие события.

Идентификация отказов занимает важное место в мировой практике. Эту задачу решают в рамках многих направленных исследований [4 — 6]. В рамках теории автоматического управления рассматривается избыточность данных, получаемых от датчиков. Малый объем поступающих данных позволяет применять относительно классические методы для идентификации событий [7, 8]. При наличии больших объемов данных (например, при анализе видеоданных) используется широкий спектр методов, выбор которых осуществляется в зависимости от решаемой задачи [9 — 11].

В рамках данной работы автором использовалось несколько алгебр отношений для идентификации отказов мобильных роботов: стандартная алгебра отношений Аллена [12], сокращенная алгебра Аллена [13] и расширенная алгебра Аллена [11]. В качестве примера рассмотрим строение сокращенной алгебры Аллена.

Пусть имеются два произвольных события  $A$  и  $B$ . В сокращенной алгебре Аллена отношения определяются следующим образом:

$SBEB(A,B)$ :  $A$  началось до  $B$  и закончилось до  $B$ ;

$SWEB(A,B)$ :  $B$  началось вместе с  $A$  и закончилось до  $A$ ;

$SAEW(A,B)$ :  $B$  началось после  $A$  и закончилось вместе с  $A$ ;

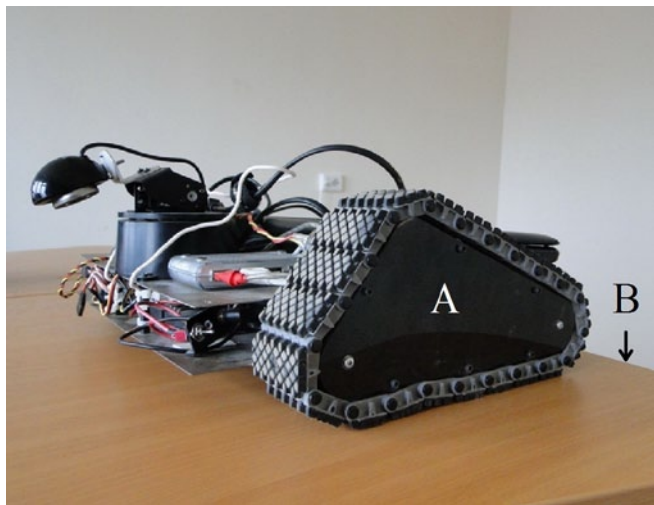
$SAEB(A,B)$ :  $B$  началось после  $A$  и закончилось до  $A$ ;

$SWEW(A,B)$ :  $B$  началось вместе с  $A$  и закончилось вместе с  $A$ ;

$ES(A,B)$ :  $B$  началось после того, как  $A$  закончилось.

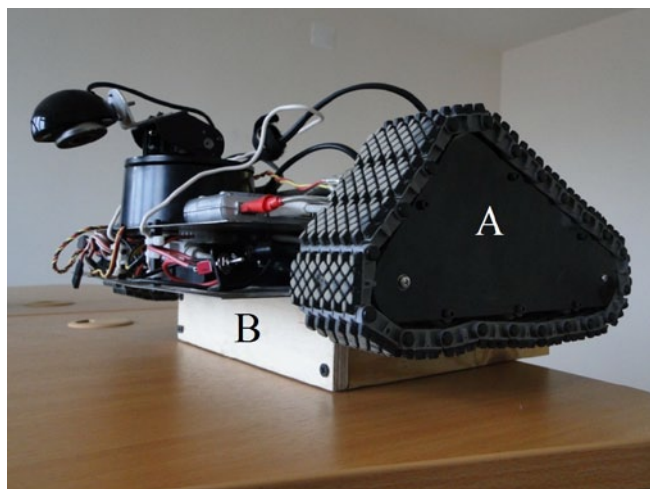
Рассмотрим пример идентификации отказа на основе данной алгебры. Предположим, что  $A$  — это команда движения робота вперед, а  $B$  — это данные с видеокamеры робота о наличии его движения. В случае если робот исправен, то движение вперед описывается отношением  $SWEW(A,B)$ . Столкновение робота с препятствием, в результате которого робот останавливается, описывается отношением:  $SWEB(A,B)$ .

Однако представленная алгебра не содержит некоторых важных отношений. Например, в ситуации, показанной на рис. 1, робот может начать движение в любом направлении, но он находится на столе, и его движение может привести к падению. Чтобы избежать падения, можно проверять положение робота относительно края стола. Однако периодическая или постоянная проверка приведет к существенному снижению производительности.



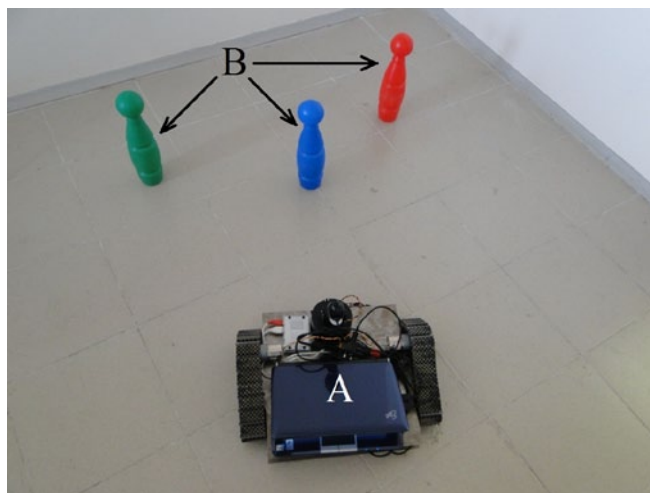
Рисунки 1 — Робот (A) расположен на столе, его передвижения не ограничены. Если робот получит команду повернуться, то он начнет движение. B — край стола

Также можно рассматривать состояние, представленное на рис. 2. В данном случае робот расположен на небольшой подставке. Изображение, полученное с камеры рис. 1, практически не отличается от изображения рис. 2. Робот не видит подставку. Таким образом, он не может определить причину отсутствия движения, так как не способен выделить такое событие  $A$ , которое приводит к отсутствию движения, т. е. событие  $B$ . В некоторых случаях возможно определить причину, но это требует значительных вычислительных затрат, потому что необходимо распознать маленькие детали.



Рисунки 2 — В данном положении робот (A) получит команду вращаться. Так как он установлен на подставке (B), то не сдвинется с места

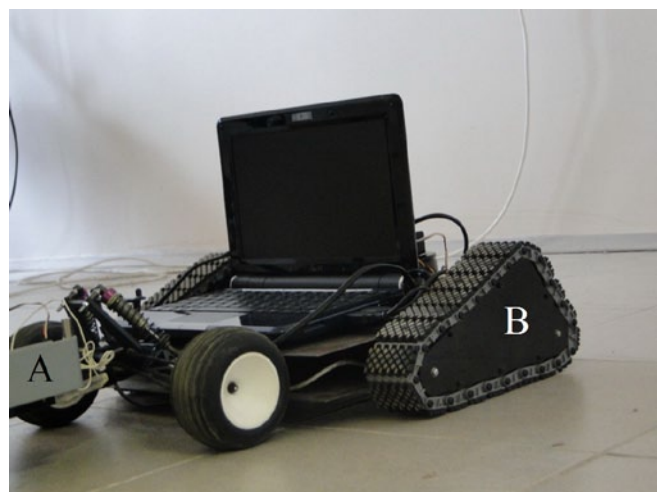
Другой возможный вариант использования алгебры — это конструирование цепочек событий. Однако он также имеет проблемы. В частности, возможно, что потребуются введение пустых событий. Кроме того, цепочка событий может быть слишком длинной. Например, в работе [14] рассматривались временные интервалы, длина которых составляла 2, 33 и 66 сут. Кроме того, необходимо учитывать, что в случае мобильного робота количество событий достаточно велико. Например, применяемый в исследованиях мобильный робот использует цветные кегли в качестве ориентиров (рис. 3). Так как мобильный робот использует только визуальную навигацию, появление или исчезновение каждой цветной кегли является событием, непосредственно используемым при навигации. Учитывая только эти события в течение 66 сут, можно получить цепочку, содержащую более 6 млн таких событий.



Рисунки 3 — Мобильный робот (A) использует цветные кегли (B) в качестве ориентиров



Кроме того, реконструкция цепочки событий требует рассмотрения большого количества вариантов. Например, можно рассмотреть состояние, представленное на рис. 4. Того факта, что мобильные роботы соприкасаются, недостаточно для утверждения, что причиной движения гусеничного робота является колесный робот. Возможно, причина движения гусеничного робота — рука человека. Для того чтобы обнаружить эту причину, необходимо рассмотреть все события для колесного робота. Следствием этого является значительное увеличение числа вариантов. Кроме того, что делать, если некоторое событие для колесного робота и некоторое событие для гусеничного робота происходят в один и тот же временной интервал? В общем, количество возможных цепочек событий растет экспоненциально.



**Рисунок 4** — Мобильные роботы соприкасаются. Если колесный робот (А) начнет двигаться вперед или гусеничный робот (В) начнет двигаться назад, то другой робот также начнет двигаться

Для случаев, представленных на рис. 1 и 2, базовые отношения не позволяют прямо выразить, что робот не убрал со стола. Соответственно необходимо построить цепочку событий. Естественный способ избежать использования цепочек событий — рассматривать временные отношения более чем двух событий. Однако сокращенная алгебра Аллена не позволяет одновременно сравнивать более двух событий.

Стандартная алгебра Аллена имеет 13 отношений, но она, так же как и сокращенная, не дает возможности сравнивать более двух событий. Увеличение числа базовых отношений позволяет описывать ситуации более простыми цепочками событий.

Расширенная алгебра Аллена жестко не регламентирует количество отношений. Новые отношения могут содержать любое количество событий. Данный подход позволяет оптимизировать алгебру под особенности сферы ее использования.

Для нахождения образцов, идентифицирующих события, применялась система алгоритмических проблем  $T_1-T_{17}$

представленная в работе [11]. Применение этой системы возможно не только на основе параллельного запуска, но и с помощью генетического алгоритма, определяющего ту проблему, которую следует использовать для текущего видеоряда. В результате вычислительного эксперимента для 1000 видео, продолжительность каждого из которых составляла 60 мин, удалось установить, что генетический алгоритм сокращает время обработки данных в 14,32 раза. Однако при этом количество выявленных событий падает на 11%.

Рассмотрен тестовый набор из 50 маршрутов, содержащих различные естественные события, приводящие к тем или иным отказам робота во время испытаний [15]. Все маршруты имеют длину 100 м. Каждый маршрут соответствует некоторому естественному домашнему окружению (квартира, офис, учебные помещения и т. д.). Для установления событий, приводящих к отказу, рассмотрены стандартная алгебра отношений Аллена [12], сокращенная алгебра Аллена [13] и расширенная алгебра Аллена [11]. Для каждого из возможных событий, приводящих к отказу, робот, участвовавший в эксперименте, был оснащен обработчиком, позволяющим корректно продолжить движение по маршруту. В рамках эксперимента не требовалось от робота корректной обработки всех отказов. Соответственно робот, не сумевший справиться с обработкой того или иного события, мог продолжать движение. Каждое испытание завершалось либо по достижении роботом конечной точки, либо по истечении 15 мин после начала испытания. При этом на каждом маршруте было расположено по 4 промежуточных контрольных точки, прохождение робота через которые фиксировалось. В рамках эксперимента под длиной пройденного маршрута понималось расстояние от старта до конечной точки или последней достигнутой контрольной точки. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

**Таблица 1** — Экспериментальное сравнение алгебр отношений (А — стандартная алгебра отношений Аллена, СА — сокращенная алгебра Аллена, РА — расширенная алгебра Аллена)

Показатель	А	СА	РА
Достижение конечной точки маршрута, %	74	52	96
Среднее время прохождения дистанции, мин	7,43	11,8	4
Количество достигнутых промежуточных контрольных точек	97	56	186
Средняя длина пройденного маршрута, м	63	47	97

Проведенный эксперимент показал высокую эффективность расширенной алгебры Аллена. По результатам видна связь между количеством базовых отношений в алгебре и ее эффективностью. Однако увеличение базовых отношений в расширенной алгебре Аллена может привести к падению производительности, поэтому необходимо предусмотреть механизм для ее оптимизации.

Введением алгебраической операции мы можем усовершенствовать расширенную алгебру Аллена. В частности, использование алгебраической операции позволяет существенно уменьшить количество основных отношений, раскладывая

остальные отношения в суперпозиции. Для вычислительного эксперимента использовался генератор, порождающий расширенные алгебры Аллена, и генетический алгоритм для выявления разложимости в суперпозицию. В табл. 2 приведены средние данные для различного количества итераций генетического алгоритма.

**Таблица 2 — Усредненные данные для различного количества итераций генетического алгоритма, уменьшающего количество основных отношений разложением в суперпозиции**

Исходное количество событий	1000	10 000	100 000	500 000
Количество событий с использованием дополнительной операции (1000 поколений)	626	4 722	38 491	143 215
Количество событий с использованием дополнительной операции (5 000 поколений)	219	827	3 677	28 448
Количество событий с использованием дополнительной операции (10 000 поколений)	59	378	2 415	11 763

Проведенный эксперимент показывает, что рассматриваемые основные соотношения имеют взаимосвязь, которую можно использовать при помощи разложения в суперпозицию. Стоит отметить, что большое разнообразие

событий позволяет более эффективно раскладывать их в суперпозиции, а используемый генетический алгоритм для выявления разложимости в суперпозицию на порядок снижает исходное количество событий при достаточном времени работы.

Количество событий также может быть уменьшено посредством использования определяющих соотношений. Для построения системы определяющих соотношений использовался генетический алгоритм с точкой останова после 10 неудачных попыток сокращения количества событий. В табл. 3 представлены результаты вычислительного эксперимента.

**Таблица 3 — Результаты работы генетического алгоритма, уменьшающего количество событий посредством введения определяющих соотношений**

Исходное количество событий	1000	10 000	100 000	500 000
Количество событий с использованием определяющих соотношений	36	123	641	1 968

Как видно из табл. 3, построение системы определяющих соотношений позволяет оптимизировать расширенную алгебру Аллена с большей эффективностью. Однако оба метода оптимизации являются независимыми и поэтому

## Литература/References

1. *The DARPA Urban Challenge — Autonomous Vehicles in City Traffic // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2009. Vol. 56. 653 p.*
2. *Thrun S. 1996-2006 Autonomous robots // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2007. P. 449 — 450.*
3. *Ondas S., Juhar J., Pleva M., Cizmar A., Holcer R. Service robot SCORPIO with robust speech interface // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10. Art. no. 3.*
4. *Cohen P.R., Sutton C., Burns B. Learning Effects of Robot Actions Using Temporal Associations // Proceedings of the 2nd International Conference on Development and Learning. 2002. P. 96 — 101.*
5. *Staroswiecki M., Comtet-Varga G. Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems // Automatica. 2001. Vol. 37 (5). P. 687 — 699.*
6. *Yüksel T., Sezgin A. Two fault detection and isolation schemes for robot manipulators using soft computing techniques // Applied Soft Computing Journal. 2010. Vol. 10 (1). P. 125 — 134.*
7. *Halder B., Sarkar N. Robust nonlinear analytic redundancy for fault detection and isolation in mobile robot // International Journal of Automation and Computing. 2007. Vol. 4 (2). P. 177 — 182.*
8. *Witkowski M., Randell D., Shanahan M. Deriving fluents from sensor data from mobile robots // AAAI Fall Symposium on Anchoring Symbols to Sensor Data in Single and Multiple Robot Systems. 2001. P. 44 — 51.*

могут использоваться в совокупности для максимального эффекта.

На основе проведенных экспериментов разработан алгоритм, формирующий оптимизированную расширенную алгебру Аллена отношений под имеющееся окружение. Полученная алгебра используется для построения системы самосознания робота для идентификации отказов. Алгоритм содержит следующие действия.

1. Поиск образцов, идентифицирующих события.
2. Порождение расширенной алгебры Аллена.
3. Введение дополнительной алгебраической операции.
4. Дополнительная минимизация количества событий посредством введения определяющих соотношений.

Рассмотрим подробно работу данного алгоритма. Наибольший интерес представляют события, полученные с помощью видеокамеры, и необходимо идентифицировать события на основе имеющегося видеоряда. События других устройств, например силового двигателя, легко перечисляются, и их дальнейшая идентификация не вызывает затруднений. А данные с видеоряда достаточны сложны, поэтому необходимо находить образцы событий. Образцы событий могут указываться вручную (в частности, указывается какой-нибудь кадр из видеоряда) либо автоматически с помощью эвристических алгоритмов (например, отсутствие какого-либо движения в видеоряде). После формирования образцов идентифицирующих событий происходит анализ

видеоряда и других источников событий для выявления базовых отношений расширенной алгебры Аллена. Так как полученное количество базовых отношений, как правило, достаточно велико, необходимо оптимизировать алгебру. Сначала производится разложение базовых отношений в суперпозиции, а затем — минимизация количества событий посредством введения определяющих соотношений. Таким образом, получаем расширенную алгебру Аллена, оптимизированную для решения задачи самосознания в рамках представленного видеоряда. Стоит отметить, что дальнейшее качество работы полученной алгебры зависит от видеоряда, на основе которого строилась алгебра. В случае необходимости данную алгебру можно дополнить еще какими-нибудь событиями и отношениями. Также полученная алгебра может многократно использоваться без каких-либо дополнений в рамках известного окружения (например, сервисного робота, работающего в помещении).

Рассмотренные в работе эксперименты показали эффективность расширенной алгебры Аллена для идентификации различных событий. Также эксперименты продемонстрировали продуктивность механизмов оптимизации расширенной алгебры Аллена. Комплексное использование рассмотренных методов в рамках предложенного алгоритма самосознания позволяет оснастить мобильных роботов способностью выявлять отказы.

9. Liu Y., Lu X., Xu J., Qin Y., Tang Z. *Real-time robust vehicle flow statistics based on adjacent frames clustering // IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC. 2012. P. 48 — 53.*

10. Szkilnyk G., Hughes K., Fernando H., Surgenor B. *Spatio-temporal volume video event detection for fault monitoring in assembly automation // 19th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice. 2012. P. 20 — 25.*

11. Gorbenko A., Popov V., Sheka A. *Robot Self-Awareness: Temporal Relation Based Data Mining // Engineering Letters. 2011. Vol. 19. Issue 3. P. 169 — 178.*

12. Allen J. F. *An interval based representation of temporal knowledge // Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1981. P. 221 — 226.*

13. Oates T., Cohen P. R. *Learning planning operators with conditional and probabilistic effects // Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Planning with Incomplete Information for Robot Problems. 1996. P. 86 — 94.*

14. Jakkula V., Crandall A., Cook D. *Knowledge discovery in entity based smart environment resident data using temporal relation based data mining // Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Data Mining Workshops. 2007. P. 625 — 630.*

15. Gorbenko A., Popov V., Sheka A. *Localization on Discrete Grid Graphs // Proceedings of the CICA 2011. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2012. Vol. 107. P. 971 — 978.*

УДК 656.257

Дмитрий Викторович Ефанов, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика на ж.д.» ФГБОУ ВПО ПГУПС, инженер ЗАО «МГП «ИМСАТ»

Евгений Витальевич Басалаев, главный инженер ЗАО «МГП «ИМСАТ»

Александр Борисович Жмылёв, начальник отдела новой техники ЗАО «МГП «ИМСАТ»

## ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕЛЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЦЕНТРАЛИЗАЦИЯМИ

Dmitry V. Efanov, PhD. in Engineering, Assistant at the Department "Automation and telemetry at the railway", FGBOU VPO PGUPS, Engineer of CJSC "MGP" IMSAT",

Evgeny V. Basalaev, Chief Engineer of CJSC "MGP" IMSAT",

Alexander B. Zhmylev, Head of the new equipment department JSC CJSC "MGP" IMSAT"

### Improving A Fault Tolerance Of Relay Power Interlocking Control Devices

#### Аннотация

Наиболее уязвимым звеном в аппаратах управления релейными электрическими централизациями являются индикаторы. В настоящей статье описываются созданные в ЗАО «МГП «ИМСАТ» специализированные светодиодные индикаторы, полностью взаимозаменяемые с существующими средствами отображения информации. Новые индикаторы улучшают эргономичность рабочего места дежурных по станциям, а также обладают усовершенствованными характеристиками, имея при этом низкое энергопотребление и долгий срок службы.

**Ключевые слова:** железнодорожная автоматика и телемеханика, релейные электрические централизации, пульт управления, табло, светодиодный индикатор, ССИ-ДК.

#### Abstract

The most vulnerable link in the relay power interlocking control devices are indicators. This article describes specialized LEDs, created in CJSC «MGP» IMSAT», fully interchangeable with the existing means of information display. New indicators improve the workplace ergonomics of duty operators at the stations as well as have advanced features while having a low power consumption and long service life.

**Key words:** railroad automation and telemetry, relay power interlocking, remote control, display, LED, SSI-DK.

#### Введение

Тенденция развития железнодорожного транспорта в России, как и за рубежом, направлена на повышение скорости передвижения поездов с сохранением и увеличением показателей безопасности перевозочного процесса. Ключевыми звеньями перевозочного процесса, отвечающими за своевременность доставки грузов и пассажиров, а также надежность и безопасность перевозок, являются средства железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) [1].

Системы ЖАТ устроены таким образом, что на перегонах процесс движения поезда сопровождается автоматическим действием устройств интервального регулирования, а на станциях — в автоматизированном режиме благодаря действиям специального технического персонала — дежурных по станции (ДСП). От правильности действий ДСП по управлению технологическими процессами на станции зависит эффективность и безопасность перевозочного процесса.

Доминирующим на железных дорогах постсоветского пространства типом электрических централизаций (ЭЦ) является релейная централизация, в которой все зависимости между стрелками и сигналами реализуются на релейной элементной базе. Первая ЭЦ, построенная только на релейной элементной базе, была внедрена на станции Гудермес Северо-Кавказской железной дороги в 1934 г. [2]. В настоящее время более 95% всех станций оборудованы релейными ЭЦ, построенными по различным типовым проектам, которые разрабатывались с советских времен по настоящее время. В качестве аппарата управления в релейных ЭЦ малых станций используются специализированные пульты-табло дежурных по станции, а крупных станций — пульты-манипуляторы с выносными табло.

Процесс управления станцией связан со своевременной реакцией ДСП на изменение поездной ситуации и манипуляцией управляющими кнопками светофоров и рукоятками стрелочных коммутаторов. Например, в системе БМРЦ (ею оборудовано свыше 2500 станций ОАО «РЖД») маршрут задается нажатием нескольких управляющих кнопок светофоров, после чего с проверкой всех условий безопасности движе-

ния поездов все ходовые и охранные стрелки переводятся и замыкаются, а затем показание светофора с запрещающего меняется на разрешающее. Реализуется же маршрут самим движущимся поездом либо отменяется (в крайнем случае искусственно размыкается) ДСП.

Стоит отметить, что с конца XX в. на железных дорогах России начинают внедряться микропроцессорные ЭЦ, где пульты-табло (табло) заменены рабочими местами ДСП, представляющими собой персональные компьютеры и мониторы [2]. Процесс управления напольными объектами ЖАТ реализуется благодаря манипулятору-мыши, которым ДСП воздействует на соответствующие объекты в технологическом окне автоматизированного рабочего места (АРМ) на экране монитора. Фактически в окне АРМа в программном виде реализован пульт управления. Сегодня осуществляется постепенный переход к системам на микропроцессорной и микроэлектронной основе, но темпы его крайне низки. За 15 лет компьютерными ЭЦ оборудовано около 300 станций (это менее 5% от всего количества станций в России). Модернизация в основном касается станций центральной России, на периферии же и в глубинке продолжают действовать релейные ЭЦ. Можно прогнозировать и дальнейшее использование релейных ЭЦ на протяжении первой половины XXI в.

### 1. Аппарат управления и контроля

Аппарат управления и контроля релейной ЭЦ представляет собой специальный пульт-табло (или же пульт-манипулятор с выносным табло), где с использованием некоторого набора условных изображений приведено путевое развитие станции с управляющими и контролирующими элементами (стрелками, светофорами, рельсовыми цепями, переездами и пр.). Для примера на рис. 1 дан внешний вид табло управления и контроля передвижениями на крупной станции, снятый со стороны выносного пульта-манипулятора.



Рисунок 1 — Внешний вид табло отдельного аппарата управления релейной ЭЦ

На станциях ОАО «РЖД», оборудованных релейными ЭЦ, эксплуатируются такие аппараты управления, как пульты (пульты-табло), пульты-манипуляторы и выносные табло трех поколений [3]:

I — желобкового типа с коммутаторными лампами типа КМ-24 напряжением 24 В;

II — из блочных элементов (мозаичных блоков) с коммутаторными лампами типа КМ-24 напряжением 24 В;

III — из блочных элементов с применением субблоков на светодиодах.

Аппараты управления II и III поколений собираются из прямоугольных или трапецеидальных секций в зависимости от требуемой конфигурации. Пульт предназначен для формирования операций по управлению перевозочным процессом на станции, а табло — для отображения и контроля реальной поездной обстановки. С этой целью на лицевой стороне табло закреплена панель, на которой размещены элементы световой схемы станции. Индикация осуществляется благодаря использованию в основном ламп накаливания (рис. 2), дающих световой поток желтого оттенка. Нужный для индикации цвет достигается использованием цветных прозрачных стекол (светофильтров). Например, для индикации состояний рельсовых цепей используются светофильтры двух цветов — белого (устанавливается матовый светофильтр) и красного.



Рисунок 2 — Лампы пультов-табло

При управлении станцией ДСП на протяжении всего двенадцатичасового рабочего дня анализирует состояние пульта-табло (табло и выносного пульта-манипулятора) и реальную поездную обстановку по показаниям ламп табло, управляя напольными объектами ЖАТ посредством кнопок, отвечая по поездной и станционной связи машинистам и техническому персоналу станции. При этом для обеспечения высокой эффективности управления, исключения незапланированных ошибок, а также для большей эргономичности необходимо обеспечивать комфорт в работе ДСП.

При высокой интенсивности движения поездов на крупных промежуточных и узловых станциях ДСП испытывает колоссальную психологическую нагрузку, связанную с ответственными действиями по управлению и потоком различного рода информации. От действий дежурного по станции зависит эффективность и безопасность перевозочного процесса. Ошибка дежурного может привести как к защитной ситуации (например, вынужденный простой поезда), так и к опасной (например, взрез стрелки). Снизить риск нарушения безопасности, создать комфорт для работы ДСП можно за счет модернизации самих средств передачи информации, т. е. ламп пультов-табло (табло и пультов-манипуляторов).

### 2. Специализированные светодиодные индикаторы ССИ-ДК

Традиционные лампы накаливания КМ24 имеют высокое энергопотребление и небольшой ресурс работы, а светодиодные лампы типа СКЛ и КИПД чувствительны к импульсным помехам и мерцают с частотой 50/100 Гц; мерцание, в свою очередь, воспринимается боковым зрением, создавая, таким образом, дополнительную психологическую нагрузку на ДСП.

С целью совершенствования процесса управления, снижения усталости и психологической нагрузки на дежурного по станции фирмой ЗАО «МГП «ИМСАТ» разработаны специализированные светодиодные индикаторы для диспетчерского контроля (ССИ-ДК, см. рис. 3 и 4), обладающие улучшенными характеристиками по сравнению с известными типами ламп.



Рисунок 3 — Специализированные светодиодные индикаторы типа ССИ-КСЗ/ОПЗ



Рисунок 4 — Специализированные светодиодные индикаторы типа ССИ-ОП1/2 или ССИ-КС

Индикаторы ССИ-ДК по внутренней схмотехнической реализации разработаны в двух вариантах — светодиодные индикаторы для стрелочных коммутаторов (ССИ-КС) и светодиодные индикаторы общего применения (ССИ-ОП). В номенклатуре обозначений индикаторов присутствуют цифры: 1 обозначает нормальную яркость индикатора, 2 — повышенную яркость индикатора, а 3 — тип корпуса, не требующий применения специальной светотехнической арматуры и дополнительных светофильтров (см. рис. 3).

Индикаторы ССИ-ОП1/2 различаются по яркости и типу корпуса (см. рис. 4) и предназначены для замены коммутаторных ламп накаливания КМ6/12/24 во всех типах табло и пультов с любыми установочными гнездами. Индикатор ССИ-ОП1 имеет нормальную яркость свечения, а ССИ-ОП2 — повышенную. ССИ-ОП1 применяется в составе точечных световых ячеек с диаметром светофильтра 8 мм, а ССИ-ОП2 — в составе желобковых световых ячеек и точечных световых ячеек с диаметром светофильтра 13 мм и более.

Индикаторы ССИ-ОП3 (см. рис. 3) предназначены для применения в пультах-табло (табло) для световой индикации, могут быть использованы для замены светодиодных индикаторов СКЛ-17 в целях улучшения эргономичности рабочего

места ДСП и исключения ложных срабатываний при наличии импульсных помех. Данные индикаторы устанавливаются в отверстия диаметром 8,1 мм, расположенные на панели табло.

Все специализированные индикаторы ССИ-ДК могут быть применены для индикации различных технологических процессов (режим работы, включение и выключение устройств, контроль уровней и пр.), кроме того, для ССИ-ОП3/КСЗ не требуется использование дополнительных светофильтров. Технические характеристики светодиодных индикаторов представлены в табл. 1.

Таблица 1 — Технические характеристики ССИ-ДК

Род тока	Постоянный или переменный	
Диапазон рабочих напряжений питания, В	От 4 до 34	
Номинальное напряжение питания, В	6/12/24	
Потребляемый ток (в зависимости от исполнения), мА	От 5 до 15	
Потребляемая мощность, Вт	Не более 0,36	
Цвет свечения	Белый (теплый), красный, желтый, зеленый, синий	
Угол обзора, град.	100 — 120	
Срок службы, лет	Не менее 10	
Габариты	ССИ-ОП1/2	ССИ-ОП3/КСЗ
Длина, мм	46	35
Диаметр корпуса, мм	6,6	8
Форм-фактор	Соответствует КМ6/12/24	соответствует СКЛ-17

Разработанные светодиодные индикаторы прошли испытания и соответствуют российским стандартам и нормам охраны труда и техники безопасности, помехоустойчивость соответствует требованиям IV класса ГОСТ 50656 по устойчивости и внешним электромагнитным помехам. Кроме того, индикаторы нечувствительны к импульсным помехам амплитудой 6, 12 или 24 В (в зависимости от номинального напряжения питания) с длительностью импульсов 3 мс и частотой повторения 3 Гц.

Индикаторы ССИ-ДК обеспечивают комфортное восприятие световой сигнальной информации.

Отметим следующий ряд особенностей новых индикаторов:

- низкое энергопотребление;
- индикаторы ССИ-ДК функционально и электрически полностью заменяют существующие типы ламп, ввиду чего не требуется модернизация системы электропитания;
- имеют большой ресурс работы (в 20 — 40 раз больше, чем у ламп накаливания) и малое энергопотребление (в 2 — 5 раз меньше, чем у ламп накаливания);
- нечувствительны к импульсным помехам энергоснабжения;
- схмотехнически исключены видимые мерцания;
- отсутствует паразитная емкостная подсветка при работе на переменном токе и длинных линиях электропитания;
- за счет схмотехнических решений индикаторы ССИ-КС позволяют напрямую подключать к своим электрическим контактам регистрирующие устройства систем мониторинга.

### 3. Схемотехнические особенности индикаторов

На железных дорогах России активно используются и развиваются системы мониторинга устройств автоматики, такие как АПК-ДК, АСДК, АДК-СЦБ [4, 5]. Одним из технических решений, используемых в системах мониторинга, является подключение контроллеров диагностики к лампам аппаратов управления в релейных ЭЦ с целью получения дискретных данных о состоянии объектов автоматики. Съем данных напрямую с традиционно применяемых ламп накаливания и светодиодных индикаторов невозможен, когда включена их подсветка. К примеру, при основном режиме работы стрелочных индикаторов (с выключенной подсветкой состояния стрелок) контакты реле плюсового и минусового контроля имеют практически одинаковый потенциал, так как соединяются друг с другом через низкие сопротивления ламп накаливания или относительно низкие сопротивления обычных светодиодных индикаторов, а входные цепи контроллеров съема данных являются высокоомными. В процессе проектирования системы мониторинга приходится учитывать данный факт и применять дополнительные технические решения при установке контроллеров съема данных.

За счет схемотехнических особенностей новых светодиодных индикаторов ССИ-КС возможно подключение диагностического оборудования любой системы мониторинга напрямую, что упрощает процесс проектирования, монтажа и диагностирования в целом. На рис. 5 показана принципиальная схема ССИ-КС [6]. В ней установлены специальный защитный диод  $VD_1$  и  $RC$ -фильтр.  $RC$ -фильтр подключен параллельно светодиоду  $VD_2$  и предназначен для сглаживания пульсаций светового потока, а также блокирования паразитной емкостной подпитки и импульсных помех. Защитный диод  $VD_1$  включен последовательно со светодиодом  $VD_2$ , защищая его от напряжения обратной полярности. Резистор  $R_1$  служит для ограничения тока в схеме, его номинал определяет яркость светодиода. Керамический конденсатор  $C_1$  сглаживает пульсации выпрямленного диодом  $VD_1$  напряжения, что устраняет мерцание светодиода с частотой 50 Гц и обеспечивает защиту световой индикации от влияния импульсных помех при работе на переменном или постоянном токе. Резистор  $R_2$  ограничивает ток заряда конденсатора  $C_1$  до безопасного уровня.

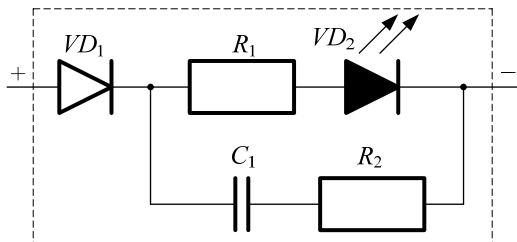


Рисунок 5 — Принципиальная схема специализированного индикатора ССИ-КС

На рис. 6 приведена схема подключения ССИ-КС в стрелочном коммутаторе пульта управления. ССИ-КС зеленого и желтого цветов, индицирующие наличие крайних положений стрелок (плюсовое и минусовое соответственно), подключаются с соблюдением полярности. Для визуальной проверки правильности включения специализированных индикаторов в

схеме включается шунтирующий диод  $VD_{ш}$ , обеспечивающий яркую подсветку индикаторов при их неправильном подключении, когда стрелочные переводы находятся в положении, соответствующем данной индикации, а кнопка подсветки положения стрелок не нажата. В схеме на рис. 6 контакты 1ПК, 1МК — это контакты реле контроля плюсового и минусового положений стрелки 1, КСТ — контакт кнопки подсветки положения стрелок.

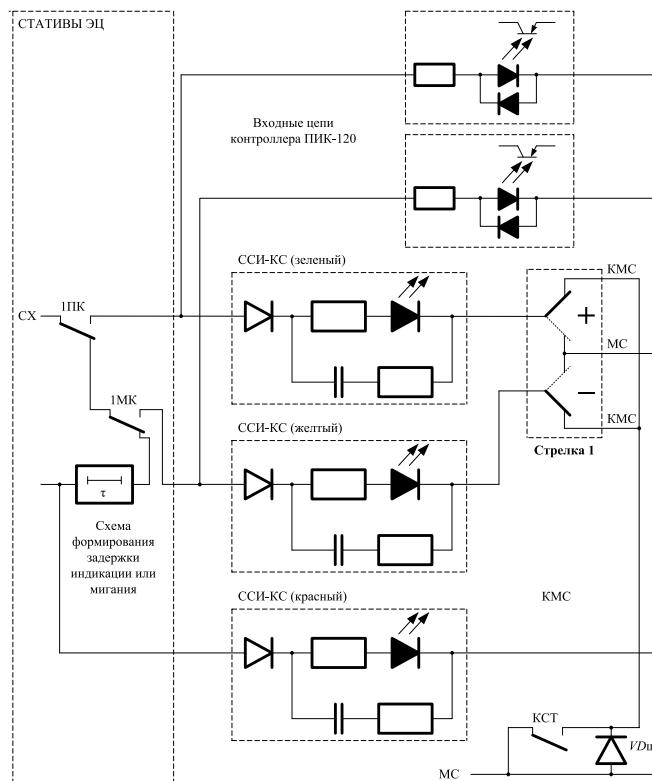


Рисунок 6 — Схема подключения ССИ-КС в стрелочном коммутаторе

Кроме того, на схеме подключения ССИ-КС показаны входные цепи промышленного индустриального контроллера ПИК-120, предназначенного для съема дискретной информации о положении стрелок в системах технического диагностирования и мониторинга [6]. Входные цепи контроллера ПИК-120 для съема информации с индикаторов красного цвета свечения на схеме для упрощения не показаны.

Разработанные светодиодные индикаторы ССИ-ДК прошли все виды испытаний и рекомендованы к использованию в аппаратах управления и контроля релейных ЭЦ институтом проектирования «Гипротрансигналсвязь».

### Заключение

Проектно-конструкторско-технологическим бюро железнодорожной автоматики и телемеханики ОАО «РЖД» (ПКТБ ЦШ) рассмотрены и утверждены технические решения ПРКТ.163010.001ТР5 «Применение специализированных световых индикаторов ССИ-ДК» [7].

В настоящее время ССИ-ДК используются на двух станциях ОАО «РЖД». В 2009 г. на станции Февральск Дальнево-

сточной ж. д. около 100 ламп накаливания были заменены на специализированные светодиодные индикаторы. В течение постоянной эксплуатации на протяжении 4 лет отказало всего 2 индикатора (примерно 2% всех ССИ-ДК). В 2012 г. в Санкт-Петербургском железнодорожном узле на станции Волковская Октябрьской ж. д. все лампы накаливания пульта и выносного табло были заменены на специализированные светодиодные индикаторы. В течение года постоянной эксплуатации отказал всего 1 индикатор из почти 3000 внедренных (т. е. менее 0,1% всех ламп) на станции Волковской. Таким

образом, результаты эксплуатации ССИ-ДК говорят о высоком уровне их надежности.

Отметим, что использование специализированных светодиодных индикаторов, разработанных ЗАО «МГП «ИМСАТ» [8], в аппаратах управления и контроля позволит повысить их отказоустойчивость, уменьшить энергопотребление, снизить негативное влияние световой индикации на психологическое состояние человека-оператора, гармонизировать условия труда, а также упростить съем диагностических данных контроллерами систем технического диагностирования и мониторинга.

## Литература

1. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / пер. с англ.; под ред. Г. Теега, С. Власенко. М. : Интекст, 2010. 496 с. ISBN 978-3-7771-0394-5.
2. Микропроцессорные системы централизации : учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / Вл.В. Сапожников и др.; под ред. Вл.В. Сапожникова / ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». М., 2008. 398 с. ISBN 978-5-89035-525-6.
3. Сороко В.И., Милыков В.А. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справочник : в 2 кн. Кн. 1. 3-е изд. М. : НПФ: «Планета», 2000. 960 с. ISBN 5-901307-02-X.
4. Ефанов Д.В., Плеханов П.А. Обеспечение безопасности движения за счет технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Транспорт Урала. 2011. № 3. С. 44 — 48.
5. Лыков А.А., Ефанов Д.В., Власенко С.В. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ // Транспорт Российской Федерации: журнал о науке, экономике, практике. 2012. № 5 (42). С. 67 — 72.
6. Ефанов Д.В., Лыков А.А. Основы построения и принципы функционирования систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие. СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2012. 59 с.
7. Применение специализированных световых индикаторов ССИ-ДК. Технические решения. ПРКТ.163010.001TP5. ЗАО «МГП «ИМСАТ». 14 с.
8. ЗАО «МГП «ИМСАТ». [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.realsys.ru, 08.07.2013].

## References

1. Sistemy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznikh dorogakh mira: uchebnoye posobiye dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Automation and Telemetry Systems at the Railways of the World: textbook for railway transport high schools]: Translated from English under the editorship of Teeg G., Vlasenko S. Moscow: Intekst, 2010. 496 p. ISBN 978-3-7771-0394-5.
2. Mikroprotsessornye sistemy tsentralizatsii: Uchebnik dlya tekhnikumov i kolledzey zheleznodorozhnogo transporta [Microprocessor Based Systems of Interlocking: textbook for technical schools and colleges of railway transport] / Spozhnikov V.V. et al. under the editorship of Spozhnikov V.V. Moscow GOY " Ychebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte", 2008. 398 p. ISBN 978-5-89035-525-6.
3. Soroko V.I. Milykov V.A. Apparatura zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: Spravochnik v 2 knigax Kniga 1, 3 izdanie, [Railway Automation and Telemetry Equipment: Guideline in 2 volumes, Vol. 1, 3rd edition], Moscow, NPF: «Planeta», 2000, 960 p. ISBN 5-901307-02-X.
4. Efanov D.V., Plekhanov P.A. obespecheniye bezopasnosti dvizheniya za schet tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Ensuring Safety due to Technical Diagnostic and Railway Automation and Telemetry Equipment Monitoring] // Transport of the Urals, 2011. №3. p. 44 – 48.
5. Lykov A.A., Efanov D.V., Vlasenko S.V. Tekhnicheskoye diagnostirovaniye i monitoring sostoyaniya ustrojstv ZHAT [Technical Diagnostics and Monitoring of RAT Equipment] // Transport Rossiyskoj Federatsii: zhurnal o nauke, ekonomike i praktike., 2012. №5 (42). p.67–72.
6. Efanov D.V., Lykov A.A. Osnovy postroyeniya i printsipi funktsionirovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. [Basis of Construction and Operation of Technical Diagnostics and Monitoring Systems of Railway Automation and Telemetry Equipment: textbook]. St. Petersburg.: St. Petersburg State University of Railways, 2012. 59 p.
7. Primeneniye spetsializirovannikh svetovikh indikatorov SSI-DK. Tejhnicheskije resheniya. ПРКТ.163010.001TP5. [Specialized LEDs SSI-DK Application. Engineering Solutions. ПРКТ.163010.001TP5.], CJSC "MGP" IMSAT", 14 p.
8. CJSC "MGP" IMSAT" [Web source]. Access mode: [www.realsys.ru, 08.07.2013].



УДК 004.3

**Александр Сергеевич Демагин**, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Шамиль Касымович Валиев**, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора АКО по заочному образованию Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## СИНТЕЗ БЕЗОПАСНЫХ УСТРОЙСТВ СО СХемой ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ

**Alexander S. Demagin**, Post-graduate student, Assistant at the Department «Automation, Telemetry and Communication at the Railway Transport» of the Ural State University of Railway Transport (USURT, Ekaterinburg, Russia),  
**Shamil K. Valiev**, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Deputy Director of the ACO for Distance Education of the Ural State University of Railway Transport (USURT, Ekaterinburg, Russia)

### Built-In Control Safety Devices Design

#### Аннотация

В статье рассмотрен метод синтеза безопасных устройств встроенного контроля. Схемой встроенного контроля суммируется число изменений напряжения в определенных контролируемых внутренних и внешних выводах (узлах) устройства и сравнивается полученное число изменений напряжений  $C(R)$  с числом изменений напряжений исправного устройства  $C(R_0)$ . При  $C(R) = C(R_0)$  на выходе схемы встроенного контроля присутствует напряжение, и устройство считается исправным. При  $C(R) \neq C(R_0)$  на выходе схемы встроенного контроля напряжение отсутствует, и устройство считается неисправным. В статье приводится методика определения контролируемых узлов устройства.

**Ключевые слова:** схема встроенного контроля, контролируемые узлы, число изменений напряжения, устройство исправно, алгоритм определения контролируемых узлов.

#### Abstract

The article describes the method of built-in control safety devices design. Built-in checker adds the number of voltage changes in certain internal and external controlled terminals (blocks) of the device and compares the number of voltage changes  $C(R)$  with the number of voltage changes of serviceable device  $C(R_0)$ . If  $C(R) = C(R_0)$  at the output of built-in control voltage is present and the device is intact. If  $C(R) \neq C(R_0)$  at the output of built-in control system the voltage is absent and the device is not considered to be faulty. The article provides a method of controlled device blocks determination.

**Keywords:** built-in control safety devices, controlled terminals, number of voltage changes, device is intact, method of controlled device blocks determination.

**Б**езопасность и надежность — два самых важных вопроса при построении самопроверяемых устройств. Такой параметр, как надежность, определяет способность устройства обеспечивать бесперебойную работу на протяжении всего времени его использования. Под безопасностью понимается свойство системы не давать опасных отказов в течение времени при определенных условиях эксплуатации [1].

В данной статье рассматривается метод применения схем встроенного контроля (СВК) (рис. 1), основанный на подсчете числа изменений напряжения (изменение сигнала с 0 на 1 или наоборот) в определенных узлах (выходных, внутренних) устройства.

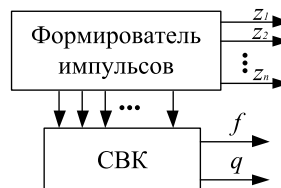


Рисунок 1 — Структурная схема подключения СВК

Этот метод может использоваться в циклических системах, например в перегонных системах железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ). Также этот метод можно применять и в спорадических системах, таких как электрическая централизация (ЭЦ) железнодорожной автоматики и телемеханики, периодически запуская проверочные тесты системы.

Анализ данного метода произведен на примере кода «КЖ» бесконтактного кодового трансмиттера БКТ-5. Трансмиттер БКТ предназначен для эксплуатации в составе существующих систем числовой кодовой автоблокировки в качестве формирующего устройства числовых кодов, он устанавливается в релейных шкафах кодовой автоблокировки и на релейных станивах систем ЭЦ [2]. Трансмиттером БКТ вырабатываются числовые коды «КЖ», «З» и «Ж» — одинаковые по структуре, но различные по длительности импульсов и интервалов во время кодового цикла 1,6 с [3]. Структурная схема формирования кода «КЖ» показана на рис. 2, остальные коды («З» и «Ж») формируются аналогично.

На вход  $G$  делителя частоты (см. рис. 2) подаются импульсы частотой 100 Гц, на выходах триггеров Tr1 — Tr8 формируются импульсы длительностью соответственно, 0,02, 0,04, 0,08, 0,16, 0,32, 0,64, 1,28 с. Код «КЖ» состоит из двух импульсов по 0,24 с и двух интервалов по 0,56 с (рис. 3). Первый импульс формируется при появлении единицы на входе  $S$  Tr «КЖ» элементом И1 (начало импульса), сброс триггера и соответственно окончание импульса производится по входу  $R$  Tr «КЖ» элементом И3, второй импульс формируется аналогично элементами И2 (начало импульса) и И4 (конец импульса). В конце кодового цикла элементом И5 вырабатывается импульс, которым триггеры устанавливаются в исходное состояние.

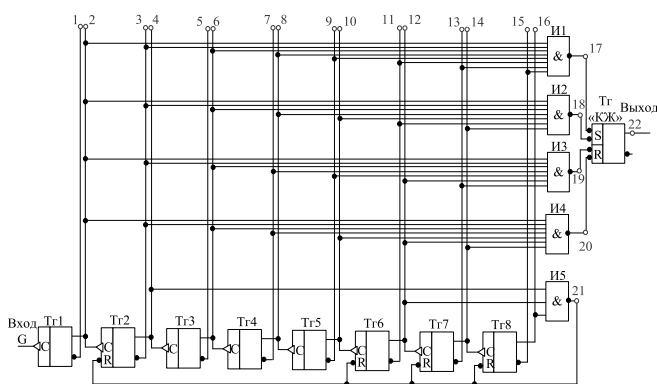


Рисунок 2 — Структурная схема передатчика БКТ-5, код «КЖ»

Рассмотрим способ построения СВК для кода «КЖ» передатчика БКТ-5, отсутствие отказов в котором определяется подсчетом числа изменений напряжения в некоторых внутренних и внешних контролируемых узлах 1 — 22. Схемой СВК производится подсчет общего числа изменений напряжений  $C(R)$  в контролируемых узлах и сравнение полученного числа  $C(R)$  с числом изменений напряжения  $C(R_0)$ , которое должно быть на тех же узлах исправного устройства. Если  $C(R) = C(R_0)$ , то на выходах  $f$  и  $q$  схемы СВК присутствует напряжение, устройство считается исправным. Если при любой одиночной неисправности  $C(R) \neq C(R_0)$ , то на выходах  $f$  и  $q$  схемы СВК напряжение отсутствует, устройство при этом считается неисправным.

При появлении отказа в передатчике БКТ-5 или в схеме СВК на выходах  $f$  и  $q$  схемы СВК появится сигнал, указывающий на неисправность устройства. Для построения схемы СВК по данному методу контроля разрабатывается методика определения контролируемых узлов. В общем случае в качестве контролируемых узлов используются все внутренние и внешние узлы, но это приводит к неоправданному увеличению схемы СВК. Поэтому определяется минимальное число контролируемых узлов, подсчет числа изменений напряжения в которых позволяет определить работоспособность устройства.

Рассмотрим алгоритм поиска контролируемых узлов (минимизации контрольных точек) на примере передатчика БКТ-5.

1. Выявляются все возможные контролируемые внутренние и внешние узлы в устройстве. В данном примере количество узлов — 22 (см. рис. 2).

2. Строится временная диаграмма для исправного устройства (см. рис. 3).

3. Вводится одиночная неисправность «const 1» и строится временная диаграмма (рис. 4) для неисправного устройства (при каждой вводимой одиночной неисправности строится временная диаграмма работы устройства).

4. По построенным временным диаграммам считается количество изменений напряжения на каждой точке при исправной схеме и при каждой вводимой неисправности, а также их сумма. Полученные данные заносятся в табл. 1. В качестве примера (см. рис. 4) приведена временная диаграмма при неисправности «const 1» в узле 10, количество изменений напряжения на каждом узле и их сумма приведены в 10-м столбце (см. табл. 1).

5. Вычисляется коэффициент  $K_{ин}$  числа изменений напряжения при неисправности. Коэффициент  $K_{ин}$  определяется как отношение числа изменений напряжения при исправном устройстве на среднее число изменений напряжения при неисправности на одном контролируемом узле.

6. По строке с наибольшим коэффициентом  $K_{ин}$  определяются контролируемые узлы. Контролируемыми являются узлы, в которых изменение напряжения не равно 0.

7. Как видно из табл. 1 наибольший коэффициент  $K_{ин}$  имеет строка 15. Из строки 15 определяются контролируемые узлы, в данном примере контролируемыми узлами являются 17, 18, 19, 20, 21, 22.

8. Далее вводятся следующие неисправности и аналогично определяются контролируемые узлы. Если появляется новый контролируемый узел, то он добавляется к уже выбранным контролируемым узлам.

По описанному методу разработан алгоритм и написана программа, которая позволяет строить временные диаграммы для исправного и неисправного устройства, вычислять коэффициенты  $K_{ин}$  и определять контролируемые узлы.

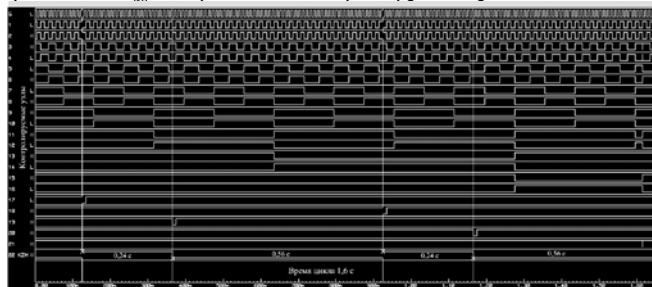


Рисунок 3 — Временная диаграмма передатчика БКТ-5, код «КЖ»

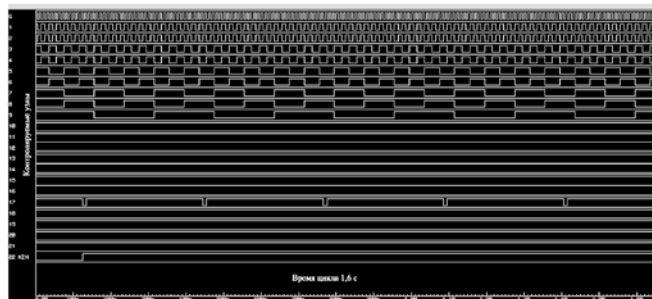


Рисунок 4 — Временная диаграмма передатчика БКТ-5, код «КЖ» (неисправность на 10-й точке)



Таблица 1 — Изменения напряжения на каждой точке при исправной схеме и при неисправности

Контролируемые узлы	Количество перепадов на контролируемых узлах при неисправности «const 1»																						Коэффициент	
	Исправно	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		22
U1(D)	320	0	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	1,048
1	160	0	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	1,048
2	160	0	0	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	1,100
3	80	0	0	0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	84	80	80	80	80	76	80	1,158
4	80	0	0	0	0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	84	80	80	80	80	76	80	1,222
5	40	0	0	0	0	0	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	42	40	40	40	40	38	40	1,294
6	40	0	0	0	0	0	0	40	40	40	40	40	40	40	40	40	42	40	40	40	40	38	40	1,375
7	20	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	21	20	20	20	20	19	20	1,467
8	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20	21	20	20	20	20	19	20	1,571
9	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	11	10	10	10	10	9	10	1,692
10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	11	10	10	10	10	9	10	1,833
11	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	6	10	6	6	6	4	6	2,129
12	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	6	10	6	6	6	6	4	6	2,276
13	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	2	2	2	2	2	2,750
14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	2	2	2	2	3,143
15	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	1	2	4,000
16	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	2	2	1	2	3,385
17	2	0	0	0	0	0	0	40	40	20	10	10	4	4	2	4	12	0	2	2	2	2	2	0,282
18	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	2	0	2	0	2	2	2	2	2,200
19	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	6	4	2	0	2	2	0	2	4	2	1,000
20	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	2	0	2	2	2	2	0	2	2	1,833
21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	2	2	2	2	2	0	2	2,000
22 КЖ	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	5	5	5	4	0	2	2	2	2	4	0	2,146
Сумма перепадов	974	0	480	640	720	800	840	920	940	940	940	970	963	973	971	974	998	970	970	970	970	952	970	

### Литература

- Сапожников В.В., Кравцов Ю.А., Сапожников Вл.В. Теория дискретных устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учебник для вузов ж.-д. трансп. / под ред. В.В. Сапожникова; 2-е изд., перераб. и доп. М. : УМК МПС России, 2001. 252 С.
- Сороко В.И., Розенберг Е.Н. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справочник: в 2 кн. Кн. 2. 3-е изд. М.: НПФ «Планета», 2000. 529 С.
- Перегонные системы автоматики /В.Ю. Виноградова, В.А. Воронин, К.Е. Казаков, Д.В. Швалов, Е.Е. Шухина; под ред. В.Ю. Виноградовой. М. : Маршрут, 2005. С. 29 — 30.

### References

- Sapozhnikov V.V., Kravtsov, Y.A., Sapozhnikov V.V. Teoriya diskretnikh ustrojstv zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta. [Theory of Discrete Devices of Railway Automation, Telemetry and Communication: textbook for railway transport high schools] // Under the editorship of Sapozhnikov V.V., 2nd ed., Rev. and add. Moscow: UMK MPS Rossii, 2001. 252 p.
- Soroko V.I., Rosenberg E.N. Apparatura zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. Spravochnik v 2 knigakh, kniga 2, 3 izdanie [Railway Automation and Telemetry Equipment: Guideline in 2 volumes. Vol. 2. 3rd ed.] Moscow. NPF "Planeta", 2000, 529 p.
- Vinogradov V.Y., Voronin V.A., Kazakov E.A., Shvalov D.V., Shuhina E.E. Peregonnie sistemi avtomatiki [Wayside Automation Systems] // Under the editorship of Vinogradov V.Y., Moscow: Marshrut 2005, p. 29 - 30.

УДК 656.25

**Мария Александровна Оськина**, ассистент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Борис Сергеевич Сергеев**, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Валерий Александрович Сисин**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОФОРОВ

**Maria A. Oskina**, assistant lecturer, "Electric machinery" department, USURT,  
**Boris S. Sergeev**, DSc, professor, "Electric machinery" department, USURT,  
**Valery A. Sisin**, PhD, senior lecturer, "Electric machinery" department, USURT

### Methods For LED Traffic Lights Development

#### Аннотация

Описаны схемы управления светодиодными светофорами, которые позволяют решить ряд проблем, возникающих при их внедрении на транспорте. Рассмотрены вопросы оптимального включения светодиодов в светодиодных матрицах, повышения надежности работы и безопасности движения при длинных линиях связи от поста ЭЦ до светофора, а также контроля излучения светодиодов.

**Ключевые слова:** светодиодный светофор, светодиодная матрица, вольтамперная характеристика светодиода, подсветка показания светофора, параллельное и последовательное включение светодиодов, надежность светофора, огневое реле.

#### Abstract

The LED traffic lights control circuits that allow solving their application problems at transport are viewed. The issues of optimal LED lightening in the LED matrix, reliability increase, traffic safety improvement at long-distance transmission lines from signaling control to traffic light, and also LEDs emission control are resolved.

**Key words:** LED traffic light, LED matrix, LED voltage-current characteristic, traffic signals aspects, parallel and series LED mode, traffic light reliability, light-out relay.

Светодиодные светофоры нашли широкое применение в транспорте в силу многих преимуществ, к которым в первую очередь относятся гораздо больший срок службы и меньшее энергопотребление. Однако при этом возникает ряд проблем, которые препятствуют более эффективной эксплуатационной реализации их положительных свойств [1].

Прежде всего это связано с существованием типовых схем соединения светодиодных матриц (СДМ) светофоров, которые состоят из последовательного и/или параллельного включения цепочек светодиодов [2]. Кроме того, отсутствуют критерии оптимальности использования той или иной схемы включения СДМ и получения при этом какого-либо выигрыша. Не устранен эффект подсветки ненадлежащего показания светофора при длинных кабельных линиях связи от поста ЭЦ до светофора [3]. Нет достаточно надежного и эффективного технического решения по контролю излучения СДМ светофора. В решении этих вопросов и заключается актуальность настоящей работы.

На рис. 1 показаны две типовые схемы включения светодиодов в СДМ светофоров [2].

Очевидно, что для получения требуемых характеристик светоотдачи излучения светофора суммарное количество светодиодов в СДМ обеих схем должно быть равным, т. е.

$$mn = k. \quad (1)$$

Выбор той или иной схемы включения СДМ светофора определяется следующими факторами. С точки зрения надежности функционирования светофора наиболее рациональной является схема, приведенная на рис. 1а, так как при обрыве  $p$ - $n$ -перехода в одном из светодиодов светоотдача СДМ уменьшится незначительно (что справедливо для  $k \gg n$ ). Обрыв одного из светодиодов в схеме, показанной на рис. 1б, приводит к существенному изменению светоотдачи, однако в этой схеме количество резисторов, формирующих токи через светодиоды, меньше. Поэтому в известных светофорах применяются схемы, у которых число последовательно включенных светодиодов равно  $n = (3 - 6)$ , в соответствии с чем определяется и число  $m = kn$ . Не существует объективного и достаточно корректного

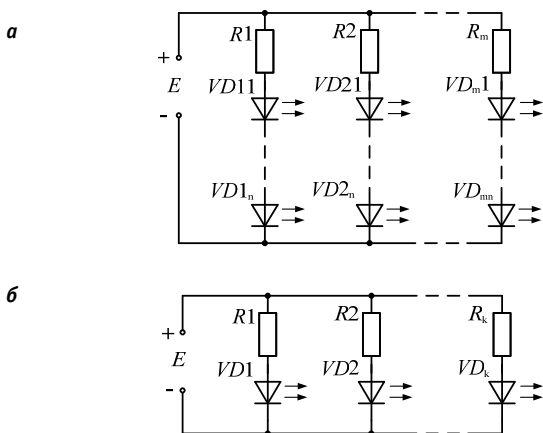


Рисунок 1 — Типовые схемы подключения светодиодов в светофорах

критерия для выбора соотношения между количественными характеристиками  $m$  и  $n$  при нормированном числе  $k$ .

Выполним сравнительный анализ приведенных схем по характеристикам энергопотребления от источника питания  $E$ .

Исходные выражения, определяющие падения напряжения на светодиодах СДМ, для схем, приведенных на рис. 1а и рис. 1б, соответственно имеют вид:

$$U_{св.п} = n(U_{д0} + I_{св.} R_{диф.}); \quad (2а)$$

$$U_{св.1} = U_{д0} + I_{св.} R_{диф.}, \quad (2б)$$

где  $U_{д0}$  и  $R_{диф.}$  — параметры вольтамперной характеристики (ВАХ) светодиода, представляемой в виде ломаной, состоящей из двух прямых линий.

Напряжение, требуемое для задания нормированного значения тока  $I_{св.}$  протекающего через светодиоды, для этих же двух схем определяется как:

$$E_n = n(\alpha + 1)(U_{д0} + I_{св.} R_{диф.}); \quad (3а)$$

$$E_n = (\alpha + 1)(U_{д0} + I_{св.} R_{диф.}), \quad (3б)$$

где  $\alpha = U_R / (U_{д0} + I_{св.} R_{диф.})$ ,  $U_R$  — падение напряжения на токозадающем резисторе.

Для выполнения требований относительной независимости тока, протекающего через светодиоды, необходимо выполнение условия  $\alpha \geq 1$ .

Если имеется возможность выбора величины напряжения питания СДМ значениями, полученными из выражений (3а) или (3б), то мощность, потребляемая рассматриваемыми схемами, определится как:

$$P_{св.п} = mn I_{св.} (\alpha + 1)(U_{д0} + I_{св.} R_{диф.}); \quad (4а)$$

$$P_{св.1} = k I_{св.} (\alpha + 1)(U_{д0} + I_{св.} R_{диф.}). \quad (4б)$$

Сравнение этих уравнений с выражением (1) показывает, что с энергетической точки зрения схемы рис. 1а и рис. 1б равноценны. Поэтому энергопотребление не является критерием выбора той или иной схемы включения СДМ в светофоре.

Одним из направлений создания рациональных схем включения СДМ является применение способа резервирования светодиодов в матрице. Подобная схема приведена на рис. 2.

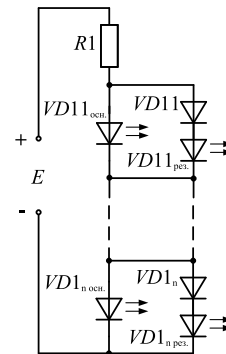


Рисунок 2 — Схема СДМ с резервированием светодиодов

В этой схеме применено последовательное включение основных светодиодов ( $VD11_{осн.} \dots VD1_{п.осн.}$ ). Такая последовательная цепь функционирует в полном составе при отсутствии обрыва в любом из основных светодиодов. При появлении обрыва в одном из них начинает излучать соответствующий параллельно включенный резервный светодиод  $VD1_{п.рез.}$ . Очевидно, что при появлении обрыва в нескольких основных или даже во всех светодиодах суммарная интенсивность излучения СДМ светофора не изменится. Применение резервирования позволяет не только повысить надежность функционирования светофора, но и отказаться от параллельного включения светодиодных ячеек, что дает возможность повысить напряжение питания СДМ до нескольких сотен вольт. Это потенциально обуславливает возможность увеличения длины кабеля от поста ЭЦ или другого пункта управления до светофора до нескольких километров и более. Кроме того, применение для питания светофора высокого постоянного напряжения исключает негативное влияние емкостей между жилами кабеля, которые при питании переменным напряжением могут вызвать подсветку ненадлежащего показания светофора.

Для определения условий нормального функционирования схемы СДМ по рис. 2 рассмотрим типичную ВАХ светодиода (рис. 3).

Для этой характеристики пороговое напряжение на светодиоде  $U_{пор.}$  соответствует отсутствию излучения светодиода, а напряжение  $U_{нест.}$  — области нестабильного его излучения;  $U_{св.ном.}$  — падение напряжения на светодиоде при протекании по нему номинального значения тока  $I_{св.ном.}$ . Для исключения излучения резервного светодиода при исправном основном для каждого основного и резервного светодиодов должно выполняться неравенство

$$U_{св.осн.ном.} < U_{д0} + U_{св.пор.рез.}, \quad (5)$$

где  $U_{д0}$  — падение напряжения на диоде, включенном последовательно с резервным светодиодом.

Рассмотрим вопрос возможности увеличения длины кабеля от поста ЭЦ или другого поста управления до светофора при питании его переменным напряжением 220 В, которая для исключения подсветки ненадлежащего показания светофора в

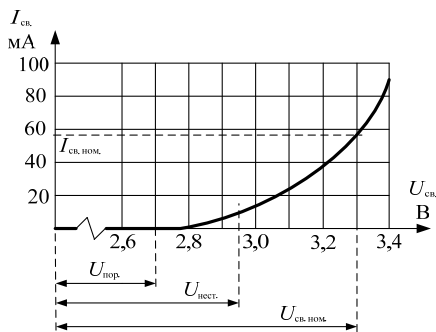


Рисунок 3 — Типичная ВАХ светодиода

настоящее время ограничена длиной 3,5 км. Схема светофора с возможностью увеличения длины кабеля приведена на рис. 4.

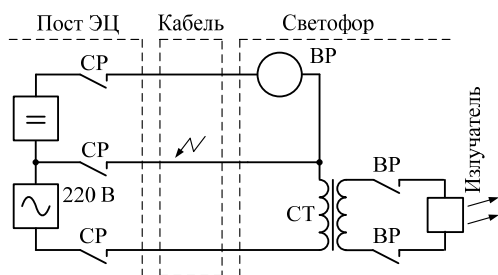


Рисунок 4 — Схема светофора с исключением влияния емкостей между жилами кабеля

Схема управляется контактами сигнального реле СТ. У светофора устанавливается вспомогательное реле ВР. Под обозначением «Излучатель» подразумевается или лампа накаливания, или СДМ с соответствующим выпрямителем, который через контакты реле ВР подключается к вторичной обмотке сигнального трансформатора СТ.

Как видно из схемы рис. 4, появление наводки (показана стрелкой) не приводит к возникновению напряжения питания излучателя до тех пор, пока реле ВР не включится от поста ЭЦ через контакт реле СР. Следовательно, появление любого переменного напряжения наводки в жилах кабеля, соединяющего трансформатор СТ с постом ЭЦ, не вызовет ненадлежащего показания светофора. Это дает возможность увеличить

длину кабеля до нескольких десятков километров или более. Подключение реле ВР к источнику постоянного напряжения на посту ЭЦ для обеспечения требований безопасности и помехозащищенности может быть выполнено автономно двухполюсным и отделено от источника переменного напряжения 220 В.

Проблема контроля излучения СДМ может быть решена устройством, показанным на рис. 5.

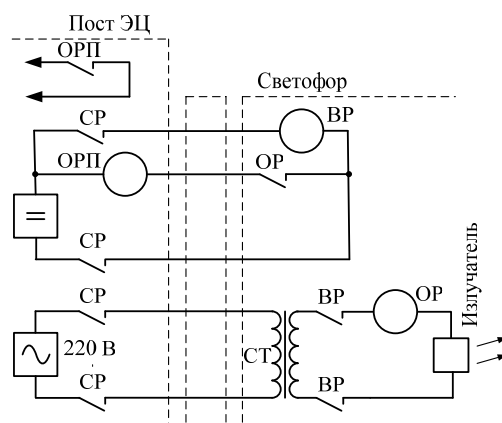


Рисунок 5 — Схема управления светофором с контролем излучения

Здесь наравне с описанным выше реле ВР введено располлагаемое вблизи светофора огневое реле ОР, контактом которого включается повторитель огневого реле ОРП. Реле ОР контролирует ток, протекающий непосредственно через излучатель. Этим исключается шунтирующее влияние емкости жил кабеля, которые в наиболее значительной степени оказывают негативное влияние при больших расстояниях от поста ЭЦ до светофора. Очевидно, что реле ОР может быть включено как в цепь переменного тока, так и в цепь постоянного тока, если в качестве излучателя используется СДМ с выпрямителем. Здесь же использовано упомянутое выше двухполюсное размыкание цепи питания реле ВР.

Следовательно, применение рассмотренных технических решений дает определенные преимущества перед известными и, кроме того, позволяет вести дальнейшие исследования в области применения светодиодных светофоров на транспорте.

## Литература

1. Сергеев Б.С., Оськина М.А. Анализ схем управления светодиодными светофорами // Транспорт Урала. 2009. № 1 (20). С. 21 — 24.
2. Есюнин В.И., Ефрюшкин А.Е. Светодиодные переездные светофоры // Автоматика, связь, информатика. 1999. № 12. С. 25 — 26.
3. Пусвацет Ю.Ю., Широков Н.Ю. Светодиодные светофоры на большом удалении от поста ЭЦ // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 12. С. 21 — 23.

## References

1. Sergeev B.S., Oskina M.A. Analiz skhem upravleniya svetodiodnymi svetoforami [Analysis of control schemes for LED traffic lights] // Transport Urala. 2009. № 1 (20). P. 21–24.
2. Esyunin V.I., Efyushkin A.E. Svetodiodnye pereezdnye svetofory [LED level crossing traffic lights] // Avtomatika, svyaz, informatika. 1999. № 12. P. 25–26.
3. Puvsvatset Yu.Yu., Shirokov N.Yu. Svetodiodnye svetofory na bolshom udaleniі ot posta ETS [LED traffic lights at long-distance from signaling control] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2011. № 12. P. 21–23.

УДК 539.3

Татьяна Александровна Волкова, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая и прикладная математика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
Сергей Сергеевич Волков, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

## РАСЧЕТ МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ В ПРУЖИННЫХ РЕССОРАХ ВАГОНОВ

Tatiana I. Volkova, PhD in Mathematical Physics, Associate Professor, «Higher and Applied Mathematics» Department, Urals State University of Railway Transport (USURT).

Sergey S. Volkov, PhD in Mathematical Physics, Senior Research Associate, Institute of Mechanical Engineering, Ural Department of Russian Academy of Sciences.

### Freight Cars Coil Springs Microdamage Calculation

#### Аннотация

Математическая модель механики микронеоднородных сред применяется для оценки прочности рессорного комплекта вагона. Вычисляются дисперсии максимальных касательных напряжений в пружинах рессоры. Оценивается вероятность разрушения элементов микроструктуры металла. Критический уровень поврежденности соответствует разрушению пружины при заданном напряжении. На каждом этапе нагружения вычисляются изменившиеся свойства металла. Переход к анализу усталостной прочности пружин выполняется при нелинейном суммировании поврежденности.

**Ключевые слова:** случайные свойства, математическая модель, поврежденность микроструктуры, усталость, пружинная рессора вагона.

#### Abstract

Mechanical micro-inhomogeneous media mathematical model is used to assess the freight car spring group strength. The variance of maximum shear stress in the coil spring is calculated. The probability of the metal microstructure elements destruction is estimated. The critical level of damage corresponds to the destruction of the spring at a given stress. The metal changed properties are calculated at each stage of loading. Transition to the springs fatigue strength analysis is performed with a nonlinear summation of damage.

**Key words:** random properties, mathematical model, microstructure damage, fatigue, freight car coil spring.

Разрушение элементов конструкций начинается, как правило, с возникновения и развития в них повреждения элементов микроструктуры. Этот процесс сопровождается постепенной деградацией свойств материала в области будущего разрушения, затем развивается макроскопическая трещина. Учет ранних стадий разрушения позволит увеличить надежность работы конструкции.

Рассмотрим математическую модель механики микронеоднородных сред со случайными деформационными и прочностными свойствами элементов микроструктуры [1]. Предполагается, что для исследуемой детали конструкции решена соответствующая краевая задача и найден тензор макродеформаций  $\epsilon$ .

Тензор модулей упругости  $\Theta(X)$  в элементах микроструктуры  $X = (x_1, x_2, x_3)$  выразим через случайные модули объемной деформации  $K(X)$  и сдвиговой деформации  $G(X)$ . Используем также  $\mathbf{V}$  — объемную и  $\mathbf{D}$  — девиаторную составляющие единичного тензора четвертого ранга  $\mathbf{I}$ .

$$\Theta(X) = 3K(X)\mathbf{V} + 2G(X)\mathbf{D}.$$

Для операции осреднения случайных величин используем угловые скобки. Математические ожидания модулей обозначим  $K = \langle K(X) \rangle$ ,  $G = \langle G(X) \rangle$ , а их вариации  $K^\circ(X)$  и  $G^\circ(X)$ . В расчетах используется также детерминированный коэффициент Пуассона  $\nu$ .

Необходимость учета свойств микроструктур и даже наноструктур при создании современных материалов подчеркивается многими авторами [2, 3]. При этом внимание уделяется характеристикам дисперсности структур, наличию в них несовершенств и различных микродефектов.

В вероятностной модели среды по свойствам микроструктуры и виду напряженного состояния вычисляются параметры распределения составляющих тензора микронапряжений  $\sigma(X)$ , затем рассматривается микроструктурное условие прочности. Случайные напряжения и деформации в элементах микроструктуры находятся методом последовательных приближений с помощью соответствующих моментных функций [1]. Достаточно точное решение дают

моментные функции до четвертого порядка включительно. В приближенных расчетах обычно используются дисперсии напряжений.

По микроструктурному условию прочности оценивается поврежденность  $q$ , т. е. относительная доля разрушенных элементов микроструктуры. Для расчета поврежденности вычисляется вероятность превышения микронапряжением  $\sigma(X)$  и предела прочности  $\sigma_B$  [1, 4].

Возникшая поврежденность  $q$  дает поправки  $\Delta K$ ,  $\Delta G$  к средним модулям объемной  $K$  и сдвиговой  $G$  деформаций. Макромодули упругости металла изменяются:  $\tilde{K} = K + \Delta K$ ,  $\tilde{G} = G + \Delta G$ . Новые свойства  $\tilde{K}$ ,  $\tilde{G}$  учитывают взаимодействие элементов микроструктуры и отражают равновесное состояние, к которому вернулась микроструктура после приобретенных микроразрушений.

Зависимость напряжений и деформаций постепенно становится нелинейной. При построении диаграмм деформирования задаем приращения макродеформаций образца, затем рассчитываем напряжения, изменяющиеся в зависимости от свойств материала. Переход к ниспадающей ветви диаграммы деформирования связан с приближением модулей упругости к нулевым значениям. Это говорит о том, что несущие возможности элемента конструкции исчерпаны. В наиболее ответственных конструкциях критерием безопасной работы можно считать уровень отклонения макродеформаций от предела текучести материала.

Рассмотрим применение изложенной выше модели накопления поврежденности к анализу работы пружинных рессор грузовых вагонов. Большинство грузовых вагонов парка РФ эксплуатируются на двухосных тележках модели 18-100 [5, 6]. В вагонной тележке 18-100 (рис. 1) рессорное подвешивание состоит из двух комплектов, размещенных в рессорных проемах левой и правой боковых рам. В каждый комплект входит семь двухрядных цилиндрических пружин и два клиновидных фрикционных гасителя колебаний. Каждая двухрядная пружина состоит из наружной и внутренней пружин, имеющих разную навивку — правую и левую соответственно, чтобы пружины не сцеплялись между собой. Гаситель колебаний двухосной тележки имеет два фрикционных клина, опирающихся на двухрядные цилиндрические пружины. При колебаниях вагона (надрессорной балки) фрикционные клинья перемещаются. Возникают силы трения, обеспечивающие гашение колебаний вагона. Величина силы трения пропорциональна прогибу пружин. Она возрастает по мере увеличения прогиба.

Величина поглощенной энергии определяется в виде коэффициента относительного трения. При уменьшении коэффициента относительного трения рессорного подвешивания возрастают нагрузки в боковых рамах. Может произойти излом и замыкание витков пружин рессорного подвешивания. Только по причине изломов пружин ежегодно отцепляется значительное количество вагонов [5]. В каждом из этих вагонов существует вероятность появления трещины в боковой раме.

Рассмотрим цилиндрическую винтовую пружину круглого сечения, состоящую из  $n$  полных витков. Даны радиус цилиндра  $R$ , радиус сечения  $r$  стержня пружины и модуль сдвига металла  $G$ . Длина пружины  $l = 2\pi Rn$ . Вдоль оси пружины дей-

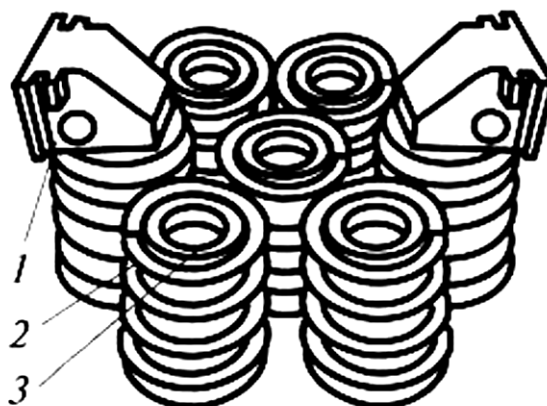


Рисунок 1 — Общий вид рессорного комплекта тележки 18-100: 1 — фрикционный клин, 2 — наружная пружина, 3 — внутренняя пружина

ствует сила  $P$ . Расчет деформаций и напряжений для пружины является частным случаем задачи о продольном изгибе изогнутых стержней произвольного сечения, закрепленных в одном из концов. Нужно определить перемещение  $\gamma$  по всей длине пружины и величину касательных напряжений  $\tau$  в материале пружины.

Решение [7] определяет максимальные касательные напряжения  $\tau$  в материале пружины, т. е.

$$\tau = \frac{2PR}{\pi r^3} = \frac{\gamma r G}{2n\pi R^2}. \quad (1)$$

При этом перемещение  $\gamma$  конца изогнутого стержня составит

$$\gamma = \frac{4nPR^3}{r^4 G}.$$

В металле возникают деформации сдвига:

$$e = e \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, e = \frac{\gamma}{l}. \quad (2)$$

Найденные напряжения и деформации являются макроскопическими рабочими характеристиками процесса нагружения конструкции и находятся в области безопасных значений. Тем не менее в отдельных элементах микроструктуры случайные напряжения могут быть достаточно большими. Об этом говорит отличие от нуля дисперсий микронапряжений. Задолго до полного разрушения всего образца при макронапряжениях, значительно меньших разрушающего, появляется множество микроскопических полостей и трещин, свидетельствующих о разрушении отдельных элементов структуры. Действующие микроструктурные напряжения могут быть как меньше, так и значительно больше средних напряжений.



Используя моментные функции случайного микроструктурного модуля сдвига  $G(X)$  и масштабный коэффициент средней деформации  $e$ , вычислим дисперсию  $\langle \tau^0(X)^2 \rangle$  касательных микронапряжений в металле пружины [4]:

$$\begin{aligned} \langle \tau^0(X)^2 \rangle = & \frac{4(1+\nu)^2}{9(1-\nu)^2} G^2 e^2 ((1,4-\nu)^2 \frac{\langle G^0(X)^2 \rangle}{G^2} + \\ & + (1,4-\nu)(1,6-2\nu) \frac{\langle G^0(X)^3 \rangle}{G^3} + \\ & + (1,6-2\nu)^2 \left( \frac{\langle G^0(X)^4 \rangle}{G^4} - \frac{\langle G^0(X)^2 \rangle^2}{G^4} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Предполагая, что случайный микроструктурный модуль сдвига  $G(X)$  распределен по нормальному закону, упростим формулу, включив в нее коэффициент вариации модуля сдвига

$$kG = \frac{\sqrt{\langle G^0(X)^2 \rangle}}{G}. \text{ Тогда}$$

$$\langle \tau^0(X)^2 \rangle = \frac{4(1+\nu)^2}{9(1-\nu)^2} G^2 e^2 ((1,4-\nu)^2 kG^2 + 2(1,6-2\nu)^2 kG^4).$$

Перейдем к коэффициенту вариации  $k\tau$  касательного напряжения

$$k\tau = \frac{2(1+\nu)}{3(1-\nu)} kG \sqrt{(1,4-\nu)^2 + 2(1,6-2\nu)^2 kG^2}.$$

Ограничимся случаем детерминированного предела прочности элементов микроструктуры  $\sigma_B$ . Рассмотрим случайную величину  $w(X) = \tau(X) - \sigma_B$ . Если в элементе микроструктуры  $w(X) \geq 0$ , то произойдет разрушение этого элемента. В расчете поврежденности используется коэффициент вариации  $kw$  микроструктурного параметра прочности

$$kw = k\tau \frac{\tau}{\tau - \sigma_B}. \quad (4)$$

Используя методы работ [1, 4], вычислим относительную поврежденность микроструктуры металла пружины  $q$

$$q = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{2}}{2kw} \right). \quad (5)$$

Согласно справочным данным о рессорной стали, модуль сдвига  $G$  изменяется в диапазоне 73 — 75 ГПа. Коэффициент Пуассона  $\nu$  приблизительно равен 0,307. Средний предел прочности элементов микроструктуры  $\sigma_B = 1,4$  ГПа. Предположим, что микроструктурный модуль сдвига  $G(X)$  распределен по нормальному закону с математическим ожиданием  $G = 74$  ГПа и средним квадратичным отклонением 0,33 ГПа. Тогда его коэффициент вариации  $kG = 0,0044$ .

В табл. 1 приведены данные о размерах пружин [6] рессорного комплекта тележки 18-100 грузового вагона.

Пусть вес нагруженного четырехосного вагона  $Q = 72$  т. Нагрузка на один рессорный комплект составляет 18 т. Нагрузка, передаваемая на пружины, существенно уменьшается

Таблица 1 — Размеры пружин рессорного комплекта

Показатель	Наружная пружина	Внутренняя пружина
Диаметр прутка, мм	$2r_1 = 46$	$2r_2 = 38$
Диаметр пружины, мм	$2R_1 = 243$	$2R_2 = 176$
Число рабочих витков	$n_1 = 4$	$n_2 = 9$

за счет работы фрикционного аппарата [6]. Работа на преодоление сил трения при этом поглощается, превращаясь в тепловую энергию. Допустим, нагрузка на рессорный комплект составит 14 т, а на каждую из семи двухрядных пружин — по 2 т. Высота наружной и внутренней пружин всегда одинакова. Распределение веса  $P = 2$  т на наружную  $P_1$  и внутреннюю  $P_2$  пружины произойдет пропорционально области касания:

$$P_1 = P \frac{R_1 - r_1}{R_1 - r_1 + R_2 - r_2}; \quad P_2 = P \frac{R_2 - r_2}{R_1 - r_1 + R_2 - r_2}.$$

Для размеров, указанных в табл. 1, получим  $P_1 = 1240$  кг,  $P_2 = 760$  кг. По формуле (1) найдем средние касательные напряжения для наружной и внутренней пружин. Напряжение в наружной пружине  $\tau_1 = 78$  МПа, во внутренней пружине  $\tau_2 = 61$  МПа.

Вычислим дисперсию (3) касательного напряжения  $\langle \tau^0(X)^2 \rangle$  и коэффициент его вариации  $k\tau = 0,0052$ . Коэффициент вариации  $kw$  параметра прочности (4) возрастает с приближением среднего напряжения  $\tau$  к пределу прочности  $\sigma_B$  а вероятность возникновения поврежденности (5) увеличивается. Для наружной пружины получим  $kw_1 = 0,00006$ . Для внутренней пружины  $kw_2 = 0,00005$ .

В результате при сделанных предположениях о свойствах рессор и характере их нагружения в наружной пружине получена поврежденность  $q = 310^{-18}$ . Во внутренней пружине меньше коэффициент вариации параметра прочности, поэтому и поврежденность в ней несколько меньше. Как и следовало ожидать, это пренебрежимо малые величины. Такой результат объясняется высоким качеством рессорной стали. Тем не менее поврежденность при многократной циклической нагрузке накапливается и может достичь критических значений.

При переходе от одного этапа нагружения к другому проведем перерасчет макросвойств металла [2] с учетом возникшей поврежденности  $q$ . Это будут изменившиеся модуль сдвига  $\tilde{G}$  и коэффициент Пуассона  $\tilde{\nu}$ . На рис. 2 и 3 показано влияние поврежденности микроструктуры на эти параметры. Характер изменений зависит от начального коэффициента Пуассона для материала, не содержащего повреждений.

Чем больше начальный коэффициент Пуассона для сплошного материала, тем быстрее накапливаются изменения от поврежденности. При критической поврежденности около 30-40% модуль сдвига приближается к нулю. Диаграмма деформирования переходит при этом к ниспадающей ветви [4], начинают развиваться макротрещины.

В процессе эксплуатации рессоры испытывают многократное циклическое нагружение. Процесс усталостного разрушения металла сопровождается развитием и накопле-

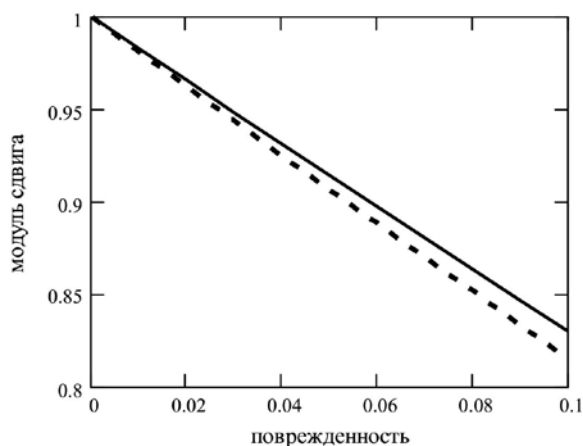


Рисунок 2 — Относительное изменение модуля сдвига с развитием поврежденности при различных начальных коэффициентах Пуассона:

—————  $\nu = 0,35$ ; - - - - -  $\nu = 0,30$

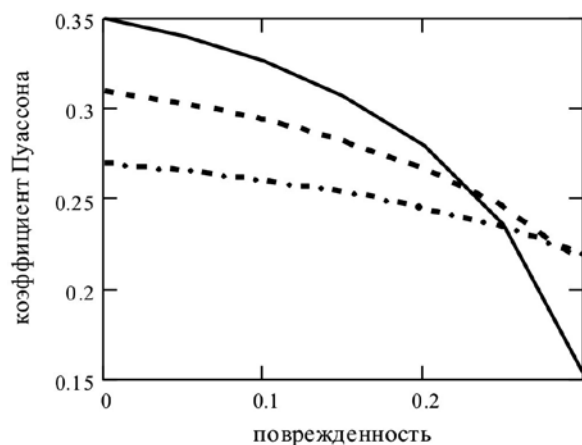


Рисунок 3 — Изменение коэффициента Пуассона с развитием поврежденности при различных начальных коэффициентах Пуассона:

—————  $\nu = 0,35$ ; - - - - -  $\nu = 0,31$ ; - · - · -  $\nu = 0,27$

нием поврежденности в элементах микроструктуры. Значительно влияние неоднородности механических свойств металла и структурных дефектов [8]. Из-за несовершенств микроструктуры в ней возникают концентраторы напряжений. Для развития теории усталости требуются обширные экспериментальные исследования. Датчики усталостных повреждений позволяют «выходить» несовершенствам наружу в форме дислокационных полос, видимых под микроскопом [8]. Долговечность материала зависит от характера нагружения, от деформационных и прочностных свойств его микроструктуры. Разработка методов суммирования повреждений при  $N$  циклах нагружения является одной из основных задач для прогнозирования усталостной прочности.

Пусть материал испытывает циклическое нагружение с амплитудой  $\sigma_a$ . Случайные напряжения в микроструктуре вызывают поврежденность. Поврежденность на одном цикле нагружения  $\bar{q}$  мала, поэтому ее можно суммировать, объединяя в серии по  $m$  циклов. Число объединенных циклов может составлять от нескольких сотен до тысячи. Поврежденность серии будет равна  $q = m\bar{q}$ . Зная  $q$ , вычисляем изменившиеся макросвойства металла. При разгрузке закрывается часть дефектов, связанная с объемным разрыхлением. Величина относительного объемного разрыхления  $\beta$  выражается через инварианты тензора деформаций  $I_1, I_2, I_3$

$$(1 + \beta)^2 = 1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3.$$

Для тензора деформаций (1) получим  $\beta = \sqrt{1 + 4e^2} - 1$ .

Поврежденность изменяет параметры распределения микронапряжений, следовательно, меняется и микроструктурное условие прочности. Следующая серия вычислений выполняется с учетом возникших изменений. При переходе от одной серии циклов нагружения к другой повреждения суммируются по нелинейному закону. Проверка критерия усталостного разрушения проводится для каждой серии циклов нагружения. Если макроразрушения отсутствуют, то для металла с уточненными свойствами снова вычисляем поврежденность микроструктуры. Зарождение макроскопических трещин в материале определяется моментом обрыва диаграмм деформирования [4]. Число циклов  $N$  до этого момента определит долговечность металла. При этом достигается также некоторая критическая суммарная поврежденность, обоснованная инженерным опытом и связанная с запасом прочности данной конструкции.

В системе Mathcad составлена программа и рассчитаны уравнения линий усталости, отражающие свойства микроструктуры и условия нагружения металла. Для оптимизации расчетов применяются некоторые приближенные формулы. Результаты расчетов долговечности для внешней пружины рессоры приведены в табл. 2.

Рассматриваются два варианта механических свойств стали. Первый соответствует приведенным выше числовым данным для пружин рессоры. В качестве амплитуды цикла принято вначале  $\sigma_a = \tau_1 = 78$  МПа. С увеличением амплитуды цикла уменьшается долговечность  $N$ . Во втором варианте модуль сдвига имеет сравнительно большой коэффициент вариации  $kG = 0,05$ . Это соответствует металлу, содержащему больше несовершенств и повреждений, чем было в первом варианте. В этом случае остаточный ресурс конструкции меньше. Во втором варианте в качестве критерия микроразрушения  $\sigma_B$  взят предел текучести  $\sigma_{0,2} = 1200$  МПа. Тем не менее расчеты показывают меньшую долговечность для «уставшего» металла.

Таблица 2 — Расчет усталостной долговечности

Вариант	$G$ , ГПа	$kG$	$\nu$	$\sigma_a$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\ln N$
1	74	0,0044	0,307	1400	78	8,2
					120	6,0
					150	5,3
2	74	0,05	0,307	1200	78	6,5
					120	5,7
					150	4,3

Таким образом, предложены методы оценки микроструктурной поврежденности и деградации свойств металла, предшествующие возникновению макродефектов и макротрещин. Используется вероятностная модель микронеоднородной среды. Показано, что случайные свойства элементов микроструктуры влияют на деформационные и прочностные свойства металла. Критическая микроповрежденность определяется по диаграммам деформирования, рассчитанным с учетом изменяющихся

свойств металла при нагружении. Приведенные методы использованы для анализа поврежденности и долговечности пружинных рессор вагонов. Результаты расчетов соответствуют диапазону данных экспериментов о свойствах рессорной пружинной стали. Из результатов расчета следует, что чем больше неоднородностей в материале, тем меньше усталостный ресурс конструкции. Оценка этого ресурса возможна, если известны микроструктурные характеристики материала.

## Литература

1. Волкова Т.А., Волков С.С. Критическая поврежденность микроструктуры металлов в элементах конструкций // *Транспорт Урала*. 2012. № 4 (35). С. 21 — 25.
2. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Технология создания конструкционных наноструктурированных сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009. № 6 (648). С. 3 — 7.
3. Segal V.M. Deformation mode and plastic flow in ultra fine grained materials // *Materials Science and Engineering*. 2005. V. 406 (1 — 2). P. 205 — 207.
4. Volkova T.A., Volkov S.S. Microstructure damage related to stress- strain curve for grain composites // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2009. № 52 (2). P. 83 — 90.
5. Игембаев Н.К. Анализ конструкций тележек грузовых вагонов, созданных в России // *Транспорт Урала*. 2009. № 4 (23). С. 76 — 80.
6. Архитектоника грузовых вагонов. Двухосные тележки грузовых вагонов. [Электронный ресурс]. URL: <http://railcars.blogspot.ru/2008/01/2.html> (дата обращения 18.05.2013).
7. Ферстер М. Справочная книга для инженеров-строителей. Ч. I. М. : Л., ГНТИ, 1931. 778 с.
8. Котельников А.П. Специальные средства предупреждения техногенных катастроф, вызванных усталостным разрушением металлоконструкций машин, выработавших нормативный срок службы // *Транспорт Урала*. 2004. № 3 (6). С. 74 — 80.

## References

1. Volkova T.A., Volkov S.S. Kriticheskaya povrezhdennost' mikrostruktury metallov v elementakh konstruksiy [Critical damage of the metals microstructure in construction elements] // *Transport of the Urals*. 2012. No. 4(35). s. 21 – 25.
2. Rybin V.V., Malyshevskiy V.A., Khlusova E.I. Tekhnologiya sozdaniya konstruksionnykh nanostruktuirovannykh staley [Technology for creating nanostructured structural steels] // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2009. No. 6(648). s. 3 – 7.
3. Segal V.M. Deformation mode and plastic flow in ultra fine grained materials // *Materials Science and Engineering*. 2005. V. 406(1-2). P. 205 – 207.
4. Volkova T.A., Volkov S.S. Microstructure damage related to stress-strain curve for grain composites // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2009. № 52(2). pp. 83 – 90.
5. Igembayev N.K. Analiz konstruksiy telezhok gruzovykh vagonov, sozdannykh v Rossii [Construction analysis of freight-car trucks created in Russia] // *Transport of the Urals*. 2009. No. 4(23). s. 76 – 80.
6. Arkhitektonika gruzovykh vagonov. Dvukhosnyye telezhki gruzovykh vagonov. [Architectonics of freight cars. Two-axle freight-car trucks] URL: <http://railcars.blogspot.ru/2008/01/2.html> (access date 18.05.2013).
7. Ferster M. Spravochnaya kniga dlya inzhenerov-stroiteley. Chast' pervaya [Forster M. Handbook for Civil Engineers. Part one] / Moscow - Leningrad: GNTI, 1931. 778 s.
8. Kotel'nikov A.P. Spetsial'nyye sredstva preduprezhdeniya tekhnogennykh katastrof, vyzvannykh ustalostnym razrusheniyem metallokonstruksiy mashin, vyrabotavshikh normativnyy srok sluzhby [Special means to prevent man-made disasters caused by fatigue failure of the used machines steel structures] // *Transport of the Urals*. 2004. No. 3(6). s. 74 – 80.

УДК 656.225

**Марина Аркадьевна Журавская**, кандидат технических наук, доцент, директор департамента международных связей Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
**Иван Олегович Макаренко**, аспирант кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## **КОНТРЕЙЛЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ КАК ТОЧКА РОСТА ЛОГИСТИЧЕСКОГО БИЗНЕСА ОАО «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»**

**Marina A. Zhuravskaya**, PhD in Engineering, associated professor, Head of Department of International Relations, Federal Public Budgetary Educational Institution of Higher Education of Urals State University of Railway Transport.  
**Ivan O. Makarenko**, Postgraduate of Department of «Stations, Junctions and Freight Work», Federal Public Budgetary Educational Institution of Higher Education of Urals State University of Railway Transport

## **Piggy-Back Transportations As Point Of Growth Of Logistic Business JSC Russian Railways**

### Аннотация

В работе изучены современные логистические технологии организации контрейлерных перевозок в странах ЕС и рассмотрена возможность использования лучшего зарубежного опыта для российских условий. Разработана классификационная матрица технологий контрейлерных систем с учетом различных способов погрузки автотранспортных средств на железнодорожные платформы.

Предложен пилотный проект организации контрейлерных перевозок на маршруте Екатеринбург — Москва с участием ОАО «Российские железные дороги». Проект содержит экономико-технологическое обоснование организации контрейлерных перевозок и комплекс мероприятий, направленных на повышение привлекательности данного сегмента транспортного рынка.

**Ключевые слова:** контрейлерные перевозки, логистические технологии, комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки, инфраструктура.

### Abstract

In publication modern logistic technologies of piggy-back transportations organization to EU countries are studied and possibility of use of the best foreign experience for the Russian conditions is considered. The classification matrix of piggy-back systems technologies considering different methods of loading of vehicles on railway platforms is developed. The pilot project of piggy-back transportations organization on a route 'Ekaterinburg-Moscow' with involvement of JSC Russian Railways is offered. The project contains economical and technological reasons for piggy-back transportations organization and a complex of actions directed on increase of attractiveness of this segment of the transport market.

**Key words:** piggy-back transportations, logistic technologies, combined railway and automobile transportations, infrastructure.

### Актуальность развития контрейлерных перевозок в России

**В** современных условиях развития транспортного бизнеса в мире и России его точкой роста может стать внедрение таких логистических технологий, как организация мультимодальных или интермодальных перевозок, одной из разновидностью которых являются контрейлерные перевозки [1, 2]. Контрейлерные (contrail) перевозки — это комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки, при которых перевозится трейлер, полуприцеп или съемный кузов на железнодорожной платформе [3].

Контрейлерные перевозки успешно функционируют в Европе уже более 30 лет, с каждым годом увеличивая железнодорожную составляющую. К 2030 г. планируется 30% всех действующих автомобильных грузопотоков передать на железнодорожный транспорт, а к 2050 г. — 50%.

Анализируя возможности развития контрейлерных перевозок в России, необходимо отметить, что в первую очередь они будут интересны железнодорожникам, так как основная часть пути контрейлерных перевозок в условиях РФ приходится на железную дорогу. Для транспортных компаний, специализирующихся на автомобильных грузоперевозках, такая схема доставки изменит привычную технологию оказываемых услуг. При первом рассмотрении этой схемы многие эксперты прогнозируют отсутствие интереса автомобилистов к данному сегменту рынка (так как это потребует дополнительных усилий по укреплению взаимодействия с железной дорогой — одним из главных конкурентов автотранспорта). Однако переход от конкурентных отношений разных видов транспорта к логистическому сотрудничеству, в котором выиграют все участники транспортного процесса, — назревшая необходимость. Результатом такого сотрудничества станет ускорение доставки грузов, что, в свою очередь, снизит затраты в виде замороженных финансовых средств грузовладельцев (пока груз находится в пути, он представляет собой замороженные средства, и чем больше срок транспортировки, тем больше от этого упущенная выгода).

Преимущества данного вида перевозок также очевидны для транспортной системы государства в целом. Например, опыт Европы показал, что в результате перехода от унимодальных к интермодальным перевозкам сократились экологические издержки на 200 — 220 млн евро, а затраты на ремонт дорог — на 500 млн евро [4].

В ходе исследования авторы статьи установили, что интерес к контейнерным перевозкам в России появился не впервые. Так, в начале первого десятилетия 2000-х гг. уже наблюдался период активного интереса к контейнерным перевозкам, что отражалось в большом количестве исследований, научных работ и публикаций. Однако на тот момент российский транспортный рынок не был готов к внедрению контейнерных перевозок из-за ряда сдерживающих факторов, таких как отсутствие необходимой инфраструктуры, проработанной нормативной базы и стимулирующих мер со стороны государства, наличие неконкурентного железнодорожного тарифа по сравнению с прямым автомобильным вариантом перевозки и др. (табл. 1).

**Таблица 1 — Сравнение условий для внедрения контейнерных перевозок в России на разных этапах времени**

Факторы	Этап I 2000 – 2010 гг.		Этап II 2010 – 2020 гг.	
	Автомобиль	Контейнер	Автомобиль	Контейнер
<b>I. Инфраструктурные</b> 1.1. Подвижной состав 1.2. Терминалы	отсутствие		В 2012 г. разработан отечественный подвижной состав (ОАО «Рухзиммаш»)	
<b>II. Нормативно-правовые</b> 2.1. Нормативная база 2.2. Стимулирующие меры	отсутствие		Законопроект о контейнер-х перев-х Законопроект об экологии Ограничения на въезд грузовых авто	
<b>III. Факторы финансовой устойчивости</b> 3.1. Тарифы	неконкурентный жд-тариф		исключительный тариф	
<b>IV. Технологические</b>				
4.1. Маршрутная скорость, км/сут	500 – 700	–	500 – 700	1300 – 1400*
4.2. Срок доставки на маршруте: Москва – Екатеринбург, сут.	2,5 – 3,1	–	2,5 – 3,1	1,25 – 1,35

\* Согласно Концепции комплексного развития контейнерного бизнеса ОАО «РЖД» [6].

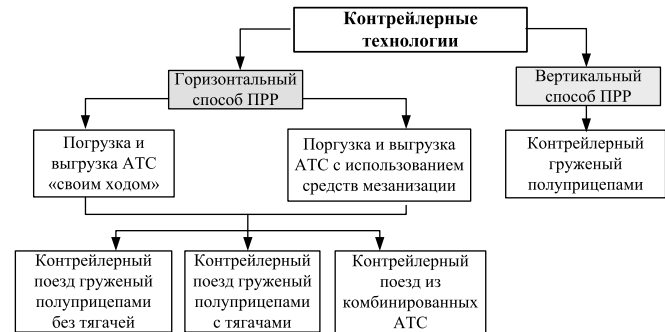
Однако в настоящий момент наблюдается снижение воздействия перечисленных факторов. В 2012 г. ОАО «РЖД» и ОАО «Рухзиммаш» (ключевой актив холдинга ОАО «РКТМ») разработали специализированную платформу для перевозки контейнеров и универсальных контейнеров [5]. Повысилась «технологическая готовность» железных дорог к взаимодействию с автотранспортом, определена концепция комплексного развития контейнерного бизнеса ОАО «РЖД», изменилась позиция правительства РФ в оценке последствий деятельности автотранспорта на окружающую среду и т. д. (см. табл. 1).

Таким образом, в настоящий период необходимость развития контейнерных перевозок в России не вызывает сомнений. Они обладают большим потенциалом и способны стать точкой роста логистического бизнеса ОАО «Российские железные дороги».

**Современные технологии осуществления контейнерных перевозок**

Интенсивное развитие грузовых перевозок в мире и разнообразие технических средств для их осуществления поро-

дили широкий спектр различных способов проведения погрузо-разгрузочных работ (ПРР) автотранспортных средств (АТС) на железнодорожный подвижной состав, отличающихся степенью механизации, временем выполнения основных технологических операций, развитостью терминальных устройств. Для более глубокого изучения проблемы авторами предлагается ввести классификацию контейнерных технологий по ряду признаков (рис. 1).



**Рисунок 1 — Классификация контейнерных технологий по способу осуществления погрузо-разгрузочных работ**

В соответствии с предложенной классификацией в статье рассмотрены различные зарубежные технологии организации контейнерных перевозок. Контейнерные перевозки с горизонтальным способом погрузки — наиболее распространенный в Европе вид. К ним относятся следующие технологии.

1. Технология Modalohr, разработанная французской компанией LOHR [7] относится к системам с погрузкой АТС «своим ходом». Суть технологии заключается в использовании специализированного подвижного состава с поворотным днищем и специальной терминальной инфраструктуры (рис. 2).



**Рисунок 2 — Подвижной состав и терминальная инфраструктура технологии Modalohr [7]**

2. Технология CargoBeamer, разработанная немецкой компанией CargoBeamer AG [8], относится к системам, в которых погрузо-разгрузочные работы с автотранспортными сред-

ствами осуществляются при помощи средств механизации. Как и Modalohr, технология CargoBeamer отличается высокой скоростью погрузки поезда и высокой степенью механизации погрузки-выгрузки. АТС устанавливается водителем в специальный поддон, расположенный на поверхности площадки терминала параллельно составу поезда (рис. 3).



Рисунок 3 — Поддон для погрузки и крепления АТС по технологии CargoBeamer

3. Технология MegaSwing, предлагаемая шведской фирмой Kockums Industrier [9], относится к системам с погрузкой АТС «своим ходом». Суть технологии заключается в использовании специальных железнодорожных платформ, разработанных компанией (рис. 4), стоимость которых достаточно высока.



Рисунок 4 — Железнодорожная платформа MegaSwing Duo

Одним из преимуществ использования такого подвижного состава является возможность осуществления погрузки-выгрузки АТС без каких-либо дополнительных устройств и сооружений на территории терминала.

4. Технология ROLA [10] (от нем. rollende landstrasse — будущее шоссе), разработанная австрийской компанией ÖKOMBI, отличается от предыдущих систем отсутствием потребности в дорогостоящей терминальной инфраструктуре и инновационных видах железнодорожного подвижного состава. Она относится к контейнерным системам, в которых погрузка и выгрузка АТС осуществляется «своим ходом». Железнодорожные платформы представляют собой обычные платформы с углубленным днищем (рис. 5). В связи с тем что заезд и выезд АТС осуществляется с торца состава, время на погрузку поезда требуется больше.

Второй класс контейнерных технологий — с вертикальным способом погрузки — требует наличия крановой инфра-



Рисунок 5 — Контейнерные перевозки по технологии ROLA

структуры, ричстакеров и другой универсальной погрузочной техники (рис. 6).



Рисунок 6 — Погрузка полуприцепа краном (а) и ричстакером (б)

Данную технологию использует немецкая интермодальная компания Kombiverkehr [11]. Погрузка и выгрузка полуприцепов осуществляется грузоподъемным оборудованием. Железнодорожный подвижной состав — универсальный. Использование данной технологии не предполагает наличия особого напольного оснащения контейнерного терминала. К ее недостаткам можно отнести относительно небольшую скорость погрузки контейнерного поезда, потребность в дорогостоящем грузоподъемном оборудовании, высокую трудоемкость ПРР.

На основании классификации контрейлерных технологий (см. рис. 1) авторами статьи разработана матрица контрейлерных систем (табл. 2).

Таблица 2 — Матрица классов контрейлерных технологий

Использование средств механизации	Плоскость выполнения PPP	
	H (англ. horizontal)	V (англ. vertical)
S (англ. self — самостоятельный)	SH-1 (Modalohr)	-
	SH-2 (MegaSwing)	-
	SH-3 (ROLA)	-
M (англ. mechanization)	MH-1 (CargoBeamer)	MV-1 (Kombiverkehr)

Возможность внедрения той или иной технологии в российских условиях определяется рядом факторов, которые нельзя не учитывать в силу особенностей транспортной системы и экономики России. Очевидно, что далеко не все применяемые в странах ЕС контрейлерные технологии эффективно ассимилируются в российских условиях, поэтому авторами предлагается использовать наиболее простой и экономичный способ осуществления PPP с контрейлерами. Данный способ заключается в возможности заезда АТС на платформы под любым углом и с любых направлений, так как предполагается наличие специальной терминальной инфраструктуры: повышенной площадки, находящейся в один уровень с полом вагона, с минимальными зазорами от борта платформы. Согласно введенной классификации этот вид осуществления погрузо-разгрузочных работ относится к классу SH подклассу 4. Его отличительной чертой является выполнение PPP без каких-либо дополнительных технических приспособлений. Они могут выполняться как тягачом автотранспортного предприятия, так и терминальным тягачом или «маневровым», находящимся в собственности владельца терминала. Технологический процесс работы контрейлерного терминала с участием «маневровых» тягачей представлен на рис. 7.

На основе предложенной схемы организации контрейлерных перевозок авторами разработан пилотный проект регулярного контрейлерного сообщения на направлении Екатеринбург — Москва с применением технологии SH-4 согласно

введенной классификации (обоснование использования в российских условиях технологии SH-4 — тема отдельного исследования, которое будет освещено в следующих статьях).

### Пилотный проект «Организация контрейлерных перевозок на маршруте Екатеринбург—Москва»

Для обоснования проекта использован подход авторов [12] для изучения рынка автоперевозок Свердловской области, где работают 25 крупных автоперевозчиков, проанализирована их тарифная политика [13 — 19]. В результате исследования установлено, что автомобильный тариф из Екатеринбурга в западном направлении ниже, чем в обратном, на 20 — 100% (рис. 8), при том что стоимость топлива в Екатеринбурге и Москве различается незначительно [20]. Дизельное топливо в Екатеринбурге дешевле всего на 0,34%, что, по мнению авторов, не может быть объективной причиной такой разницы в тарифах.

Отличительной чертой тарифообразования в автомобильном сообщении является отсутствие жесткой привязки к классу груза (железнодорожный тариф привязан к дальности и тарифному классу груза). Исключение составляют лишь грузы с высокой ценностью, перевозимые с объявленной ценностью, для которых применяются различные повышающие коэффициенты. Также выявлено, что расчет тарифов перевозчиками автотранспорта производится не в соответствии с прейскурантом [21], а на договорной основе.

В отличие от автомобильных перевозок, стоимость транспортировки грузов в контрейлерном сообщении одинакова как в прямом (из Екатеринбурга на запад), так и в обратном направлении. График зависимости стоимости перевозки от дальности при осуществлении контрейлерных перевозок (как отдельно полуприцепов, так и совместно с тягачами) представлен на рис. 9.

Из рис. 9 видно, что перевозка из Екатеринбурга автомобильным транспортом экономически более выгодна, независимо от расстояния. Иная ситуация наблюдается в обратном (на Екатеринбург) направлении (рис. 10).

Рис. 10 показывает, что в направлении на Екатеринбург смена транспортного сценария в пользу контрейлерных пере-

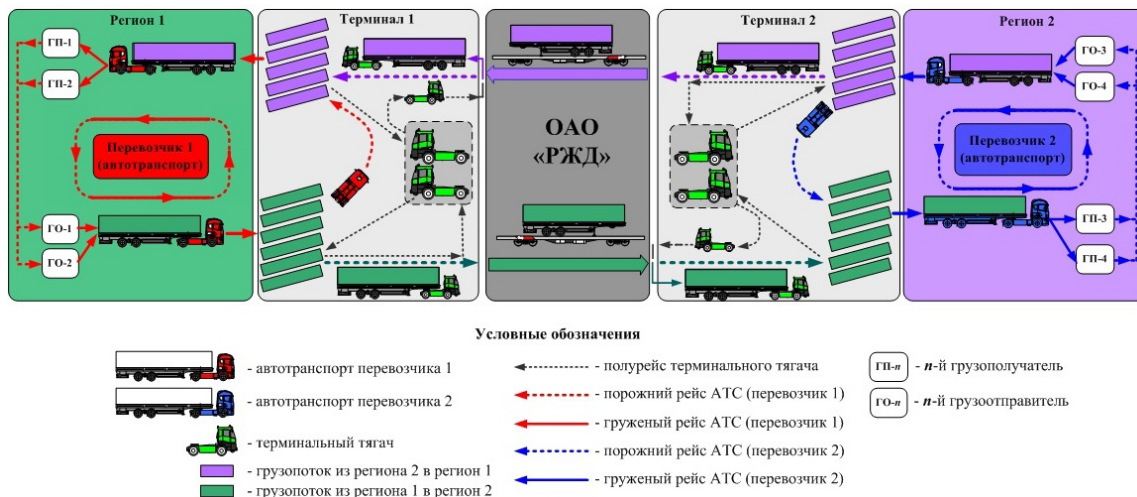
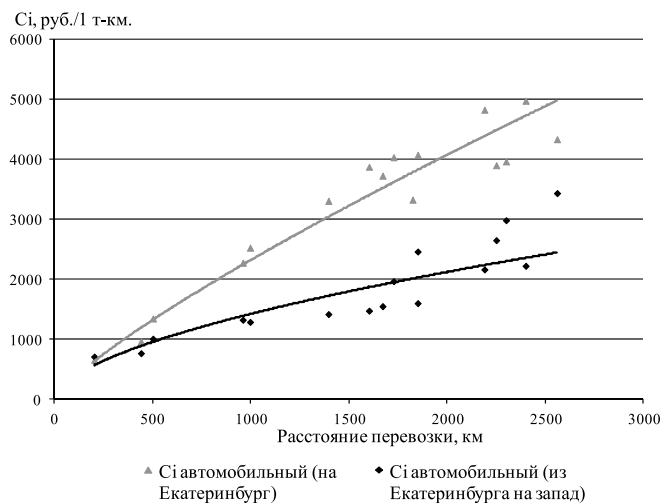
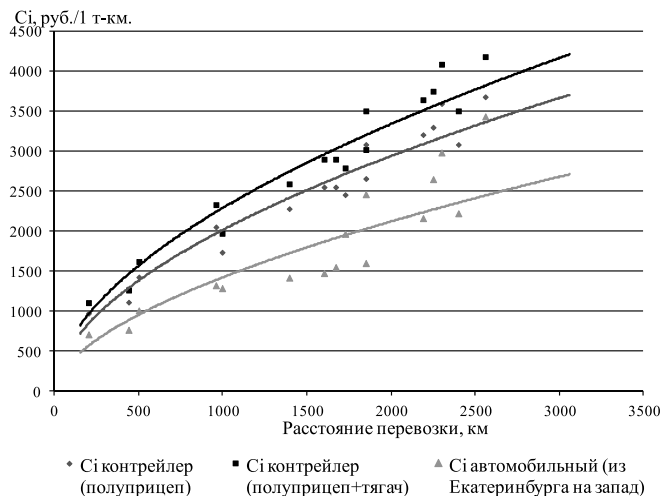


Рисунок 7 — Принципиальная схема организации грузоперевозок с использованием контрейлерных технологий



**Рисунок 8 — Сравнение стоимости автоперевозок из Екатеринбурга на запад и в обратном направлении**

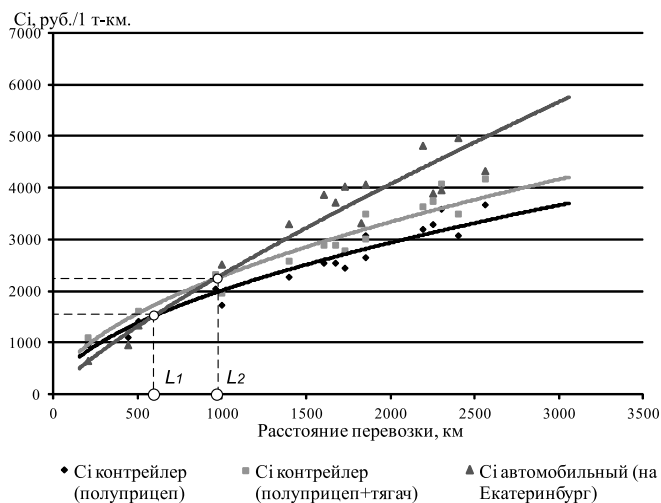


**Рисунок 9 — Сравнение стоимости контейнерной и автоперевозки (из Екатеринбурга на запад)**

возок наблюдается на расстоянии от 600 км при перевозках только полуприцепов, 1000 км — полуприцепов с тягачами. Следовательно, в данном направлении контейнерный способ перевозки конкурентоспособен на 100% и дополнительных мер по регулированию тарифа в сторону уменьшения не требуется.

Таким образом, результаты проведенного авторами исследования указывают на то, что данный транспортный продукт способен составить достойную конкуренцию на рынке и является перспективной точкой роста логистического бизнеса ОАО «РЖД». Контейнерные перевозки для российских железных дорог — относительно новый транспортный продукт, интересный с точки зрения технологий и логистики и востребованный рынком. Предлагаемые в работе мероприятия позволят дополнительно сократить транспортные издержки и укрепить статус ОАО «РЖД» как клиентоориентированной компании.

Контейнерные перевозки на маршруте Екатеринбург — Москва способны заинтересовать грузоотправителей в на-



**Рисунок 10 — Сравнение стоимости контейнерной и автоперевозки (с запада на Екатеринбург)**

правлении из Москвы в Екатеринбург. В обратном направлении организация контейнерных перевозок при действующих тарифных условиях для автоперевозчиков невыгодна. В связи с этим авторы предлагают для данного направления перевозки применять инструменты гибкой клиентоориентированной политики тарифообразования, базирующейся прежде всего на установлении исключительного тарифа. Механизм применения таких тарифов опробован при организации пробных контейнерных перевозок на территории Российской Федерации по маршруту Москва — Хельсинки [22].

Очевидно, что для эффективной ассимиляции контейнерных перевозок в РФ необходим комплексный подход к обеспечению привлекательности данного вида перевозок, который предполагает использование всех имеющихся в распоряжении компании и государства ресурсов. Авторами сформулирован основной набор портфеля инструментов, который позволит укрепить конкурентные преимущества контейнерных перевозок.

1. Гибкая клиентоориентированная тарифная политика, применение обоснованных исключительных тарифов.
2. Предоставление комплексной транспортной услуги (туда-обратно с возможностью доставки по принципу «от двери до двери») на льготных условиях.
3. Разработка эффективной маркетинговой политики, в том числе системы мотивирования клиентов (скидки, акции и т. п.).
4. Разработка и применение всевозможных информационных сервисов, включая организацию заблаговременной продажи платформи-мест в контейнерных поездах (бронирование).
5. Обеспечение государством и администрациями регионов льготных условий следования грузовых автомобилей, участвующих в контейнерной перевозке, по участкам, запрещенным к проезду АТС.

Указанные мероприятия позволят приумножить неоспоримые преимущества и повысить конкурентоспособность контейнерных перевозок, которые способны стать одной из точек роста логистического бизнеса ОАО «РЖД».



## Литература

1. Журавская М.А., Макаренко И.О. Роль и задачи железнодорожного транспорта при организации мультимодальных перевозок (на примере лесных грузов) // Инновационный транспорт. 2012. № 3 (4). С. 47 — 52.
2. Кузнецова Е.Ю., Журавская М.А. Комбинированные перевозки в условиях транспортной интеграции: проблемы терминологии // Транспорт Урала. 2005. № 1 (4). С. 56 — 59.
3. Милославская С.В., Плужников К.И. Мультимодальные и интермодальные перевозки : учеб. пособие. М. : РосКонсульт, 2001. 368 с.
4. Ключко Р. Мимо колеи // Международные автомобильные перевозки. 2012. № 2. С. 54.
5. Портал ОАО «Рухимаш». [Электронный ресурс]. URL: <http://ruzhim.h-ruscortm.ru> (дата обращения: 13.02.13).
6. Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса ОАО «РЖД» / ОАО «РЖД». М., 2012.
7. Портал компании Modalohr. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.modalohr.com> (дата обращения: 13.02.13).
8. Портал компании Cargobeater. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cargobeater.com> (дата обращения: 13.02.13).
9. Портал компании Kockumsindustrier. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kockumsindustrier.se> (дата обращения: 13.02.13).
10. Портал компании Oekombi. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oekombi.at/> (дата обращения: 13.02.13).
11. Портал компании Kombiverkehr. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kombiverkehr.de> (дата обращения: 13.02.13).
12. Журавская М.А., Казаков А.Л., Сафитдинова Д.В. Разработка ценовой стратегии логистического оператора в условиях внедрения терминальной технологии hub-to-hub // Транспорт Урала. 2009. № 4 (23). С. 10 — 13.
13. Сайт «Трансарсенал» — [Электронный ресурс]. URL: <http://www.t-arsenal.ru> (дата обращения: 13.02.2013).
14. Сайт «Транс-Авто». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.transavto.net> (дата обращения: 13.02.13).
15. Сайт «АрмадаЛогистик». [Электронный ресурс]. URL: <http://armadalog.ru> (дата обращения: 13.02.13).
16. Сайт «ДжиЭм Транс». [Электронный ресурс]. URL: <http://gm-trans.ru> (дата обращения: 13.02.13).
17. Сайт ООО «Транзит-96». [Электронный ресурс]. URL: <http://tranzit-96.ru> (дата обращения: 13.02.13).
18. Сайт ТК «Архипелаг». [Электронный ресурс]. URL: <http://arhipelagltd.ru> (дата обращения: 13.02.13).
19. Сайт ТК «Тарго». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.targotrans.ru> (дата обращения: 13.02.13).
20. Информационный портал ТЛК «GALAXY Logistics». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.galaxylogistics.ru> (дата обращения 13.05.13 г.).
21. Прейскурант № 13-01-01. Тарифы на перевозку грузов и другие услуги, выполняемые автомобильным транспортом.
22. Об установлении исключительных тарифов на контейнерные перевозки грузов по маршруту ст. Буловская-эксп. Октябрьской ж.д. — ст. Кунцево 2 Московской ж.д. : приказ Федеральной службы по тарифам от 20 марта 2012 г. № 29-т/1.

## References

1. Zhuravskaya M. A., Makarenko I. O. Rol i zadachi zheleznodorozhnogo transporta pri organizacii multimodalnyx perevozok (na primere lesnyx gruzov) [Aims and objections of railway transport in case of the organization of multimodal transportations (by the example of timber freight)]// Innovacionnyy transport. [Innovative transport] Ekaterinburg, 2012. No.3(4). S.47– 52.
2. Kuznecova E.Yu., Zhuravskaya M. A. Kombinirovannye perevozki v usloviyax transportnoy integracii: problemy terminologii [Combined transportations in the conditions of transport integration: terminology problems] // Transport Urala. [Transport of Ural.] Ekaterinburg. 2005. No. 1(4). S. 56– 59.
3. Miloslavskaya S.V., Pluzhnikov K.I. Multimodalnye i intermodalnye perevozki: Ucheb. posobie. Moskva: RosKonsult, [Multimodal and intermodal transportations: Studies. manual. Moscow: RosKonsult]2001. 368 s.
4. Klochko R. Mimo kolei [Off track] // Mezhdunarodnye avtomobilnye perevozki. [International automobile transport. ]2012. No. 2. S 54.
5. JSC Ruzkhimash portal. URL: <http://ruzhim.h-ruscortm.ru> (date of application: 13.02.2013).
6. Konceptsiya kompleksnogo razvitiya kontejnernogo biznesa ОАО 'RZhD': ОАО 'RZhD', Moskva, [Concept of JSC RZhD container business complex development: JSC RZhD, Moscow] 2012.
7. Modalohr company portal– URL: <http://www.modalohr.com> (date of application: 13.02.2013).
8. Cargobeater company portal – URL: <http://www.cargobeater.com> (date of application: 13.02.2013).
9. Kockumsindustrier company portal – URL: <http://www.kockumsindustrier.se> (date of application: 13.02.2013).
10. Oekombi company portal – URL: <http://www.oekombi.at/> (date of application: 13.02.2013).
11. Kombiverkehr company portal – URL: <http://www.kombiverkehr.de> (date of application: 13.02.2013).
12. Zhuravskaya M. A., Kazakov A.L., Safitdinova D.V. Razrabotka cenovoj strategii logisticheskogo operatora v usloviyax vnedreniya terminalnoj tehnologii 'hub-to-hub' [Development of price strategy of the logistic operator in the conditions of implementation of the terminal 'hub-to-hub' technology]// Transport Urala. [Transport of Ural] Ekaterinburg. 2009. No. 4 (23). S. 10 –13
13. 'Transarsenal' site– URL: <http://www.t-arsenal.ru> (date of application: 13.02.2013).
14. 'Trans-Avto' site – URL: <http://www.transavto.net> (date of application: 13.02.2013).
15. 'ArmadaLogistik' site – URL: <http://armadalog.ru> (date of application: 13.02.2013).
16. 'DzhiEm Trans' site – URL: <http://gm-trans.ru> (date of application: 13.02.2013).
17. 000 'Tranzit-96' site – URL: <http://tranzit-96.ru> (date of application: 13.02.2013).
18. TK 'Arhipelag' site – URL: <http://arhipelagltd.ru> (date of application: 13.02.2013).
19. TK 'Targo' site – URL: <http://www.targotrans.ru> (date of application: 13.02.2013).
20. Informacionnyj portal TLK 'GALAXY Logistics' [Information portal of TLC 'GALAXY Logistics']– URL: <http://www.galaxylogistics.ru> (date of application 13.05.2013);
21. Prejskurant No. 13-01-01. Tarifny na perevozku gruzov i drugie uslugi, vypolnyaemye avtomobilnym transportom. [Price-list No. 13-01-01. Rates for transportation of goods and other services executed by the motor transport. ]
22. Ob ustanovlenii isklyuchitelnyx tarifov na kontrejlernye perevozki gruzov po marshrutu st. Buslovskaya-eksp. Oktyabrskoj zh.d. – st. Kuncevo 2 Moskovskoj zh.d. [On establishment of exceptional rates for piggy-back transportation of goods on a route Buslovskaya-express st. of Oktyabrskaya Railway – Kuntsevo st. of the 2nd Moscow railroad.]: Prikaz Federalnoy sluzhby po tarifam ot 20 marta 2012 g. [The Federal Tariff Service Order dated March 20, 2012.]No. 29-t/1

УДК 656.078

Иван Николаевич Боднар, аспирант кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## ВОПРОСЫ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОПЕРАТОРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Ivan N. Bodnar, postgraduate of Department of 'Stations, connections and cargo operation' of Urals State University of Railway Transport (USURT)

### Questions Of Functioning System Parametrization Of Rolling Stock Operators

#### Аннотация

Рассмотрены вопросы появления и развития компаний-операторов железнодорожного подвижного состава в России. Приведена историческая справка, проанализированы изменения в структуре парка вагонов и их составе за период с 1999 по 2012 г. Выделены проблемы, существующие на рынке операторов подвижного состава.

Сформулированы цели исследования проблемы взаимодействия операторов подвижного состава, перевозчика и грузоотправителей в рамках перевозочного процесса. Выделены управляющие и управляемые параметры системы функционирования операторов подвижного состава, определены критерии эффективности и ограничения, накладываемые на нее.

**Ключевые слова:** оператор подвижного состава, вагон, реформа, грузоотправитель, перевозчик, модель, взаимодействие.

#### Abstract

Questions of appearance and development of rolling stock operating companies in Russia are considered. Historical information is given, changes in structure of operators' car fleet and their composition for the period from 1999 to 2012 are analyzed. Existing problems in the market of rolling stock operators are highlighted. Research objectives of the problem of interaction of rolling stock operators, carriers and consignors within transportation process are formulated. Controlling and controlled parameters of rolling stock operators functioning system are selected, criteria of efficiency and constraints imposed on it are defined.

**Key words:** rolling stock operator; car; reform; consignor; carrier; model; interaction.

На железных дорогах СССР во второй половине XX в. эксплуатировался не только инвентарный подвижной состав (т. е. принадлежавший железнодорожной администрации), но и собственный (приватный), принадлежавший грузоотправителям. Появление таких вагонов обусловлено потребностью грузоотправителя в гарантированном обеспечении погрузки, а выгодой являлась, как правило, высокая маршрутизация перевозок собственных вагонов. Они эксплуатировались на условиях срочного возврата на станцию приписки, т. е. станцию примыкания подъездного пути предприятия, которому принадлежат [1].

Во второй половине 1990-х гг. на российском рынке стали появляться первые операторы подвижного состава (например, ООО «Линк Ойл СПб», ООО «БалтТрансСервис») [2], чтобы обеспечить крупные экспортоориентированные предприятия вагонами в условиях дефицита последних у МПС. Для этих предприятий было характерно следующее:

- ориентация на обслуживание конкретных маршрутов «грузоотправитель — порт» или «грузоотправитель — грузополучатель»;
- как следствие, коэффициент порожнего пробега, стремящийся к 0,5;
- ориентация на специализированный подвижной состав и цистерны (табл. 1) [3] (увеличение числа собственного универсального подвижного состава постепенно произошло в период с 2007 по 2012 г., когда крытые вагоны и полувагоны были выведены из инвентарного парка);
- рыночный характер деятельности, подразумевающий содержание подвижного состава не как способ обеспечения сбыта продукции, несущий убытки, а как самостоятельный вид бизнеса, приносящий прибыль.

В начале 2001 года МПС было издано Положение о порядке создания компаний-операторов на федеральном железнодорожном транспорте [2]. Согласно этому документу, компания могла получить статус оператора, предоставив в министерство бизнес-план, включающий общую характеристику проекта, инвестиционный и финансовый планы, экспертное заключение ВНИИЖТ. В том же году статус операторов получили 23 компании, в 2002 г. их было уже 54, в 2004-м — 85 (порядка 4,5% от общего числа собственников подвижного состава) [2, 3]. Впрочем, в начале 2000-х гг. парк операторов

**Таблица 1 — Структура парка собственных вагонов в Российской Федерации на стадии формирования ОАО «РЖД», тыс. ваг.**

Род вагонов	Год					
	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Крытые	4,1	5,3	6,2	6,7	7,4	8,3
Платформы	6,9	7,0	7,8	8,1	8,8	9,7
Цистерны	95,7	102,1	113,8	130,7	140,3	146,2
Полувагоны	10,8	13,9	16,5	22,1	36,5	52,3
Прочие	43,5	45,3	51,0	54,9	59,3	63,7
Итого	161,0	173,6	195,3	222,5	252,3	280,2

по-прежнему был незначительным в масштабах сети. В 2001 г. операторы владели 5,5 тыс. вагонов (0,69% общего парка или 3,4% частного парка), на 1 мая 2002 г. — 34,7 тыс. вагонов (4,3% общего парка или 20% — частного).

В результате структурной реформы железнодорожного транспорта [4], проведенной в 2000-х гг., в России было создано ОАО «РЖД» и либерализован рынок операторов подвижного состава. ОАО «РЖД», находясь в стопроцентной собственности государства, является единственным владельцем инфраструктуры и перевозчиком (исключение составляет ряд тупиковых железных дорог), однако не обладает нетяговым подвижным составом, кроме вагонов для удовлетворения собственной потребности в перевозках. С другой стороны, на рынке существует более 2400 собственников нетягового подвижного состава. Подвижной состав ОАО «РЖД» был поделен преимущественно между двумя дочерними структурами — ОАО «Первая грузовая компания» (учреждено в 2007 г., на данный момент вышло из состава ОАО «РЖД») и было объединено с ОАО «Независимая транспортная компания») и ОАО «Вторая грузовая компания (учреждено в 2010 г., ныне — ОАО «Федеральная грузовая компания»).

Описанная выше система сделала услугу перевозки фактически двухсторонней и оказалась гораздо сложнее старой, когда перевозчик был единоличным владельцем всего подвижного состава, а сами вагоны представляли собой лишь тару. На сегодня не только операторы оказались в зависимости от перевозчика, но и перевозчик не может без операторов выполнять перевозки. Вместе с тем перевозчик утратил возможность обеспечить публичность договора перевозки в том случае, если подвижной состав не будет обеспечен самим грузоотправителем.

С серьезными проблемами железнодорожная сеть столкнулась летом 2011 г. [5], когда перевозчик не смог обеспечить в полном объеме прием груза к перевозке, а движение поездов было затруднено. Упала участковая скорость, вырос оборот вагона. Представители ОАО «РЖД» среди ключевых причин технологических сбоев называют профицит подвижного состава, его нерациональное использование (повышение порожнего пробега вагонов, в том числе встречного) и увеличение маневровой и сортировочной работы ввиду раздробленного парка [6].

Мерой, принятой для ОАО «РЖД» с целью частичного сохранения обезличенного парка вагонов, стало создание системы агентских договоров в 2010 г. и парка вагонов ВСП (вагоны собственные привлеченные) в 2011 г. Дискуссия о будущем вагонного парка России продолжается.

На данный момент подвижной состав поделен более чем между 2400 собственниками, крупнейшие из которых перечислены в табл. 2 [7]. В течение 2012 г. на рынке усилились консолидационные процессы [6], в результате чего были объ-

единены парки нескольких компаний. Информация о сложившемся к середине 2012 г. рынке представлена на рис. 1.

**Таблица 2 — Крупнейшие операторы подвижного состава**

	Парк, тыс. ваг.		
	на 31.12.09	на 31.12.10	на 31.12.11
ОАО «Первая грузовая компания»	202,686	212,129	159,300
ОАО «Вторая грузовая компания»	0,000	0,690	129,212
ЗАО «НефтеТрансСервис»	19,554	37,265	59,621
GlobalTrans	37,157	50,656	47,524
ЗАО «Русагротранс»	14,274	17,472	30,645
RailGarant	5,829	17,532	30,363
ООО «НТК»	5,047	24,966	27,545
ООО «Трансойл»	12,294	21,611	25,637
ОАО «ТрансКонтейнер»	24,642	24,427	23,830
ООО «Газпром-Транс»	18,799	16,678	23,356
ХК «НовоТранс»	11,626	16,316	16,437
ООО «Транспортно-логистическая компания»	4,996	10,964	14,837
ООО «Фирма Трансгарант»	13,847	14,488	13,708
ООО «МеталлоИнвестТранс»	8,115	8,747	10,484
«Евросиб»	11,172	9,720	11,858
ООО «СибУглеМетТранс»	4,642	7,334	8,640
«ЛУКОЙЛ-Транс»	7,512	7,437	8,016
ЗАО «Мечел-Транс»	3,673	3,767	7,919
ЗАО «СИБУР-Транс»	5,514	7,607	7,697
ООО «ТЭК Евротранс»	3,939	5,206	7,005

Вместе с тем на рынке существует множество собственников с незначительным числом вагонов, и операторов, в распоряжении которых находится до 1000 вагонов, — их принято считать мелкими. В активах 73 крупнейших компаний, включая ОАО «РЖД», сосредоточен 81% всего парка вагонов. Распределение операторов подвижного состава по количеству вагонов в управлении по состоянию на 2012 г. представлено на рис. 2.

Динамику изменения форм собственности на подвижной состав в России можно проследить по табл. 3 [3, 5, 8].

За 15 лет своего существования в российском транспортном лексиконе понятие «оператор железнодорожного подвижного состава» прочно вошло в деловой оборот, однако обозначаемые им субъекты до сих пор мало изучены. Под оператором можно понимать компании, которые используют принципиально разные бизнес-стратегии и по-разному взаимодействуют с другими



**Рисунок 1 — Распределение парка вагонов между собственниками на июль 2012 года**

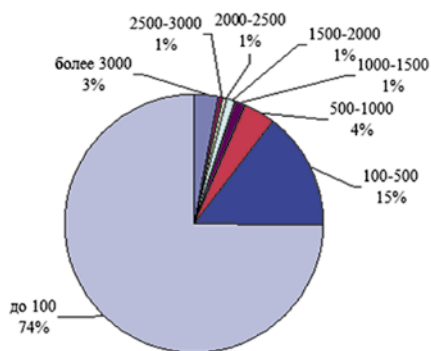


Рисунок 2 — Распределение всех собственников подвижного состава по количеству вагонов в управлении по состоянию на январь 2012 г.

Таблица 3 — Парк грузовых вагонов России, тыс. ваг. \*

Год	Вагоны инвентарного парка	Вагоны дочерних и зависимых обществ ОАО «РЖД»	Вагоны прочих собственников	Общий парк
1988**	≈1724,0	-	176,0	≈1900,0
1999	648,9	-	168,6	817,5
2000	639,9	-	162,8	802,7
2001	639,7	-	161,0	800,7
2002	625,5	-	173,6	798,8
2003	621,3	-	195,3	816,6
2004	634,5	-	222,5	857,0
2005	624,1	-	252,3	876,4
2006	629,7	-	280,2	909,9
2007	568,3	54,4	352,8	975,5
2008	404,2	209,2	390,9	1004,3
2009	339,2	237,1	415,5	991,9
2010	213,8	304,9	508,0	1026,7
2011	71,1	173,1	816,2	1060,7

\* Данные по состоянию на конец года.

\*\* Учитывается парк вагонов СССР.

участниками перевозочного процесса. В связи с этим нет однозначно принятой типологии собственников подвижного состава.

Сформулируем основные проблемы, характерные для рынка подвижного состава:

- отставание нормативно-правовой базы от ситуации на рынке;
- низкая степень изученности схем взаимодействия операторов подвижного состава с другими участниками перевозочного процесса;
- отсутствие системы регулирования универсальным подвижным составом, отвечающей условиям множественности собственников;
- профицит подвижного состава;
- отсутствие обязательств операторов по публичному заключению договоров о предоставлении подвижного состава.

Генеральной целью при решении данного комплекса проблем является определение необходимых мер для создания устойчивого взаимодействия участников перевозочного процесса в условиях множественности операторов нетягового подвижного состава. Для достижения этой цели необходимо решить задачу построения и апробации модели такого взаимодействия.

Устойчивое взаимодействие возможно только в случае баланса интересов всех сторон: ОАО «РЖД», множества операторов и множества грузоотправителей. Поскольку все они

являются хозяйствующими субъектами, их интересы можно выразить экономическими показателями, такими как средняя величина расходов грузоотправителя на перевозку одного вагона, средний доход оператора в сутки от работы одного вагона, общий доход ОАО «РЖД» (так как в структуре его затрат преобладают постоянные расходы, связанные с содержанием инфраструктуры) [9]. Хотя потребность грузоотправителя в перевозке измеряется в тоннах (т. е. для него во многих случаях выгодно использование вагонов большей грузоподъемности), для упрощения представления будем рассматривать потребность грузоотправителя в перевозке некоего числа вагонов

$$\begin{cases} \frac{E(t)}{m} \rightarrow \min, \\ S_o(t) \rightarrow \max, \\ \frac{S_n(t)}{n} \rightarrow \max, \end{cases} \quad (1)$$

где  $E(t)$  — расходы грузоотправителя на перевозку грузов за период  $t$ , руб.;

$S_o(t)$  — доходы оператора за период  $t$ , руб.;

$S_n(t)$  — доходы перевозчика за период  $t$ , руб.;

$m$  — количество вагонов, перевезенных за период времени  $t$ , ваг.;

$n$  — общий вагонный парк оператора, ваг.

При этом

$$\begin{cases} E(t) = f_1(C_{\text{ваг}}^{\text{оп}}(L, z)), \\ S_o(t) = \begin{cases} f_2(E(t)), & \text{если вагоны передаются под конкретную перевозку,} \\ f_3(t, z, n), & \text{если вагоны передаются в долгосрочную аренду,} \end{cases} \\ S_n(t) = F\{E(t); S_o(t)\}. \end{cases} \quad (2)$$

где  $C_{\text{ваг}}^{\text{оп}}$  — цена предоставления вагона оператором грузоотправителю в сутки, руб./ваг.;

$L$  — расстояние между станциями сети, км;

$z$  — параметр, зависящий от класса и рода груза, а также типа подвижного состава;

$n$  — количество вагонов.

Кроме того, для грузоотправителей критически важным является вывоз всего запланированного объема грузов, т. е.

$$\Sigma Q = \Sigma Q_{\text{потреб}} \quad (3)$$

где  $\Sigma Q$  — объем перевезенных грузов, т.;

$\Sigma Q_{\text{потреб}}$  — объем грузов, предъявленных к перевозке, т.

Оператор имеет возможность регулировать размер собственного вагонного парка и цену, по которой он будет предоставлять подвижной состав.

ОАО «РЖД» имеет крайне ограниченную возможность влиять на свою прибыль посредством регулирования цен, поскольку тарифы на перевозку грузов по железнодорожным путям общего пользования устанавливаются государством. Для ОАО «РЖД» характерны значительные постоянные затраты, так что уменьшение расходной части представляется затруднительным. Исходя из этого основным способом роста прибыли для компании является увеличение объемов перевозимых грузов, т. е. максимальное удовлетворение потребности грузоотправителей в перевозке и наилучшее использование пропускных способностей. Однако перевозчик, как и операторы, имеет возможность варьировать стоимость предоставления вагонов под погрузку, если обладает таковыми. Также надо отметить, что перевозчик не имеет действенных и законных инструментов влияния на размер вагонного парка операторов.

Наконец, ограничением на перемещение вагонов по железнодорожной сети является ее наличная пропускная способность. Предположим, что это величина статичная, поскольку ее значительное увеличение в краткосрочной перспективе невозможно.

Таким образом, можно выделить управляющие параметры:

1) трехмерный массив корреспонденции груженых вагонов между начальными и конечными станциями

$$M_{\text{пр}}^{iig} = f(\Sigma Q), \quad (4)$$

где  $I$  — количество станций на сети, открытых для грузовых операций, шт.;

$g$  — количество родов подвижного состава, шт.;

$\Sigma Q$  — объем перевезенных грузов, т;

2) трехмерный массив цен перевозки грузов между станциями сети

$$M^{ij} = f(L, z), \quad (5)$$

где  $j$  — совокупность грузов в соответствии с преysкурantom 10-01;

3) наличная пропускная способность

$$P_{\text{нал}} = f(V_x, I_{\text{ст}}, I_{\text{п}}, Q_{\text{бр}}), \quad (6)$$

где  $V_x$  — скорости хода, км/ч;

$I_{\text{ст}}$  — станционные интервалы, мин;

$I_{\text{п}}$  — межпоездные интервалы, мин;

$Q_{\text{бр}}$  — веса поезда, т.

С другой стороны, управляемыми параметрами являются:

1) цена предоставления вагона оператором грузоотправителю в сутки  $C_{\text{вар}}^{\text{он}}(L, z)$ ;

2) множество независимо управляемых вагонных парков

$$n = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}, \quad (7)$$

где  $n_k$  — количество вагонов в  $k$ -м парке, ваг.;

$k$  — количество собственников подвижного состава, шт.;

3) трехмерный массив корреспонденции порожних вагонов между начальными и конечными станциями  $M_{\text{пор}}^{ii}$ .

Разработанная модель взаимодействия участников перевозочного процесса сможет снизить потери, связанные с избыточным увеличением норм рабочего парка и коэффициента порожнего пробега, а также сократить сроки доставки груза. С точки зрения владельца инфраструктуры и перевозчика, это позволит эффективно использовать имеющиеся пропускные способности железнодорожной сети и планировать их развитие. Операторам подвижного состава модель даст возможность оптимизировать расходы и доходы. Для грузоотправителей это повлечет за собой снижение затрат на перевозку, сокращение сроков доставки грузов и повышение качества транспортного обслуживания.

## Литература

1. Перевозки.Ру — транспортный интернет-портал. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.perevozki.ru/classtable.aspx?classguid=6AA4E93B-FBA2-4c42-8588-331C1B85F86B&objectguid=5f376661-07cf-4fdc-99b9-d93a42e26e7d&NameXSL=card>.
2. Гурьев А.И. Из тупика: история одной реформы. СПб. : РЖД-партнер, 2008. 800 с.
3. Хусаинов Ф.И. Экономические реформы на железнодорожном транспорте : монография. М. : Издательский дом «Наука», 2012. 219 с.
4. О программе структурной реформы на железнодорожном транспорте : Постановление Правительства РФ от 18.05.01 № 384.
5. «Тара управляет рынком». Смиритель // Сообщество профессионалов. 2011. [Электронный ресурс]. URL: <http://жд.рф/posts/4ec7fe9044bba90001000001>. (дата обращения: 25.07.13).
6. Горбунов А., Лебедев В., Сиваков Д. Повезет за наш счет // Эксперт. 2012. 7 мая. № 18 (801).
7. Рейтинг операторов подвижного состава железных дорог России и стран СНГ. М. : ЗАО «Делойт и Туш СНГ», 2012. 26 с.
8. Брегадзе И.В. Обоснование системы экономических взаимоотношений между железными дорогами — филиалами ОАО «Российские железные дороги» и владельцами собственных грузовых вагонов : дис. ... канд. экон. наук / ВНИИЖТ. М., 2005. 165 с.
9. Боднар И.Н. Анализ схем взаимодействия участников перевозочного процесса // Вестник УрГУПС. 2012. № 4 (16). С. 116 — 128.

## References

1. <http://www.perevozki.ru/classtable.aspx?classguid=6AA4E93B-FBA2-4c42-8588-331C1B85F86B&objectguid=5f376661-07cf-4fdc-99b9-d93a42e26e7d&NameXSL=card>
2. Gurev A.I. Iz tupika: istoriya odnoj reformy. [Out of the impasse: history of one reform] Spb.: RZHD-partner, 2008. 800 s.
3. Husainov F.I. Ekonomicheskie reformy na zheleznodorozhnom transporte: monografiya. [Economic reforms on railway transport: monograph.] M.: Izdatelskiy dom Nauka [Science Publishing house], 2012. 219 s.
4. On the program of structural reform on railway transport: The resolution of the Russian Federation Government dated 18.05.2001 No. 384.
5. 'Tara upravlyaet rynkom'. Smirites'. ['Packaging controls the market. Reconcile.']/ Soobshhestvo professionalov. [Community of professionals] 2011. URL: <http://жд.рф/posts/4ec7fe9044bba90001000001>. (date of application: 25.07.2013).
6. Povezet za nash schet [You will be lucky at our expense] / Andrej Gorbunov, Vasilij Lebedev, Dmitriy Sivakov. // Ekspert [Expert]. 2012. may, 07. No. 18 (801)
7. Rejting operatorov podvizhnogo sostava zheleznih dorog Rossii i stran SNG. [Rating of rolling stock operators of Russia and CIS countries railroads] M.: ZAO 'Deloijt i Tush SNG', 2012. 26 s.
8. Bregadze I.V. Obosnovanie sistemy ekonomicheskijh vzaimootnoshenij mezhdz zheleznymi dorogami - filialami OAO 'Rossijskie zheleznje dorogi' i vladelcami sobstvennyh gruzovyh vagonov: dis. ... kand. ekon. nauk [Bregadze I.V. Reasons for system of economic relations between the railroads - branches of JSC 'Russian Railways' and freight cars owners: thesis ... PhD in Economics/ VNIIZhT. M., 2005. 165 s.
9. Bodnar I.N. Analiz sxem vzaimodejstvija uchastnikov perevozochno-go processa [Bodnar I.N. Analysis of diagrams of interaction of participants of transportation process] // Vestnik UrGUPS. [USURT Messenger] 2012. No. 4 (16). S. 116-128.

УДК 656.025.2

Наталья Владимировна Якунина, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета (ОГУ),  
 Ольга Владимировна Кабанова, кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков естественнонаучных и инженерно-технических специальностей Оренбургского государственного университета (ОГУ),  
 Андрей Петрович Фот, доктор технических наук, профессор, главный ученый секретарь Оренбургского государственного университета (ОГУ)

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ОБЩЕСТВЕННЫМ ТРАНСПОРТОМ В ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАНАХ И КОНТРАКТНАЯ ПОЛИТИКА В ПЕРЕВОЗКАХ

Natalia V. Yakunina, PhD in Engineering, Associate Professor of road transport department. SEI HPT "Orenburg State University",  
 Olga V. Kabanova, PhD. in Pedagogical Sciences, Associate Professor of foreign languages of natural science and engineering department, SEI HPT "Orenburg State University",  
 Andrei P. Fot, DSc in Engineering, Professor, Chief Scientific Secretary, SEI HPT "Orenburg State University"

## Analysis Of Passenger Transportation By Public Transport In Foreign Countries And Transportation Contract Policy

### Аннотация

В статье авторы анализируют спрос на общественный транспорт за рубежом, отличия в транспортной политике некоторых ведущих стран мира. Рассматриваются функции органов власти зарубежных стран в организации автобусных перевозок в отсутствие единой регламентации, особенности некоторых форм конкурса, типы заключения контрактов на пассажирские перевозки. Классифицированы типы и формы заключения контрактов в сфере пассажирского общественного транспорта в странах и городах Европы.

**Ключевые слова:** пассажирские перевозки общественным транспортом за рубежом, контрактная политика, конкурс (тендер) на право осуществления перевозок пассажиров.

### Abstract

In this article the authors analyze the demand for public transport abroad, the differences in the transport policies of some of the leading countries of the world. The functions of foreign countries authorities in the organization of bus services in the absence of uniform regulations, especially some forms of tender, the types of contracts for passenger transportation are considered. The types and forms of contracts in the passenger transportation in the countries and cities of Europe are examined and classified.

**Key words:** passenger transportation by public transport abroad, contract policy, tendefor the right of the passenger transportation.

Способы организации общественного пассажирского транспорта (ОПТ) различны не только в разных странах, но и в городах одной страны. Игруют роль многие аспекты: как государственные и местные власти делят регулирующие полномочия на общественном транспорте, каким образом организовано финансирование общественного транспорта, структура компаний-перевозчиков и их собственность, отношения между властями и компаниями-перевозчиками, принципы установления этих отношений и т. д.

Цель данной работы — изучить способы организации обслуживания населения общественным пассажирским транспортом с учетом показателей транспортной подвижности населения и контрактной транспортной политики за рубежом. Основная идея статьи — оценка контрактной транспортной политики, организации перевозок пассажиров общественным транспортом в зарубежных странах, выявление положительных моментов в этих организационных формах с возможностью их применения в России.

Состояние пассажирских перевозок в зарубежных странах за определенный период времени можно рассматривать на основе таких показателей, как количество поездок на общественном транспорте на душу населения, процентное соотношение поездок на общественном транспорте, используемом для рабочих корреспонденций. Количество поездок на общественном транспорте на душу населения в странах Европы и США за период 2005–2010 гг. представлено на рис. 1.

Уровень совершенных поездок общественным транспортом на душу населения в точках экстремума отличается на порядок: 237 поездок ежегодно в Швейцарии и 21 поездка — в США. Ближайшая к США страна по числу поездок на душу населения — Нидерланды (51). Такой результат обусловлен

большой интенсивностью велосипедных перемещений, которые составляют 26% всех поездок.

В Канаде уровень использования общественного транспорта в 2 раза выше, чем в США, вероятно, из-за более удачных принципов регулирования, меньшего количества частных автомобилей, более высоких цен на топливо и большего уровня финансирования систем общественного транспорта [1, 2].

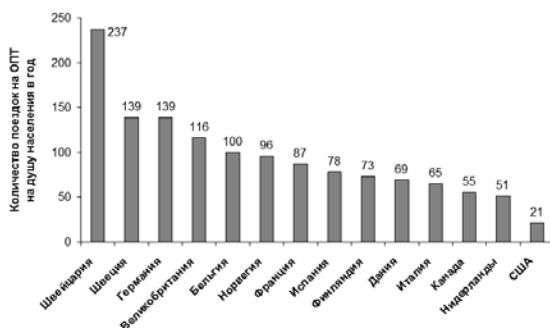


Рисунок 1 — Количество поездок на общественном транспорте в год на душу населения за рубежом в период с 2005 по 2010 г.

В европейских странах доля использования общественного транспорта намного выше, чем в США. Но и в пределах стран Евросоюза есть значительные отличия. Проведенные исследования [3] выявили следующие закономерности. Большой спрос на общественный транспорт в Европе вызван высокой степенью урбанизации, более высокими налогами на топливо и покупку автомобиля, меньшими возможностями автомобильной парковки (и более высокими ценами на них) и большим количеством ограничений на использование автомобилей в городах.

Кроме того, европейские города предлагают услуги общественного транспорта в большем объеме, чем США. Альтернативный индикатор спроса — доля выбора поездок на общественном транспорте. На рис. 2 показано процентное соотношение ОПТ к общему числу поездок за прошедшие три десятилетия (пропущенные столбцы на диаграмме — отсутствие статистических данных).

В Швейцарии самая высокая доля (20%) поездок на общественном транспорте (как и количество поездок на душу населения): примерно в 2 — 3 раза выше, чем в других европейских странах (5 — 11%), и в 10 раз выше, чем в США (2%). Доля выбора общественного транспорта за исследуемый период (1980 — 2010 гг.) во всех странах остается практически постоянной [4].

Незначительный рост этого показателя отмечен в Швейцарии, Германии, Швеции, Норвегии и Великобритании, снижение — во Франции, Дании, Финляндии и Нидерландах. Совокупные национальные статистические данные отражают положение по стране в целом, но в отдельных городах и районах ситуация может быть противоположной. Например, использование общественного транспорта в Лондоне повысилось значительно, но во многих других британских городах, напротив, уменьшилось [5, 6].

На рис. 3 представлено процентное соотношение рабочих корреспонденций, совершаемых на общественном транспорте, к общему количеству поездок. Самый большой рост приоритета общественного транспорта для лиц, работающих в пригородной зоне, — в Германии (от 13% в 1993 г. до 16% в 2008 г.).

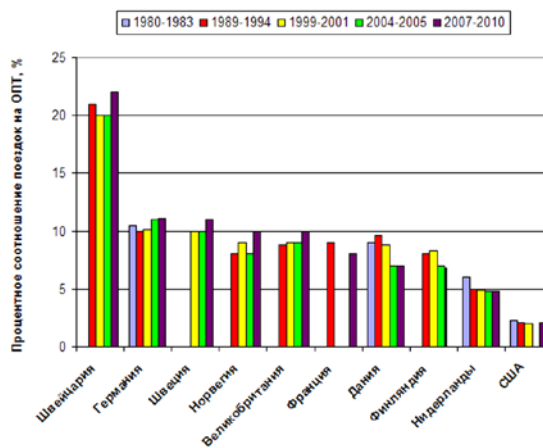


Рисунок 2 — Доля поездок на общественном транспорте (относительно общего числа поездок)

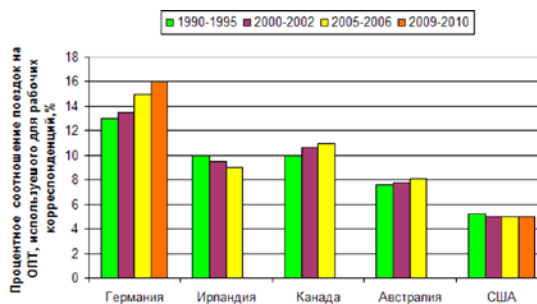


Рисунок 3 — Процентное соотношение поездок на общественном транспорте, используемом для рабочих корреспонденций

Доля поездок в общественном транспорте в США остается стабильной и составляет около 5% от общего числа поездок. Большинство пассажиров общественного транспорта в США либо жители пригородной зоны, работающие в больших городах, либо жители с низким доходом, не имеющие автомобилей.

В настоящее время в Евросоюзе отсутствует единая регламентация в организации перевозок пассажиров общественным транспортом. Но в большинстве стран и городов отмечается главная тенденция — растущее использование контрактного предоставления права перевозок заинтересованным организациям и фирмам и преобладание определенных форм конкурса на присуждение эксплуатационного права перевозчикам. Эти формы часто классифицируются по термину «конкурс на дороге» и «конкурс вне дороги». Организационные формы, существующие сегодня в разных странах, отличаются большим разнообразием, чем предполагаемые упомянутыми двумя категориями конкурсов. Перевозчики могут осуществлять перевозки по своему усмотрению в рамках «конкурса на дороге», властные органы транспортной отрасли, напротив, могут предписывать, какие услуги должны быть осуществлены по «конкурсу вне дороги». Такие рамки значительно варьируются по внедрению: от полностью предписанных расписаний до функционально описанных уровней обслуживания [7].

Успех немецкого общественного транспорта по сравнению с США, на взгляд исследователей [8], основывается на том, что имеется скоординированный пакет взаимоподдерживающей политики, которая включает следующие моменты: более

разнообразное и повышенного качества обслуживание; привлекательная плата за проезд и удобство покупки билетов; полная многомодальная и региональная интеграция; высокие налоги и ограничения на использование автомобилей; политика землепользования, ориентированная на поддержку общественного транспорта [9].

Этими моментами отчасти объясняется, почему общественный транспорт в Германии может конкурировать с частным автомобилем, даже с точки зрения граждан, имеющих большие доходы.

Наибольшее различие между Германией и США состоит в том, что местным и федеральному правительствам в США не удается ограничить использование автомобилей в городах, поднять стоимость за пользование автомобилем и скоординировать политику землепользования в различных штатах. Правительство США субсидирует дороги, их эксплуатацию и парковку. Из-за действий политического автомобильного лобби федеральное правительство США и многие правительства штатов в течение почти 20 лет не могут увеличить налог на бензин, несмотря на большой дефицит в местных и федеральных целевых фондах. Бесплатная автостоянка остается дополнительной льготой. Плата за стоянку не облагается налогом для большинства сотрудников и исключается из сумм, подлежащих обложению подоходным налогом для фирм [10].

С 90-х гг. XX в. во всех странах наметилось усиление роли муниципальных советов в организации и управлении общественным транспортом. В общем виде функции местных органов власти в организации автобусных перевозок сводятся к следующему: комплексная транспортная политика; строительство новых и поддержание в должном состоянии действующих дорог и остановок общественного транспорта; экологический контроль; контроль за организацией и обеспечением безопасности движения; лицензирование фирм и организация концессий маршрутных сетей и отдельных маршрутов; организация контрактации маршрутов и сетей.

Например, в Швеции концессионная форма начала свое развитие более 20 лет назад. Роль муниципалитетов достаточно высока и выражается в создании условий для свободной конкуренции, организации новых транспортных фирм при условии одновременной защиты менее обеспеченных социальных слоев населения.

В США активное участие в создании новых транспортных предприятий принимают крупнейшие компании, производящие автобусы, такие как GM.

В Финляндии более 60% граждан пользуются автобусами, причем в отрасли наиболее распространено сочетание больших и малых транспортных фирм, владеющих одним или несколькими маршрутами.

В Великобритании компании получают от государства подряд на строительство (ремонт) дорог, линий, маршрутов, которые затем передаются в аренду, лизинг или концессию этой же компании, окупающей эксплуатационные затраты платой за проезд. При этом в Лондоне 76% автобусных перевозок осуществляется на контрактной основе, а 24% — без контрактов частными фирмами [11 — 13].

В Италии в 19 регионах и двух автономных провинциях организация перевозок пассажиров общественным транспортом основывается на региональных законах. Для детализации

вопросов, оставленных национальным законодательством открытыми, предлагаются процедуры и критерии отбора перевозчиков, возможность заключать субподрядный договор, установить продолжительность договора и дополнительное его содержание, долю социальных выплат и т. д. В некоторых случаях региональные законы, в отличие от национальных, предполагают дополнительные положения (главным образом в части процедур выбора поставщиков услуг и продолжительности действия контракта), причем конституционный суд оградил национальное регулирование от применения положений, ограничивающих конкуренцию. Продолжительность договоров составляет в среднем 7 лет (минимум — 3 года, максимум — 10 лет) [12, 13].

Типы и формы заключения контрактов в сфере общественного транспорта в разных зарубежных странах и городах, описанные в [6, 9], приведены в табл. 1. Укрупненно их можно разделить на три группы:

- 1) заключение контракта на основе простого конкурса (тендера);
- 2) заключение контракта на основе конкурса (тендера) по многокритериальной процедуре;
- 3) прямая процедура заключения контракта.

К первой группе относится форма заключения контракта (тендера), основанная на одном критерии, например минимальной стоимости проезда. Транспортное управление определяет количество транспорта и социально-политические цели, которые служат для планирования структуры транспортного парка. Транспортный департамент организует тендер и работу по контракту для реализации перевозочных услуг. Используются конкурентоспособные процедуры, операторам предоставляются контракты на большую стоимость. Эта организационная форма существует во многих городах Франции, Великобритании и др. (см. табл. 1).

Ко второй группе относится форма заключения контракта с условиями соблюдения многих требований. Данная форма регулируется требуемыми стандартами обслуживания, определенными властью, которая организует тендер на услуги для всего региона или города. Эта организационная форма чаще использует стимулирующие механизмы для операторов.

К третьей группе относится форма прямого заключения контракта. Она характерна при привлечении муниципалитетом к пассажирским перевозкам собственных транспортных компаний или имеющих долю в них (внутренние операторы). Внутренние операторы или принадлежащие государству широко распространены в сфере городского общественного транспорта в Европе. Однако их юридическая основа может сильно отличаться. Существование операторов, принадлежащих государству, с юридической точки зрения может быть основано на монополии оказания услуг в сфере общественного транспорта, которая предоставляется властью в рамках национального (или регионального) законодательства. С другой стороны, эта форма организации может быть основана на исключительном праве по историческим или другим причинам.

Из табл. 1 следует, что заключение контракта на основе простого конкурса проводится в основном в малых и средних городах Европы. Все финансовые риски по контракту несет перевозчик. В некоторых случаях применяется стимулирование оператора перевозок, их дотирование.



Таблица 1 — *Контрактная транспортная политика в городах Западной Европы*

Город	Численность населения, чел.	Контрактная политика	Размер городской территории			Риски оператора		Дополнительные стимулы
			Малый	Средний	Большой	Доходы	Расходы	
Прага (Чехия)	1 223 400	Прямое присуждение контракта муниципальному оператору			+	+	+	+
Лондон (Великобритания)	Более 8 млн.	Тендерное присуждение контракта			+	+	+	+
Триест (Италия)	205 400	Тендерное присуждение контракта	+				+	
Эльмсхорн (Германия)	49 000	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре	+				+	+
Дижон (Франция)	152 000	Тендерное присуждение контракта	+				+	
Франкфурт (Германия)	680 000	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре		+			+	+
Гифхорн 2 (Германия)	41 600	Тендерное присуждение контракта	+			+	+	+
Харлем (Нидерланды)	147 000	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре	+			+	+	+
Лион (Франция)	480 660	Тендерное присуждение контракта		+		+	+	+
Манчестер (Великобритания)	503 000	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре		+		+	+	+
Овиедо (Испания)	213 700	Тендерное присуждение контракта	+				+	
Хальмстад (Швеция)	58 000	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре	+				+	+
Сондрио (Италия)	21 800	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре	+				+	+
Стокгольм (Швеция)	872 000	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре			+	+	+	+
Инсбрук (Австрия)	127 000	Прямое присуждение контракта муниципальному оператору	+				+	
Варшава (Польша)	1811 000	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре			+	+	+	+
Рим (Италия)	2 761 477	Прямое присуждение контракта муниципальному оператору			+	+	+	+
Виттенберг (Германия)	50 000	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре	+				+	+
Сундсваль (Швеция)	95 000	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре	+				+	+
Амстердам (Нидерланды)	790 000	Прямое присуждение контракта муниципальному оператору			+	+	+	
Барселона (Испания)	1 615 500	Прямое присуждение контракта муниципальному оператору			+	+	+	
Брюссель (Бельгия)	263 200	Прямое присуждение контракта муниципальному оператору		+		+	+	
Будапешт (Венгрия)	1 736 000	Прямое присуждение контракта муниципальному оператору			+	+	+	
Краков (Польша)	760 000	Прямое присуждение контракта муниципальному оператору			+		+	
Лидс (Великобритания)	443 000	Тендерное присуждение контракта по многокритериальной процедуре		+		+	+	+
Гифхорн (Германия)	42 000	Тендерное присуждение контракта	+				+	
Прага (Чехия)	1 242 000	Прямое присуждение контракта муниципальному оператору			+	+	+	

Для конкурсного заключения контракта по многокритериальной процедуре также характерно, что основную долю муниципалитетов, использующих данную форму, составляют малые и средние города.

Прямую процедуру заключения контракта проводят, как правило, в крупных городах Европы.

Важный этап внедрения контрактной системы — обеспечение контроля со стороны заказчика транспортных услуг за соблюдением перевозчиками условий договора на основе создания единой компьютерной сети.

На основе проведенного анализа состояния пассажирских перевозок в зарубежных странах и контрактной политики предоставления права оказания транспортных услуг можно сделать вывод о том, что этот опыт заслуживает подробного изучения для внедрения в России с учетом местных условий.

Вопросы организации и проведения конкурсного отбора рассмотрены в ряде работ авторов [14 — 17], в которых используется конкурсное многокритериальное заключение контракта. Учитываются такие критерии, как состояние транспортного средства, профессионализм, соблюдение правил организации и технологии перевозочного процесса и т. д. В Российской Федерации применяются сходные типы заключения контрактов. В крупных городах (Москва, Санкт-Петербург, Казань, Уфа и т. д.) преобладает прямое заключение контракта.

В средних и малых городах — заключение контракта на конкурсной основе. Однако если в средних и малых городах происходит прямое заключение контракта без участия собственных транспортных предприятий, то возможна коррупционная составляющая.

Внедрение конкурсной системы распределения заказов на перевозки пассажиров общественным транспортом с установленными и обоснованными требованиями обеспечит широкий доступ как муниципальным, так и частным перевозчикам к заключению контрактов на пассажирские перевозки; будет способствовать сокращению дотаций бюджета на покрытие убытков общественного пассажирского транспорта, снижению стоимости проезда в городском транспорте за счет возникновения конкуренции, устранению коррупционной составляющей.

Таким образом, изучены показатели транспортной подвижности населения в зарубежных странах. Исследованы организационные формы заключения контрактов обслуживания населения общественным пассажирским транспортом для городов Западной Европы с учетом контрактной транспортной политики. Выявлены три основные организационные формы заключения контрактов, их распределение по городам в зависимости от численности населения и возможность их применения в России.

## Литература

1. Pucher J. Urban passenger transport in the United States and Europe: A comparative analysis of public policies. Part 1. Travel behavior, urban development and automobile use // *Transport Reviews*. 1995. 15 (2). P. 99 — 117.
2. Pucher J. Urban passenger transport in the United States and Europe: A comparative analysis of public policies. Part 2. Public transport, overall comparisons and recommendations // *Transport Reviews*. 1995. 15 (3). P. 211 — 227.
3. Grant J. Mixed use in theory and practice // *Canadian experience with implementing a planning principle: Journal of the American Planning Association*. 2002. 68 (1). P. 71 — 85.
4. Giuliano G., Dargay J. Car ownership, travel and land use: A comparison of the US and Great Britain // *Transportation Research Part A*. 2005. 40. P. 106 — 124.
5. Buehler R. Promoting public transportation: A comparison of passengers and policies in Germany and the US // *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board of the National Academies of Science*. 2009. 2110. P. 60 — 68.
6. Contracting in urban public transport Amsterdam. 2008. 14 January.
7. Atkins A. Monitoring Local Bus Service Tenders in England — Bus Tendering Good Practice Guide, Department for Transport (DfT). London, 2005.
8. Baron P. Transportation in Germany: A historical overview. *Transportation Research. Part A // Policy and Practice*. 1995. 29 (1). P. 9 — 20.
9. Buchanan C. and Partners, Study of Good Practice in Contracts for Public Passenger Transport — Final Report, Appendix: Guide to Contracts and Contracting in Public Transport, For the European Commission. Brussels, 2003.
10. Bratzel S. Conditions of success in sustainable urban transport policy — policy change in «relatively successful» European cities // *Transport Reviews*. 1999. 19 (2). P. 177 — 190.
11. Алексеева С.Н. Пассажи́рские перевозки. Общественный транспорт: и волки целы, и овцы сыты? // *Автотранспорт: журнал для профессионалов*. 2010. С. 45 — 49.
12. Boitani A., Cambini C. To Bid or Not to Bid, This is the Question: The Italian Experience in Competitive Tendering for Local Bus Services // *European Transport*. 2006. N. 33. P. 41 — 53.
13. Osculati F., Zatti A. Local Public Transport in Italy: The Long and Tortuous Way of a Tentative Reform // *Working paper CIRIEC № 2008/08*. 68 p. ISSN № 2070-8289.
14. Якунин Н.Н., Якунина Н.В. Алгоритм организации конкурсов на перевозки пассажиров автомобильным транспортом по маршрутам регулярных перевозок // *Прогрессивные технологии в транспортных системах : сборник докл. X Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург : ОО «Руссервис», 2011. С. 428 — 433. ISBN 978-5-904627-15-7*.
15. Якунина Н.В. Методика определения структуры показателей, используемых для конкурсного отбора // *Прогрессивные технологии в транспортных системах : сборник докл. X Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург : ОО «Руссервис», 2011. С. 438 — 442. ISBN 978-5-904627-15-7*.
16. Якунина Н.В. Определение весовых коэффициентов показателей конкурсной документации // *Прогрессивные технологии в транспортных системах : сборник докл. X X Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург : ОО «Руссервис», 2011. С. 443 X Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург : ОО «Руссервис», 2011. 448. ISBN 978-5-904627-15-7*.
17. Якунина Н.В. Определение критериев оценки заявок участников конкурсов // *Прогрессивные технологии в транспортных системах : сборник докл. X Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург : ОО «Руссервис», 2011. С. 448 X Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург : ОО «Руссервис», 2011. 453. ISBN 978-5-904627-15-7*.

## References

1. Pucher J. Urban passenger transport in the United States and Europe: A comparative analysis of public policies. Part 1. Travel behavior, urban development and automobile use // *Transport Reviews*. 1995. 15 (2). P. 99 — 117.
2. Pucher J. Urban passenger transport in the United States and Europe: A comparative analysis of public policies. Part 2. Public transport, overall comparisons and recommendations // *Transport Reviews*. 1995. 15 (3). P. 211 — 227.
3. Grant J. Mixed use in theory and practice // *Canadian experience with implementing a planning principle: Journal of the American Planning Association*. 2002. 68 (1). P. 71 — 85.
4. Giuliano G., Dargay J. Car ownership, travel and land use: A comparison of the US and Great Britain // *Transportation Research Part A*. 2005. 40. P. 106 — 124.
5. Buehler R. Promoting public transportation: A comparison of passengers and policies in Germany and the US // *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board of the National Academies of Science*. 2009. 2110. P. 60 — 68.
6. Contracting in urban public transport Amsterdam. 2008. 14 January.
7. Atkins A. Monitoring Local Bus Service Tenders in England — Bus Tendering Good Practice Guide, Department for Transport (DfT). London, 2005.
8. Baron P. Transportation in Germany: A historical overview. *Transportation Research. Part A // Policy and Practice*. 1995. 29 (1). P. 9 — 20.
9. Buchanan C. and Partners, Study of Good Practice in Contracts for Public Passenger Transport — Final Report, Appendix: Guide to Contracts and Contracting in Public Transport, For the European Commission. Brussels, 2003.
10. Bratzel S. Conditions of success in sustainable urban transport policy — policy change in «relatively successful» European cities // *Transport Reviews*. 1999. 19 (2). P. 177 — 190.
11. Alekseeva S.N. Passazhirskie perezovozki. Obshestvennyi transport: i volki tseli, i ovtsisiti? [Passenger Transportation. Public Transportation: How to Please Both Parties?] // *Avtoperevozchik: zhurnal dlya professionalov*. 2010. p.45-49.
12. Boitani A., Cambini C. To Bid or Not to Bid, This is the Question: The Italian Experience in Competitive Tendering for Local Bus Services // *European Transport*. 2006. N. 33. P. 41 — 53.
13. Osculati F., Zatti A. Local Public Transport in Italy: The Long and Tortuous Way of a Tentative Reform // *Working paper CIRIEC № 2008/08*. 68 p. ISSN № 2070-8289.
14. Yakunin N.N. Algoritm organizatsii konkursov na perezovzki passazhirovo avtomobilnim transportom po marshrutam regulyarnikh perezovok [The Algorithm of Tender Organizing for the Passenger Transportation by Road Transport on Regular Transportation Routes] / Yakunin N.N., Yakunina N.V. / *Progressivniye tekhnologii v transportnikh sistemakh: Sbornik dokladov X Mezhdynarodnoy naychno-prakticheskoy konferentsii [Advanced Technologies in Transportation Systems: book of reports of the X International Scientific and Practical Conference] Orenburg, LLC "Russervis", 2011.- p. 428-433. ISBN 978-5-904627-15-7*
15. Yakunina N.V. Metodika opredeleniya struktury pokazateley, ispolzue-mikh dlya konkursnogo otbora [Methods of the Indicators Structure Determining Used for the Tender Selection] // *Progressivniye tekhnologii v transportnikh sistemakh: Sbornik dokladov X Mezhdynarodnoy naychno-prakticheskoy konferentsii [Advanced Technologies in Transportation Systems: book of reports of the X International Scientific and Practical Conference] Orenburg, LLC "Russervis", 2011, p. 438-442. ISBN 978-5-904627-15-7*
16. Yakunina N.V. Opredelenie vesovikh koeffitsientov pokazateley konkursnoy dokumentatsii [Determination of Importance Coefficient Indicators of Tender Documentation] // *Progressivniye tekhnologii v transportnikh sistemakh: Sbornik dokladov X Mezhdynarodnoy naychno-prakticheskoy konferentsii [Advanced Technologies in Transportation Systems: book of reports of the X International Scientific and Practical Conference] Orenburg, LLC "Russervis", 2011, p. 443-448. ISBN 978-5-904627-15-7*
17. Yakunina N.V. Opredeleniye kriteriev otsenki zayavok uchastnikov konkursov [Defining Criteria for Applications Evaluating of Tender Participants] // *Progressivniye tekhnologii v transportnikh sistemakh: Sbornik dokladov X Mezhdynarodnoy naychno-prakticheskoy konferentsii [Advanced Technologies in Transportation Systems: book of reports of the X International Scientific and Practical Conference] Orenburg, LLC "Russervis", 2011, p. 448-453. ISBN 978-5-904627-15-7*

УДК 656.078.1

**Евгений Валентинович Синицын**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой финансового менеджмента Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург

**Сергей Викторович Вихарев**, кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора ООО «Брейнкрафт»

**Дмитрий Алексеевич Брусянин**, кандидат технических наук, начальник НИЧ Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКОВ НА ДОЛГОСРОЧНОМ УРОВНЕ

Evgeniy V. Sinitsin, DSc, professor, head of "Finance management" department, UrFU.

Sergey V. Vikharev, PhD, deputy director of LLC "Braincraft".

Dmitry A. Brusyanin, PhD, head of USURT research center

## Economic-Mathematical Model Of Traffic Flow Forecasting For Long-Range Prediction

### Аннотация

В настоящей работе исследуются подходы к прогнозированию объемов пассажирских перевозок в годовом разрезе с горизонтом прогнозирования до пяти лет. Обсуждаются факторы, которые могут быть использованы для построения регрессионной модели. Проводится исключение взаимозависимых факторов. Выбор делается в пользу факторов, по которым прогнозируются значения уполномоченными государственными органами.

**Ключевые слова:** долгосрочное прогнозирование, пассажиропотоки, экономико-математическое моделирование.

### Abstract

In this paper the authors investigate the approaches to the prediction of passenger traffic on annual basis, with a time horizon of up to five years. Research factors that may be used to construct a regression model are discussed. Exemption of dependent factors is made. The choice is made in favor of the factors which are predicted by the authorities.

**Key words:** long-term forecasting, passenger traffic, economic - mathematical modeling.

### Актуальность задачи

**П**рограммы социально-экономического развития, в частности «Стратегия социально-экономического развития Свердловской области на период до 2020 года» (в дальнейшем — Стратегия), предусматривают дальнейшее развитие экономики региона, невозможное без совершенствования транспортной системы.

Вместе с тем в Стратегии отмечено, что недостаточные темпы развития транспортной инфраструктуры являются слабой стороной Свердловской области. В частности, «...по показателям транспортной инфраструктуры и эффективности ее использования Свердловская область существенно отстает от других субъектов РФ и занимает 30 — 50 места. При этом темпы экономического развития области опережают темпы развития транспортной инфраструктуры, состояние которой становится тормозом развития промышленности Свердловской области»<sup>1</sup>.

Необходимо принимать во внимание и то, что проблемы с пассажироперевозками и перевозками грузов могут стать источником социальной напряженности и затруднить или сделать невозможным решение предусмотренных задач в сфере социально-экономического развития. В связи с этим актуальной является задача взаимной балансировки целей в сфере экономического, социального, культурного развития, наращивания человеческого капитала и задач в области развития транспортной инфраструктуры. Именно прогнозирование пассажиропотоков, определяющее спрос на транспортные услуги, должно дать необходимую исходную информацию для определения целей и задач развития транспортной инфраструктуры.

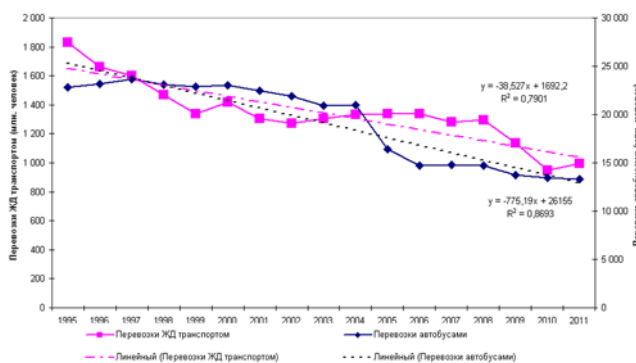
Все сказанное выше обуславливает актуальность разработки подходов к прогнозированию пассажиропотоков для

1 Цитируется по тексту документа «Стратегия социально-экономического развития Свердловской области на период до 2020 года».

решения как транспортных, так и социально-экономических задач развития Свердловской области.

### Постановка задачи прогнозирования

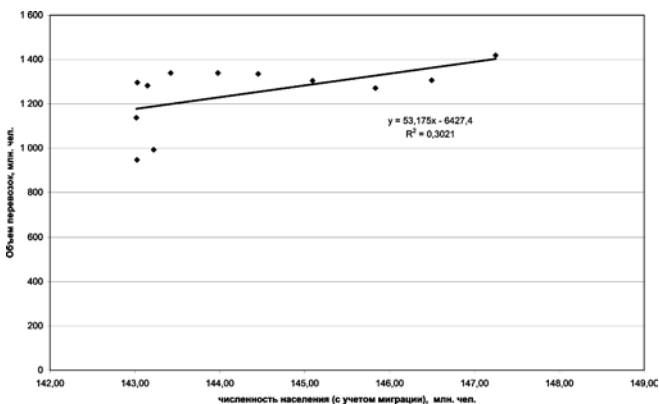
1. Прогнозирование должно осуществляться на долгосрочном уровне: на несколько лет вперед с временной единицей прогноза — год.
2. При прогнозировании должны учитываться макроэкономические факторы, характеризующие долгосрочные тенденции развития, при этом масштабные экономические и социальные проекты (создание новых производств, инфраструктурных объектов и т. д.) оказывают влияние на объем перевозок через изменение макроэкономических факторов.



**Рисунок 1 — Тенденции изменения объемов перевозок железнодорожным транспортом и автобусами (Российская Федерация)**

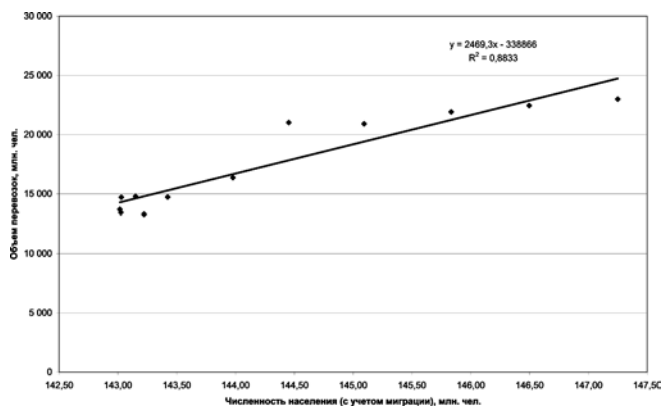
Для выявления факторов, влияющих на объем перевозок пассажиров автобусами и железнодорожным транспортом, рассмотрим все потенциальные факторы отдельно [3 — 5].

Изменение объемов перевозок пассажиров в зависимости от численности населения представлено на рис. 2 и 3.



**Рисунок 2 — Зависимость объемов перевозок пассажиров железнодорожным транспортом от численности постоянного (в среднем за год) населения РФ**

Как видно из рис. 2 и 3, объем пассажироперевозок может быть приближенно описан линейной функцией численности, однако в случае перевозок автобусами коэффициент детерминированности такой линейной модели существенно выше.



**Рисунок 3 — Зависимость объемов перевозок пассажиров автобусами от численности постоянного (в среднем за год) населения РФ**

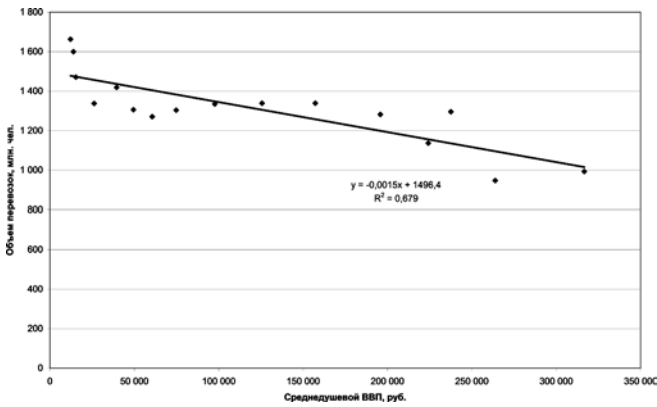
Валовой внутренний (региональный) продукт (в дальнейшем — ВВП/ВРП) является основным макроэкономическим показателем, задаваемым стратегическими концепциями и планами социально-экономического развития как на федеральном, так и на региональном уровне. В связи с этим представляет интерес зависимость объемов перевозок пассажиров транспортом общего пользования от данного показателя. Это позволит, отталкиваясь от запланированных значений ВВП (ВРП), проводить оценку ожидаемого объема пассажироперевозок. Графики соответствующих зависимостей для железнодорожного транспорта и автобусных перевозок представлены на рис. 4 и 5. Как видно и в этом случае, линейная модель имеет более высокий коэффициент детерминированности для автобусных перевозок, хотя и для железнодорожного транспорта коэффициент детерминированности линейной аппроксимации достаточно высок.

Следует обратить внимание на то, что с увеличением ВВП на душу населения объем перевозок пассажиров транспортом общего пользования уменьшается, причем для автобусных перевозок этот эффект существенно больше, чем для железнодорожных. Скорее всего, это является отражением возрастающей роли альтернативных вариантов перевозок (например, собственным автотранспортом) по мере увеличения среднедушевого ВВП, отражающего в определенной мере уровень благосостояния.

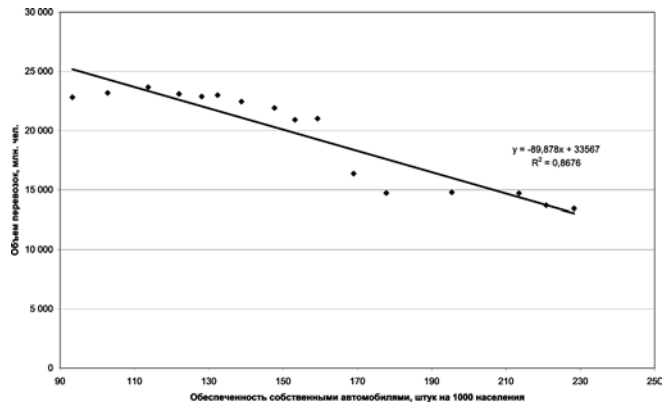
На рис. 6 и 7 представлены зависимости объемов перевозок транспортом общего пользования (автобусами и железнодорожным транспортом) от показателя обеспеченности населения собственными автомобилями.

Как видно из рис. 6 и 7, в каждом из рассмотренных случаев линейная модель имеет высокий коэффициент детерминированности, причем для автобусных перевозок он выше, чем для железнодорожных.

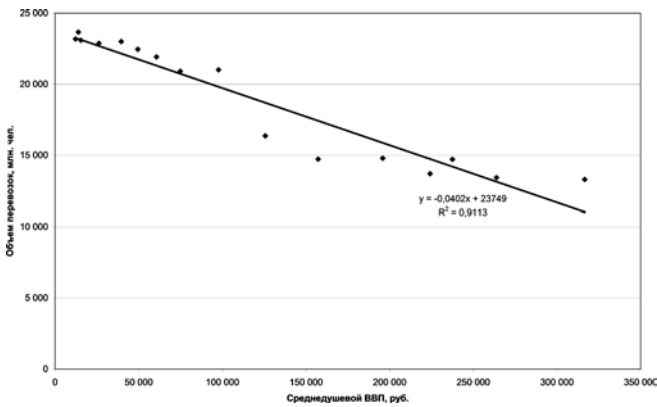
На объем перевозок пассажиров должен оказывать влияние и среднедушевой доход, определяющий возможность наличия у потенциального пассажира денежных средств, для того чтобы воспользоваться транспортными услугами. При этом естественно предположить, что на решение потенциального пассажира пользоваться услугами транспорта (или альтернативными возможностями перевозок) оказывает влияние уже достигнутый им уровень дохода. В связи с этим на рис. 8



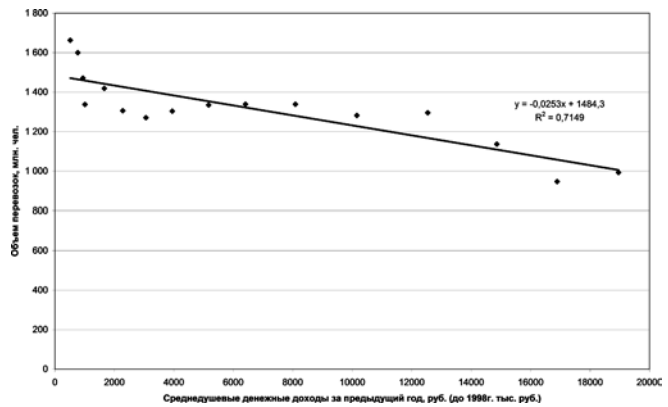
**Рисунок 4** — Зависимость объема перевозок пассажиров железнодорожным транспортом от ВВП на душу населения в РФ (ВВП в текущих ценах)



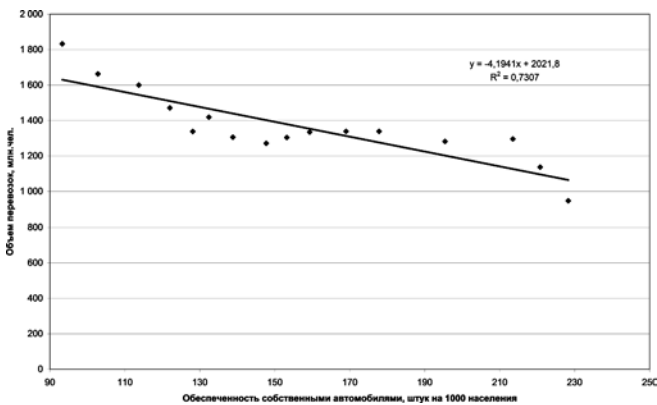
**Рисунок 7** — Зависимость объема перевозок пассажиров автобусами от обеспеченности населения собственными автомобилями



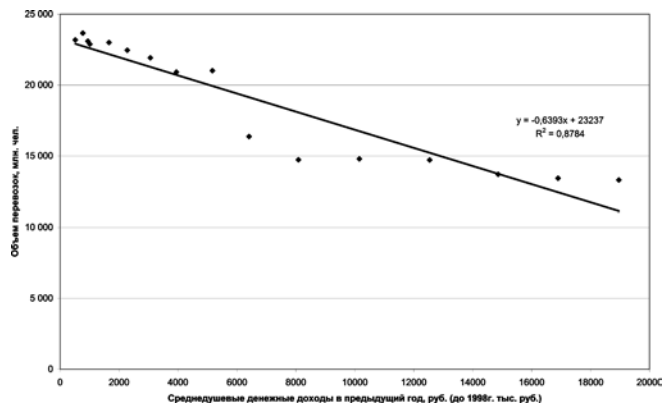
**Рисунок 5** — Зависимость объема перевозок пассажиров автобусами от ВВП на душу населения в РФ (ВВП в текущих ценах)



**Рисунок 8** — Зависимость объема перевозок железнодорожным транспортом от среднедушевого дохода за предшествующий год



**Рисунок 6** — Зависимость объема перевозок пассажиров железнодорожным транспортом от обеспеченности населения собственными автомобилями



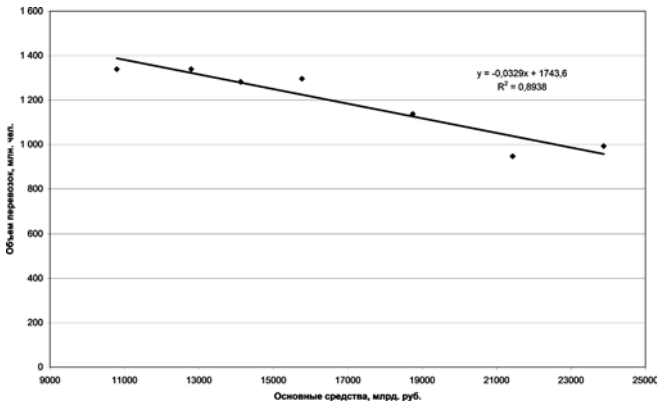
**Рисунок 9** — Зависимость объема перевозок железнодорожным транспортом от среднедушевого дохода за предшествующий год

и 9 представлена зависимость объемов перевозок от среднедушевого дохода предыдущего года.

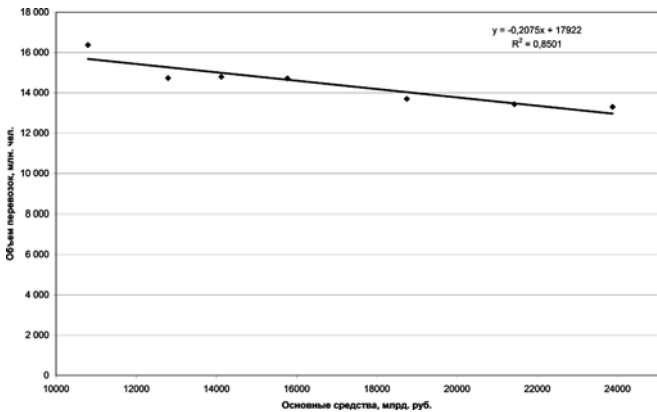
Как видно из рис. 8 и 9, и в этом случае анализируемые зависимости могут быть представлены линейной моделью с достаточно высокими коэффициентами детерминированности, причем для перевозок автобусным транспортом коэффициент детерминированности выше.

Объем основных средств, которыми располагают предприятия, находящиеся на исследуемой территории, — еще один параметр, который может оказывать влияние на объем перевозок пассажиров. С одной стороны, чем выше объем основных средств, тем более вероятен приток рабочей силы на анализируемую территорию, что может вызвать дополнительную потребность в перевозках. С другой стороны, увеличение объемов основных средств является признаком экономического

роста, увеличивающего среднедушевые доходы населения и соответственно снижающего потребность в перевозках транспортом общего пользования.



**Рисунок 10** — Объем железнодорожных перевозок в зависимости от объема основных средств



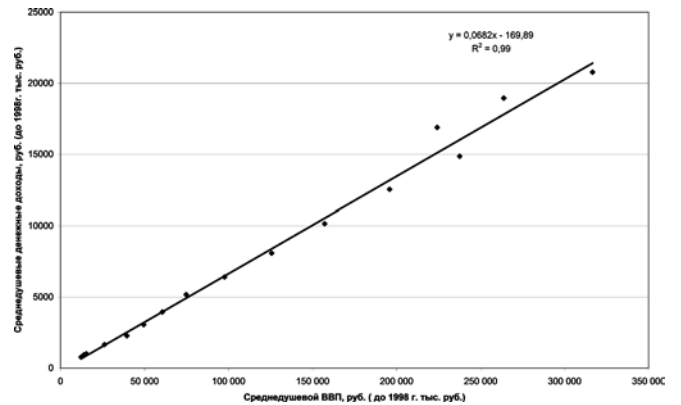
**Рисунок 11** — Объем перевозок автобусами в зависимости от объема основных средств

Рис. 10 и 11 показывают, что вторая тенденция превалирует, причем линейная модель имеет высокий коэффициент детерминированности.

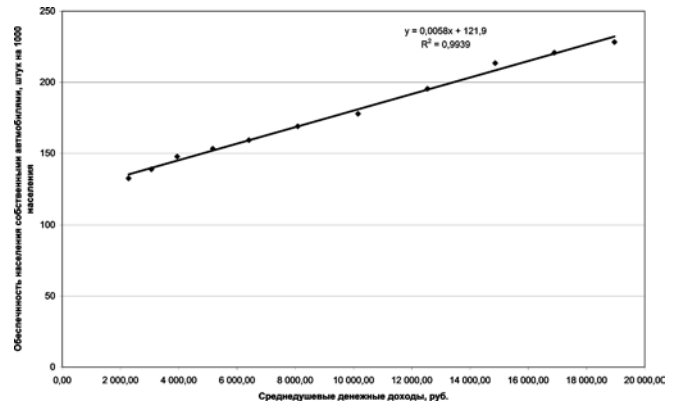
**Отбор переменных и описание модели**

Не все переменные, описанные выше, могут оказаться независимыми. Для исключения эффекта мультиколлинеарности [1, 2] был проведен анализ взаимозависимости различных факторов. Результаты, представленные на рис. 12 — 14, показывают, что такие факторы, как среднедушевые денежные доходы, обеспеченность населения собственными автомобилями, валовой внутренний продукт на душу населения, основные средства, практически являются линейно зависимыми. Соответственно из этой группы будет сохранен фактор среднедушевых денежных доходов, поскольку сбор информации о нем является наиболее простым и оперативным по сравнению с остальными перечисленными параметрами.

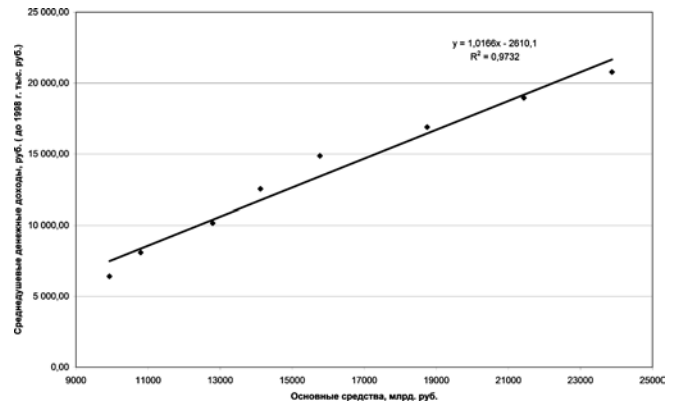
Таким образом, для прогнозирования объемов перевозок пассажиров железнодорожным и автобусным транспортом общего пользования будет использована многомерная линейная регрессионная модель вида



**Рисунок 12** — Среднедушевые денежные доходы в зависимости от среднедушевого ВВП



**Рисунок 13** — Обеспеченность населения собственными автомобилями в зависимости от среднедушевых денежных доходов



**Рисунок 14** — Среднедушевые денежные доходы в зависимости от объема основных средств

$$Y^i(t+1) = \beta_0^i + \beta_1^i \cdot X_1^i(t+1) + \beta_2^i \cdot X_2^i(t+1) + \beta_3^i \cdot X_3^i(t), \quad (1)$$

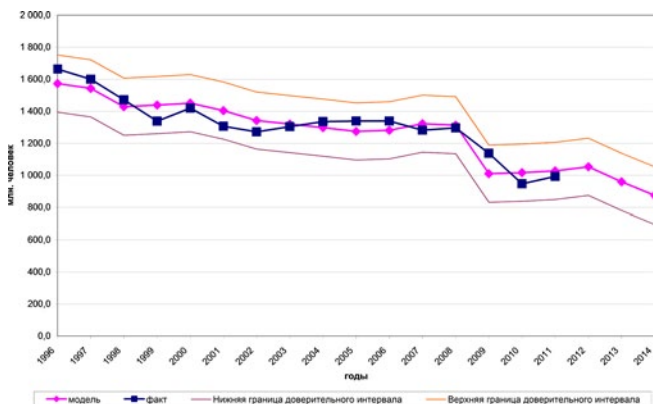
где  $i = 1$  для железнодорожных и  $i = 0$  для автобусных перевозок пассажиров;  
 $X_1$  — численность постоянного населения в среднем за год, млн чел.;

$X_2$  — ВВП в постоянных ценах 2008 г., млрд руб.;  
 $X_3$  — среднедушевой доход (как уже отмечалось выше, используется значение показателя в год, предшествующий прогнозируемому), руб.;  
 $t$  — год, для которого рассматривается значение;  
 $Y(t+1)$  — значение прогнозируемого объема за год  $(t+1)$ , млн. чел.

Используя данные<sup>2</sup> по переменным  $X_1, X_2, X_3$  для 1996 — 2011 гг. (именно для этого периода имеются все необходимые для анализа данные), получаем, что перевозки пассажиров железнодорожным транспортом хорошо описываются многомерной регрессионной моделью вида

$$Y(t) = -0,0511 \cdot X_3(t-1) + 0,0589 \cdot X_2(t) + 143,308 \cdot X_1(t) - 20933,793, \text{ млн чел.} \quad (2)$$

Сопоставление модели с фактическими данными представлено на рис. 15.



**Рисунок 15** — Сравнение данных модели (2) и фактических данных по перевозкам пассажиров железнодорожным транспортом в РФ, нижняя и верхняя границы доверительного интервала<sup>3</sup> модели (2) с уровнем значимости 95%

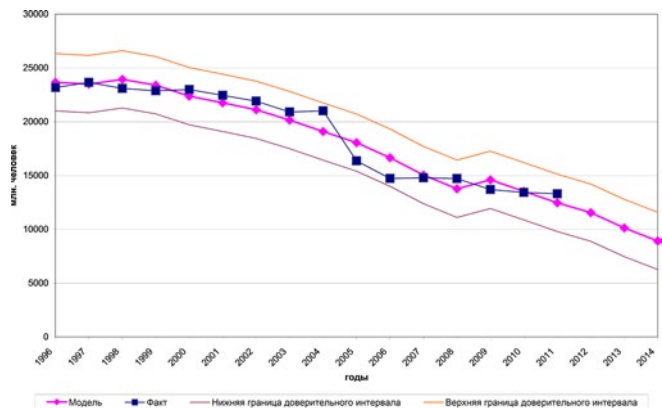
Коэффициент детерминированности модели  $R^2 = 0,86$ . Проверка по тесту Дербина — Уотсона указывает на отсутствие серийной корреляции с вероятностью 99%. Проверка на основании  $t$ -статистики указывает на значимость каждого из факторов  $X_1, X_2, X_3$ , включенных в модель с уровнем значимости не менее 95 %.

Аналогичный расчет для перевозок пассажиров автобусами после исключения факторов, оказавшихся незначимыми, по тестированию на основании  $t$ -статистики приводит к следующей модели:

$$Y(t) = -0,192 \cdot X_3(t-1) - 0,395 \cdot X_2(t) + 32505,333, \text{ млн чел.} \quad (3)$$

Коэффициент детерминированности модели  $R^2 = 0,94$ . Проверка по тесту Дербина — Уотсона указывает на отсутствие серийной корреляции с вероятностью 99%.

Сопоставление модели с фактическими данными представлено на рис. 16.



**Рисунок 16** — Сравнение данных модели (3) и фактических данных по перевозкам пассажиров автобусами в РФ, нижняя и верхняя границы доверительного интервала модели (3) с уровнем значимости 95%

Разумеется, данные по Российской Федерации были использованы, во-первых, для иллюстрации предлагаемой модели и определения факторов, на которых ее можно основывать, а во-вторых, ввиду отсутствия в настоящее время необходимой информации по Свердловской области. Вместе с тем достоинством предлагаемых факторов является то, что они допускают декомпозицию до любого регионального уровня (субъект Федерации, городской округ, муниципальное образование).

Прогнозирование объемов перевозок пассажиров на уровне РФ и Свердловской области осуществляется на основе предложенных моделей (2) и (3). При этом используются значения параметров  $X_1, X_2, X_3$  для РФ или Свердловской области соответственно. Следует отметить, что значения параметров моделей (2) и (3) подлежат уточнению после сбора информации о перевозках.

На рис. 15, 16 представлены также значения, предлагаемые моделью для 2012 г. (фактические данные для этого года на момент написания работы отсутствовали) и прогнозируемые значения на 2013 и 2014 гг. Для прогнозирования использовались демографические прогнозы изменения численности населения на период до 2030 г., представленные на сайте [www.gks.ru](http://www.gks.ru). Среднедушевые доходы были определены с помощью экстраполяции имеющихся данных для 1996 — 2011 гг. с использованием полиномов не выше второй степени. Для прогнозирования ВВП (в постоянных ценах 2008 г.) были использованы имеющиеся поквартальные данные с I квартала 2003 г. по I квартал 2013 г. и модель, выделяющая хорошо заметные трендовую и сезонную компоненты<sup>4</sup>. Сопоставление данных этой модели, используемой для прогнозирования ВВП, с фактическими данными приведено на рис. 17. Там же представлены данные по прогнозируемому ВВП, использованные для построения прогнозов перевозок пассажиров (см. рис. 15 и 16).

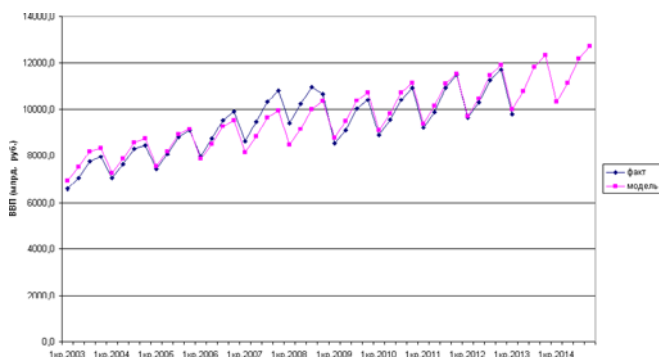
### Заключение

Предложенные модели позволят решить задачи прогнозирования объемов перевозок пассажиров транспортом

<sup>2</sup> Источник данных — сайт Росстата [www.gks.ru](http://www.gks.ru).

<sup>3</sup> Интервал, в который прогнозируемое значение попадает с вероятностью 95%.

<sup>4</sup> Более детальное обсуждение модели прогнозирования ВВП и полученных результатов не входило в задачи данной работы.



**Рисунок 17** — Сопоставление фактических данных для ВВП (в постоянных ценах 2008 г.) и предложенной модели с выделением трендовой и сезонной компонент

общего пользования на долгосрочном уровне. При этом начать ее применение, по крайней мере в долгосрочной годовой перспективе, можно с текущего момента, основываясь

на моделях (2) и (3) и проводя декомпозицию данных для Свердловской области, полученных с помощью этих моделей, до уровня отдельных территорий (транспортных округов). Основой такой декомпозиции может служить информация о текущих объемах перевозок в соответствии с предлагаемой схемой организации маршрутной сети. Это позволит определить устоявшиеся пропорции распределения общего объема перевозок пассажиров по Свердловской области по отдельным маршрутам внутри выделенных транспортных округов и между округами и провести распределение (декомпозицию) спрогнозированного объема перевозок по представляющим интерес направлениям.

Вместе с тем актуальной остается задача построения полноценной методики прогнозирования на различных временных горизонтах — от долгосрочного до оперативного. Требуется детальное описание методики декомпозиции данных для получения прогноза объемов пассажироперевозок на уровне отдельных территорий и даже маршрутов. Все это является темой дальнейших исследований.

## Литература

1. Джон Э. Ханк, Дин У. Уичерн, Артур Дж. Райтс. Бизнес-прогнозирование. М.: Вильямс, 2003.
2. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / под ред. А.В. Гасникова. М.: МФТИ, 2010.
3. 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. С. 50 — 64. ISSN 2079-0392.
4. Сай В.М., Сизый С.В., Вихарев С.В., Варанкина К.А. Организация содержания транспортной инфраструктуры в сетях с разделенными интересами с применением математической теории автоматов // Вестник УрГУПС. 2011. № 3. С. 42 — 53. ISSN 2079-0392.
5. Интеллектуальная система мониторинга пассажиропотока транспортного комплекса региона / Д.А. Брусянин, С.В. Вихарев, В.Ю. Попов, А.А. Горбенко, А.С. Шека // Инновационный транспорт. 2012. № 2. С. 41 — 43.

## References

1. John E. Hanke, Dean W. Wichern, Arthur G. Reitsch. Business forecasting [Business forecasting]. M.: Williams, 2003.
2. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov pod redaktsiyey A. V. Gasnikova [Introduction into mathematical simulation of traffic flows edited by A.V. Gasnikova], M.: MFTI, 2010.
3. Brusyanin D. A., Say V. M., Vikharev S. V. Obosnovanie transportnykh sredstv na marshrutnoi seti regulyarnykh avtomobilnykh i zheleznodorozhnykh passazhirskikh perevozok [Justification of vehicles on the route network of regular road and rail passenger transport] // Vestnik UrGUPS. 2013. № 1. S. 50–64. ISSN 2079-0392.
4. V. M. Say, S. V. Siziyy, S. V. Vikharev, K. A. Varankina. Organizatsiya sodержaniya transportnoy infrastruktury v setyakh s razdelennymi interesami s primeneniem matematicheskoy teorii avtomatov [Railway infrastructure maintenance in the networks of separated interests] // Vestnik UrGUPS. 2011. № 3. S. 42–53. ISSN 2079-0392.
5. Intellektualnaya sistema monitoringa passazhiropotoka transportnogo kompleksa regiona [Intelligent system of traffic flow monitoring of region's transport complex] / D. A. Brusyanin, S. V. Vikharev, V. Yu. Popov, A. A. Gorbenko, A. S. Sheka // Innovatsionny transport. 2012. № 2. S. 41–43.



УДК 621.335.2

Владимир Андреевич Усов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

Анна Андреевна Калинина, ассистент кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС), Санкт-Петербург

## О ПРОЦЕССЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С РЕЛЬСАМИ

Vladimir A. Usov, PhD, associate professor, "Electric traction" department, USURT, Ekaterinburg,

Anna A. Kalinina, assistant, "Electric traction" department, PSTU, St. Petersburg

## On The Restoration Process Of Wheel-Rail Coupling

### Аннотация

В статье показано, что обратной ветви характеристики сцепления тяговых колес с рельсами не существует, а процесс ликвидации боксования идет по той же характеристике сцепления, по которой идет и процесс развития боксования. Характер процесса затухания боксования, как и развития, определяется в основном соотношением сил тяги и сцепления.

### Ключевые слова:

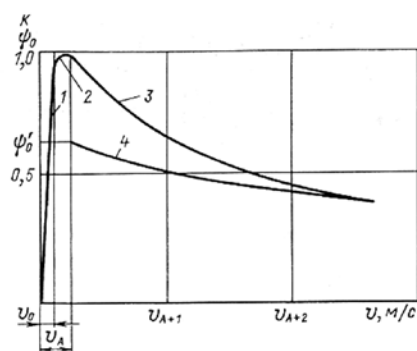
колесо — рельс, сила тяги, характеристика сцепления, структура, обратная ветвь, боксование.

### Abstract

In the article it is shown that the return branch line of wheel – rail coupling characteristic doesn't exist, and slip elimination process has the same coupling characteristics as slip development process. Nature of slip attenuation process, as well as development one, is defined by the ratio of driving force and coupling.

**Key words:** wheel- rail, driving force, coupling characteristic, structure, return branch line, slip.

Для расчета процессов развития и затухания боксования колесных пар локомотивов, анализа тяговых свойств локомотивов, разработки противобоксовочных схем, определения износа бандажей колес и рельсов, а также в ряде других случаев необходимо знание характеристики сцепления. Характеристика сцепления определяет зависимость силы сцепления колес с рельсами и скорости проскальзывания этих колес по рельсам. Представляется характеристика сцепления обычно в виде зависимости либо относительной силы сцепления [1], либо относительного коэффициента сцепления [2] от скорости скольжения.



1 - восходящая ветвь; 2 - промежуточная ветвь; 3 - падающая ветвь при увеличении скорости скольжения; 4 - возрастающая ветвь при уменьшении скорости скольжения

Рисунок 1 — Характеристика сцепления (по Д.К. Минову)

Характеристика сцепления по Д.К. Минову (рис. 1) [2] состоит из трех ветвей: восходящей, промежуточной и падающей. Восходящая ветвь соответствует нормальному без боксования режиму реализации силы тяги. В пределах промежуточной ветви коэффициент сцепления сохраняет примерно постоянное значение. Падающая ветвь соответствует полному, или избыточному, скольжению колеса по рельсам, то есть боксованию.

Экспериментальные исследования характеристики сцепления, выполненные во ВНИИЖТе Н.Н. Меншутиным на электровозах постоянного тока с тяговыми двигателями последовательного возбуждения [1, 3], установили количественную зависимость между силой сцепления и скоростью скольжения колесной пары

В обоих источниках [1, 2] показана обратная ветвь характеристики сцепления, соответствующая уменьшению скорости скольжения колесной пары, т. е. ликвидации боксования. Эта ветвь (ветвь 4 на рис. 1) не совпадает с падающей ветвью (ветвь 3). Какого-либо пояснения и физической сути наличия этой обратной ветви в указанных источниках не приводится. Кроме того, такое представление характеристики сцепления при уменьшении скорости скольжения колесной пары (ветвь 4) затрудняет анализ и исследование процессов ликвидации боксования. В данной работе будет показано, что обратной ветви характеристики сцепления вообще не существует, а процесс ликвидации боксования идет по той же падающей ветви характеристики сцепления (ветвь 3), по которой идет и процесс развития боксования.

Рассмотрим сначала процесс развития боксования, а затем его ликвидацию.

Ранее было показано [4, 5], что на восходящей ветви характеристики сцепления соблюдается условие устойчивого характера реализации силы тяги. Это явление было названо тяговой устойчивостью. Подобный анализ можно выполнить и на падающей ветви характеристики сцепления.

Действительно, в режиме боксования уравнение сил на ободе колесной пары может быть приблизительно описано следующим уравнением:

$$F_{к.д} - T = m_3 \cdot \frac{dV_{ск}}{dt}, \quad (1)$$

где  $F_{к.д}$  — сила тяги тягового двигателя на ободе колесной пары;  $T$  — сила сцепления колесной пары с рельсами;  $m_3$  — эквивалентная масса вращающихся частей, связанных с колесной парой;

$V_{ск}$  — скорость скольжения колесной пары относительно рельсов.

На рис. 2 изображена характеристика сцепления  $T$  и тяговая характеристика боксующей оси локомотива  $F_6$ .

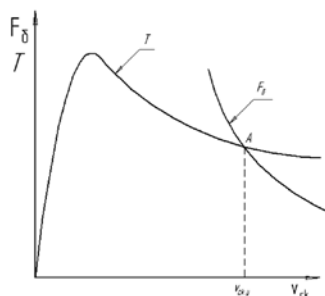


Рисунок 2 — Пример устойчивого режима боксования

Пусть имеем установившийся характер режима боксования в точке А. Здесь сила тяги  $F_6$  и сила сцепления  $T$  равны. Для того чтобы в точке А наблюдался устойчивый режим боксования колесной пары, необходимо (при статическом анализе на устойчивость), чтобы приращения ускоряющего усилия ( $m_3 \cdot dV_{ск}/dt$ ) и скорости скольжения  $V_{ск}$  [см. уравнение (1)] имели разные знаки, а их отношение представляло отрицательную величину [6], т. е.

$$\frac{d(m_3 \cdot \frac{dV_{ск}}{dt})}{dV_{ск}} < 0. \quad (2)$$

Принимая во внимание уравнение (1), получим

$$\frac{d(F_{к.д} - T)}{dV_{ск}} < 0, \quad (3)$$

или

$$\frac{dF_{к.д}}{dV_{ск}} < \frac{dT}{dV_{ск}}. \quad (4)$$

То есть для того чтобы система «колесо — рельс» могла восстанавливать свой исходный режим избыточного скольжения колесной пары (точка А), необходимо, чтобы темп изменения силы тяги на ободе колесной пары при изменении скорости скольжения был меньше темпа изменения силы сцепления. Легко видеть, что это условие для точки А соблюдается.

Таким образом, в точке А (см. рис. 2) имеем установившийся и устойчивый режим боксования. Неравенство (4) — это условие устойчивого характера боксования колесной пары. Для ликвидации боксования необходимо получить неустойчивый режим.

На рис. 3 изображена характеристика сцепления  $T$  и тяговые характеристики боксующей оси  $F_{61}$  и  $F_{62}$  в различных случаях процессов боксования.

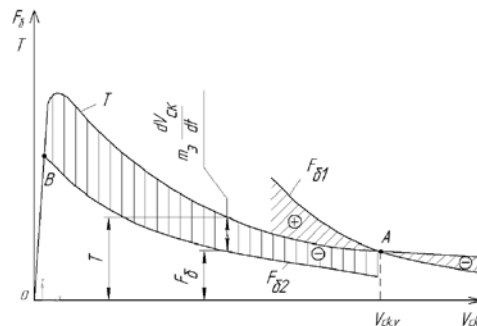


Рисунок 3 — Образование неустойчивого режима боксования колесной пары

В точке А процесс боксования носит установившийся и устойчивый характер.

Для ликвидации боксования необходимо, чтобы ускоряющее усилие  $F_y = m_3 \cdot \frac{dV_{ск}}{dt}$  было бы отрицательным во всем диапазоне

избыточного скольжения колесной пары [уравнение (1)]. 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 будет отрицательным во всем диапазоне скорости скольжения, и, следовательно, режим боксования будет неустойчивым, что и приведет к его ликвидации. Последнее подтверждается рис. 3, где изображена характеристика  $F_{62}(V_{ск})$  боксующей оси при уменьшении скорости 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  $F_{02}$  и приведет к уменьшению скорости скольжения и закончится в точке  $B$  — точке устойчивого и нормально-го (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. 3) 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 (4) устойчивого режима в точке  $B$  соблюдается.

На рис. 4 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.

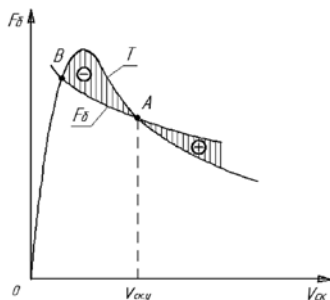


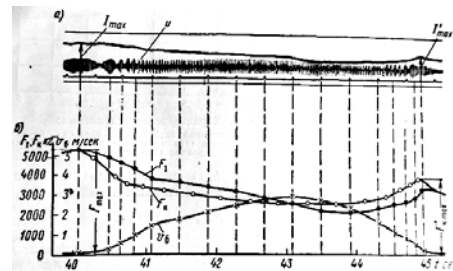
Рисунок 4 — Пример неустойчивого режима боксования

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).

Неслучайно поэтому в экспериментальных работах Н.Н. Меншутина [2, 3] не приведено ни одной опытной точки обратной ветви характеристики сцепления (ветви 4 рис. 1). 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. 3 и 4 аналогичная точка обозначена буквой  $B$ . 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 [2, 3] 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. 5 приведена осциллограмма из работы [1] и выполнена дополнительная ее расшифровка. По кривым сил тяги и сцепления  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  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. При расшифровке сохранены обозначения и размерность величин, принятых в первоисточнике. Расчет сил тяги и сцепления по данным осциллограммы описан в [1].



Осциллограмма боксования оси а и построенные по ней графики б изменения скорости скольжения и силы сцепления

Рисунок 5 — Осциллограмма боксования и построенные по ней графики (эксперимент Н.Н. Меншутина)

Расчет полученных зависимостей  $F_{11}(V_{ск})$ ,  $F_{12}(V_{ск})$  и  $F_{к1}(V_{ск})$ ,  $F_{к2}(V_{ск})$  производился следующим образом. Из рис. 5б в одни и те же моменты времени выписывались значения силы и скорости скольжения, и по ним строились искомые зависимости. Так как на осциллограмме приведен процесс развития и ликвидации боксования, то и соответственно получим зависимости сил тяги и сцепления при развитии и ликвидации боксования. В табл. 1 представлены результаты расчета, а на рис. 6 — искомые зависимости.

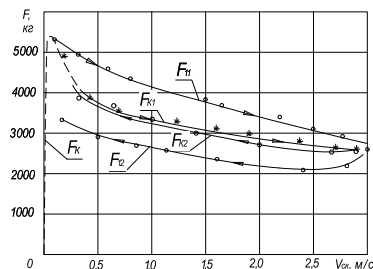
Полученные данные приведены как в табличном варианте, так и в виде графиков. В табл. 1 значения, обозначенные порядковыми номерами, выписаны из кривых первоисточника, а значения скорости скольжения, представленные в табл. 1 между порядковыми номерами, рассчитаны по соседним значениям как средние, и для этого значения скорости скольжения определялись значения силы сцепления из кривой  $F_к(t)$  первоисточника. На рис. 5 эти значения обозначены светлыми точками.

На рис. 6 точки полученной зависимости силы сцепления при развитии боксования обозначены звездочками, а при ликвидации — большими светлыми кружками.

На графике (см. 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.

**Таблица 1 — Результаты пересчета экспериментальных кривых**

N	$t, c$	$V_{скр}, м/с$	$F_{12}, кг$	$V_{скр}, м/с$	$F_{к2}, кг$	Примечания
0	0,28	0,1	5200			Срыв сцепления
				0,2	4880	
1	0,5	0,3	4900			Развитие боксования
				0,45	3900	
2	0,67	0,6	4600			
				0,7	3520	
3	0,84	0,8	4360			
				1,15	3400	
4	1,09	1,5	3840			
				1,6	3240	
5	1,48	1,7	3640			Квазиустановившийся режим боксования
				1,95	3040	
6	1,9	2,2	3420			
				2,35	2840	
7	2,3	2,5	3120			
				2,65	2680	
8	2,7	2,8	2880			
				2,9	2560	
9	3,1	3,0	2600			Ликвидация боксования
				2,9	2600	
10	3,53	2,8	2200			
				2,6	2560	
11	4,14	2,4	2100			
				2,0	2740	
12	4,35	1,66	2400			
				1,4	2980	
13	4,58	1,12	2600			
				1,0	3320	
14	4,75	0,84	2700			
				0,68	3620	
15	4,9	0,5	2900			
				0,35	3860	
16	5,02	0,2	3300			
				0,1	3360	
17	5,2	0,08	3360			


**Рисунок 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;  $F_{k1}$  — сила сцепления при развитии боксования;  $F_{k2}$  — сила сцепления при ликвидации боксования;  $F_k$  — восходящая ветвь характеристики сцепления

Следовательно, при анализе и расчете процессов ликвидации боксования нет необходимости придумывать какое-то 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 исследовать явления, сопровождающие процессы ликвидации боксования.

Таким образом, результаты данной работы и работ [4, 5] позволяют по-новому представить и понять характеристику сцепления колесных пар с рельсами в режиме тяги, а также математически описывать и исследовать процессы не только развития, но и ликвидации боксования. Появляется возможность оценивать эффективность противобоксовочных систем, а следовательно, и тяговых свойств локомотивов.

## Литература

1. Меншутин Н.Н. Зависимость между силой сцепления и скоростью скольжения колесной пары локомотива // Вестник ВНИИЖТ. 1960. № 7. С. 12 — 16.
2. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровазов и тепловозов с электрической передачей. Москва : Транспорт, 1965.
3. Меншутин Н.Н. Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги в эксплуатационных условиях // Труды ВНИИЖТ. 1960. Вып. 188. С. 113 — 132.
4. Усов В.А. К вопросу о характеристике сцепления и реализации силы тяги // Улучшение тяговых, тормозных и регулировочных характеристик электрического подвижного состава : сборник науч. трудов. УЭМИИТ. 1970. Вып. 31. Ч. 3. С. 19 — 23.
5. Усов В.А. Механическая устойчивость системы колесо — рельс в режиме избыточного проскальзывания колесной пары локомотива // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2007. Вып. 2.
6. Проектирование систем управления электроподвижным составом / под ред. д.т.н., проф. Н.А. Ротанова. М. : Транспорт, 1986. С. 205 — 212.

## References

1. Menshutin N.N. Issledovanie skolzheniya kolesnoy pary elektrovoza pri realizatsii sily tyagi v ekspluatatsionnykh usloviyakh [Research of wheel pair slip of electric locomotive with the help of driving force during operation] // Trudy VNIIZhT. 1960. Vyp. 188. P. 113–132.
2. Menshutin N.N. Zavisimost mezhdu siloy stsepleniya i skorostyu skolzheniya kolesnoy pary lokomotiva [Dependence between locomotive wheel coupling and slip speed] // Vestnik VNIIZhT. 1960. №7. P. 12–16.
3. Minov D.K. Povyshenie tyagovykh svoystv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoy peredachey [Increase of driving force of electric locomotives or diesel ones with electric gear]. Moskva: Transport, 1965.
4. Usov V.A. K voprosu o kharakteristike stsepleniya i realizatsii sily tyagi [On the problem of coupling characteristics and driving force] // Ulushchenie tyagovykh, tormoznykh i regulirovochnykh kharakteristik elektricheskogo podvizhnogo sostava: Sbornik nauchnykh trudov. UEMIIIT. 1970. Vyp. 31. chast' 3. P. 19–23.
5. Usov V.A. Mekhanicheskaya ustoichivost sistemy koleso–rels v rezhime izbytochnogo proskalyzvaniya kolesnoy pary lokomotiva [Mechanical stability of wheel-rail system in locomotive wheel pair overslip mode] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya., 2007. Vyp. 2.
6. Proektirovanie sistem upravleniya elektropodvizhnym sostavom [Design of electric stock control systems] / Pod redaktsiej d.t.n., prof. N.A. Rotanova. M.: Transport, 1986. P. 205–212.

УДК 621.332.33(043)

**Александр Геннадьевич Галкин, доктор технических наук, профессор, ректор Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,**  
**Алексей Анатольевич Ковалев, кандидат технических наук, доцент, заведующий НИЛ САПР КС,**  
**Александр Ваноевич Микава, аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,**  
**Александр Владимирович Окунев, аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург**

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ

**Alexander G. Galkin, DSc in Engineering, Professor, Rector of USURT,**  
**Alexey A. Kovalev, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Head of the Laboratory of SAPR KS,**  
**Alexander V. Mikawa, Post-graduate student at the Department "Electrical transport supply" of USURT,**  
**Alexander V. Okunev, Post-graduate student at the Department "Electrical transport supply" of USURT**

### Wire Suspension Life Cycle Calculation Method Development

#### Аннотация

Жизненный цикл контактной подвески или любой другой сложной технической системы напрямую зависит от надежности ее составных частей. Преждевременный отказ одного элемента приводит к отказу подвески в целом. Внедрение усовершенствованных узлов и деталей, а также применение более надежных и долговечных элементов контактной подвески увеличивает жизненный цикл и сокращает затраты на поддержание ее работоспособного состояния. Зная продолжительность жизненного цикла всей контактной подвески уже на первом этапе, появляется возможность для определения стоимости каждого его этапа отдельно.

Предложенный метод расчета жизненного цикла контактной подвески позволит определить оптимальный срок, на который следует заключать контракт жизненного цикла, удовлетворяющий заказчика и исполнителя.

**Ключевые слова:** контракт жизненного цикла, стоимость жизненного цикла, контактная подвеска, срок службы, сложная техническая система, надежность, интенсивность отказов.

#### Abstract

The life cycle of a wire suspension or any other complex technical system depends on the reliability of its constituent parts. Premature failure of one element leads to the failure of the suspension in general. Introduction of improved blocks and components, as well as the use of more reliable and durable elements of the wire suspension increases the life cycle and reduces the cost of maintaining its working state. Knowing the length of the life cycle of the entire wire suspension at the first stage, it is possible to determine the value of each of its separate stage. The suggested method of wire suspension life-cycle calculation will determine the optimum time which a contract of lifecycle should be concluded at, satisfying the customer and the manufacturer.

**Key words:** life-cycle contract; life cycle cost; wire suspension; lifetime; complex technical system, reliability, failure rate.

Любая техническая система требует определенных капиталовложений от момента ее проектирования до утилизации. В некоторых случаях эти затраты достигают десятка миллиардов рублей. Вложить такие деньги в проект зачастую способны только госкорпорации. Тем не менее на каждом этапе жизненного цикла (ЖЦ) (рис. 1) технической системы существуют финансовые риски. Финансировать сомнительные проекты не готово даже государство.



Рисунок 1 — Схема этапов жизненного цикла изделия

Примером сложных технических систем являются вновь создаваемые железнодорожные участки, в частности, под высокоскоростное движение. Инициатором такого строительства является государство, но за выполнение проекта несет ответственность ОАО «Российские железные дороги». Из-за указанных выше проблем подобные объекты планируется создавать с применением контракта жизненного цикла (КЖЦ) [1].

Оптимальный срок того или иного изделия, на который следует заключать КЖЦ, индивидуален. Например, требуется заключить контракт жизненного цикла на строительство

участка контактной сети на 40 лет. Так как срок службы применяемых консолей составляет около 15 лет, то они нуждаются в усовершенствовании, а значит, в увеличении продолжительности их службы. Устройства контактной сети имеют внезапные отказы, так как подвержены воздействиям окружающей среды, механическим и электрическим напряжениям. Реальный срок службы элементов становится намного меньше заявленного.

Контактная подвеска — это сложная техническая система, состоящая из отдельных восстанавливаемых объектов: контактного провода, несущего троса, опоры, консоли, фиксатора, струны, зажимов. Данные о сроках их службы представлены на рис. 2.

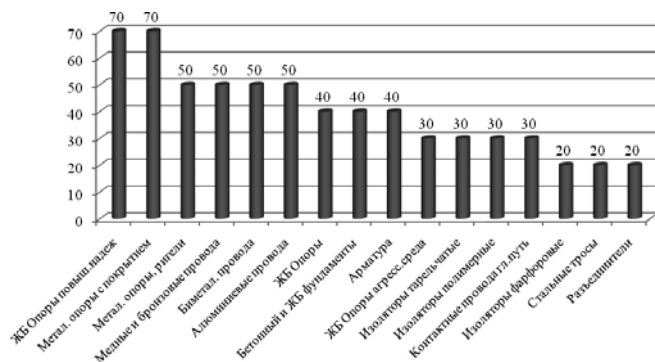


Рисунок 2 — Сроки службы устройств контактной сети

Для того чтобы увеличить жизненный цикл всей системы, необходимо повысить надежность приведенных выше устройств по отдельности. Обрыв струны в цепной подвеске и падение опоры с подвеской одинаково квалифицируются как отказ контактной сети. Но в первом случае возможен пропуск локомотивов с опущенным токоприемником, а во втором он невозможен [2]. Время восстановления объектов также отличается в несколько раз.

Основным критерием оптимальности является минимизация затрат на поддержание максимального срока службы объектов, при создании которых заключается контракт жизненного цикла. Для сокращения количества отказов необходимо внедрять усовершенствованные узлы и детали контактной сети, но не все производители заинтересованы в этом, так как продление срока службы конструкции приводит к ее редкой покупке. Теоретическая модель отказов помогает выявить, какие элементы инфраструктурного комплекса системы токопровода или методов их монтажа и дальнейшего технического обслуживания следует модернизировать, чтобы скорость движения поездов на участке возросла, а интенсивность отказов снизилась.

Отказ одного из элементов сложной технической системы приводит к ее отказу в целом. Временная неработоспособность контактной подвески вызывает задержку поездов и, как следствие, незапланированные расходы. На рис. 3 наглядно представлен процесс отказа и последующего восстановления одного элемента, входящего в состав единой сложной технической системы.

Система начинает работать в момент времени  $t = 0$  и продолжает работать до момента времени  $t_{p1}$ . После этого про-

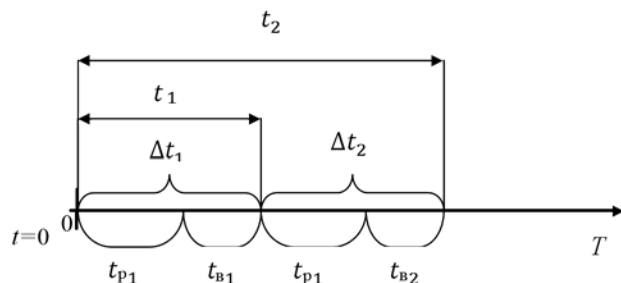


Рисунок 3 — Временная эпюра случайной ситуации в случае восстановления отказавшей системы путем замены (ремонта) элемента

исходит восстановление объекта в течение времени  $t_{B1}$ . Затем система продолжит работать случайное время  $t_{p2}$ . Проработав некоторый промежуток времени, система (элемент системы) вновь выходит из строя в момент  $t_{p1} + t_{B1} + t_{p2}$  и восстанавливается в течение времени  $t_{B2}$ .

Интервалы времени между отказами представляют собой систему взаимно независимых случайных величин [3]. Моменты отказов или восстановлений образуют в каждом опыте (испытании) ряд чисел, которые образуют случайный поток, названный процессом восстановления. Данный процесс является различным для элементов и продолжается в течение жизненного цикла системы или элемента, входящего в нее. Основными характеристиками процесса восстановления являются функция восстановления  $\Omega(t)$  и ее дифференциальная характеристика — плотность восстановления  $\omega(t)$ , которые определяются по формулам:

$$\Omega(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t); \quad (1)$$

$$\omega(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t), \quad (2)$$

где  $f_n(t)$  и  $F_n(t)$  — соответственно плотность и функция распределения наработки до  $n$ -го отказа.

В случае независимости наработок между отказами функции распределения  $F_n(t)$  наработок до  $n$ -го отказа находятся путем последовательного применения правила свертки для суммы двух случайных величин

$$F_n(t) = F_{n-1}(t) \cdot F(\Delta t_n) = \int_0^t F_{n-1}(t - \Delta t) \cdot dF(\Delta t). \quad (3)$$

Вычисление аналитических выражений для функции восстановления  $\Omega(t)$  и плотности восстановления  $\omega(t)$  невозможно из-за сложности математической формализации применяемых стратегий восстановления работоспособности технических систем и необходимости учета множества факторов, влияющих на замену элемента в системе. Свертка, приведенная в формуле (3), лишь для некоторых законов распределения вычисляется в конечном виде. В этих условиях наиболее эффективным методом расчета  $\Omega(t)$  и  $\omega(t)$  является метод Монте-Карло [3].

Расчет ведущей функции и параметра потока отказов данным методом производится следующим образом [3]. По известным законам распределения наработок элементов с

использованием формул преобразования моделируются массивы случайных величин  $\Delta t_{ik}$  между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м отказами. Размерность каждого массива равна  $N$ . Также необходимо вычислить значения наработок до  $i$ -го отказа  $t_{ik}$  по следующим формулам:

$$t_{ik} = t_{(i-1)k} + \Delta t_{ik}; \tag{4}$$

$$t_{1k} = \Delta t_{1k}; \tag{5}$$

где  $i$  — номер отказа,  $i = \overline{1, p}$ ;  
 $k$  — номер реализации при моделировании,  $k = \overline{1, N}$ ;  
 $p$  — максимальное число отказов элемента, получаемое в  $k$ -й реализации случайного процесса.

Полученные случайные величины наработок  $t_{ik}$  группируются по интервалам времени. Номера интервалов, в которые попадают моменты возникновения отказов  $t_{1k}, t_{2k}, t_{3k}, \dots,$

$t_{pk}$  определяются как целое число от отношения  $\frac{t_{ik}}{\Delta t}$  округленное в большую сторону.  $\Delta t$  — величина интервала времени.

Для расчета продолжительности жизненного цикла контактной подвески необходимо рассмотреть каждый ее элемент отдельно. В качестве примера расчета воспользуемся статистическими данными системы «КАСАНТ», применяемой в ОАО «РЖД», на участке Москва — Санкт-Петербург, где эксплуатируется контактная подвеска КС-200. Ее развернутая длина составляет 1080,6 км. Интенсивность отказов приведена в табл. 1 на период с 01.01.10 по 31.12.12.

**Таблица 1 — Интенсивность отказов элементов контактной подвески**

Элемент контактной подвески	Интенсивность отказов $\lambda$ , 1/год
Контактный провод	0,66
Несущий трос	1,33
Струны	2
Воздушные стрелки	1
Изоляторы	0,66
Зажимы	0,33
Усиливающий провод	0,33
Фиксаторы	0,33
Разъединители	0
Искровые промежутки	0
Опоры	0
Прочие	0

Из табл. 1 видно, что периодические отказы возникают у восьми элементов системы, но все их можно восстановить путем ремонта или замены. В этом случае жизненный цикл подвески напрямую зависит от надежности ее составных частей.

Восстанавливаемые объекты с равномерно распределенной нагрузкой имеют экспоненциальные распределения наработки между отказами и временем восстановления. К

таким объектам относится контактная сеть. Формула для вычисления случайных значений наработок на отказ элемента имеет вид

$$t_i = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \varepsilon_k, \tag{6}$$

где  $\lambda = \text{const}$  — интенсивность отказов элемента;  
 $\varepsilon_k$  — равномерно распределенное случайное число на интервале  $[0,1]$ ;  
 $k$  — номер реализации при моделировании.

При помощи генератора случайных чисел выбираем  $\varepsilon_1 = 0,43$ . Приведем пример вычисления срока службы элементов с интенсивностью 0,33 отказа/год в соответствии с табл. 1

$$t_1 = -\frac{1}{0,33} \cdot \ln 0,43 = 2,55.$$

Из расчета видно, что первый отказ составных частей контактной подвески (зажима, усиливающего провода и фиксатора) произойдет на третьем году их эксплуатации. По формуле (4) необходимо определить, когда наступит второй отказ элементов после их восстановления или замены,

$$t_{21} = t_{11} + \Delta t_{21}.$$

$\Delta t_{21}$  определяется также по формуле (6)

$$\Delta t_{21} = -\frac{1}{0,33} \cdot \ln 0,43 = 2,55 \text{ года.}$$

Второй отказ наступит в момент времени  $t_{21}$

$$t_{21} = 2,55 + 2,55 = 5,10 \text{ года.}$$

После восстановления элементы снова могут отказать на третий год эксплуатации, но жизненный цикл всей системы станет равным пяти годам.

Необходимо определить жизненный цикл контактной подвески после второго отказа элементов и их последующего восстановления (замены) по формуле

$$t_{31} = t_{21} + \Delta t_{31}.$$

$$t_{31} = 5,10 + 2,55 = 7,65 \text{ года.}$$

Жизненный цикл системы составит семь полных лет, а отказы ее элементов произойдут уже через два года. Стоимость жизненного цикла (СЖЦ) возможно определить при помощи программного продукта [4], разработанного авторами. Порядок расчета СЖЦ предложен в [5, 6]. Вышеизложенный метод позволяет утверждать, что если КЖЦ заключается на 7 лет, то обрыв усиливающего провода за это время произойдет дважды. В мировой практике срок действия КЖЦ составляет 30 — 50 лет. За данный период может произойти 15 — 25 отказов только одного элемента контактной подвески. Для того чтобы уменьшить рост количества отказов, необходимо применять модернизированные узлы и детали.

## Выводы

1. Приведенный метод расчета ЖЦ позволит определить оптимальный срок, на который следует заключать КЖЦ, удовлетворяющий заказчика и исполнителя.

2. Жизненный цикл контактной подвески или любой другой сложной технической системы напрямую зависит от надежности ее составных частей. Преждевременный отказ одного элемента приводит к отказу подвески в целом.

3. Внедрение усовершенствованных узлов и деталей, а также применение более надежных и долговечных элементов контактной подвески увеличивает ЖЦ и сокращает затраты на поддержание ее работоспособного состояния.

4. Зная продолжительность жизненного цикла всей контактной подвески уже на первом этапе, появляется возможность для определения СЖЦ каждого этапа отдельно.

## Литература

1. Ковалев А.А., Микава А.В., Окунев А.В. *Определение стоимости жизненного цикла сложных технических систем // Управление экономическими системами : электронный научный журнал.* 2013. № 50. С. 15/

2. Ефимов А.В., Галкин А.Г. *Надежность и диагностика устройств электроснабжения железных дорог.* М. : УМК. 2000. 512 с.

3. Бережная Е.В., Бережной В.И. *Математические методы моделирования экономических систем : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп.* М. : Финансы и статистика, 2006. 432 с.

4. А. с. 2013613993 Российская Федерация. *Расчет стоимости жизненного цикла сложных технических систем / А.Г. Галкин, А.А. Ковалев, А.В. Микава, А.В. Окунев.*

5. Галкин А.Г., Ковалев А.А., Микава А.В. *Применение контракта жизненного цикла для инфраструктурного комплекса системы токосъема // Транспорт Урала.* 2012. № 3 (34). С. 85 — 89.

6. *О методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены сложных технических систем железнодорожного транспорта : распоряжение ОАО «РЖД» от 27.12.07 № 2459р.*

## References

1. Kovalev A.A., Mikawa A.V., Okunev A.V. *Opredeleniye stoimosti zhiznennogo tsikla slozhnikh tekhnicheskikh system/ Upravleniye ekonomicheskimi sistemami: elektronniy zhurnal, [Determining the Value of Complex Technical Systems Life Cycle / Management of Economic Systems: electronic scientific journal.]* 2013. № 50. p.15

2. Efimov A.V., Galkin A.G. *Nadezhnost i diagnostika ustroystv elektrosnabjeniy zheleznikh dorog [Reliability and Diagnostics of Railways Power Supply Devices] - Moscow: UMK. 2000. – 512 p.*

3. Berezhnaya E.V., Berezhnoy V.I. *Matematicheskiye metody modelirovaniya ekonomicheskikh system: uchebnoye posobiye 2 izdaniye, pererab. i dop. [Mathematical Modeling Techniques of Economic Systems: textbook. 2nd ed., Rev. and add.]* Moscow: Finansy i statistika, 2006. 432 p, ill.

4. Galkin A.G., Kovalev A.A., Mikawa A.V., Okunev A.V. *Raschet stoimosti zhiznennogo tsikla slozhnikh system [Calculating the Cost of the Complex Technical Systems Life Cycle] / / A.c. 2013613993 Rossiyskaya Federatsiya, 2013.*

5. Galkin A.G., Kovalev A.A., Mikawa A.V. *Primeneniye kontakta zhiznennogo tsykla dlya infrastruktornogo kompleksa sistemi tokosyema [Application of the Life Cycle Contract for Infrastructure Complex of Current Collection System] / / Transport of the Urals, 2012. № 3 (34). p. 85-89*

6. *O metodike opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla i limitnoy tseni slozhnikh tekhnicheskikh system zheleznodorozhnogo transporta: rasporyzheniye OAO "RZHD" [On the Method of Determining the Value of the Life Cycle and the Limit Price of Complex Railway Transport Technical Systems: order of OJSC "Russian Railways"] of December 27, 2007 № 2459p.*



УДК 621.332.33(043)

**Олег Алексеевич Сидоров, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Семен Валерьевич Заренков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Олеся Андреевна Ходунова, аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ В УЗЛАХ КРЕПЛЕНИЯ ПОВОРОТНОЙ КОНСОЛИ НА ИЗМЕНЕНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОДОВ ПО ДЛИНЕ АНКЕРНОГО УЧАСТКА

**Oleg A. Sidorov, DSc in Engineering, Professor, "Railway Transport Power Supply" Department, Omsk State Transport University (OSTU), Semyon V. Zarenkov, PhD in Engineering, Associate Professor, "Railway Transport Power Supply" Department, Omsk State Transport University (OSTU), Olesya A. Khodunova, Postgraduate, "Railway Transport Power Supply" Department, Omsk State Transport University (OSTU)**

### Study Of Pivot Arm Joints Friction Impact On Wires Tension In The Tension Length

#### Аннотация

Контактная сеть — важнейшая часть инфраструктуры, отвечающей за взаимодействие электровоза с электроэнергетическим комплексом, а следовательно, за скоростной режим электроподвижного состава (ЭПС). Натяжение — один из основных параметров, влияющих на допустимую скорость движения ЭПС. Отклонения натяжений проводов существенно влияют на параметры подвески.

Новые проекты для скоростей движения до 250 км/ч регламентируют изменение натяжения проводов  $\pm 5\%$ . Однако на практике эта норма не соблюдается. Необходимо узнать, в чем причины этого, как можно уменьшить фактическое изменение натяжения.

В лабораторных условиях разработан стенд и методика исследования влияния угла наклона опоры в различных направлениях на величину силы трения в узлах крепления поворотной консоли к опоре, получены результаты испытаний.

**Ключевые слова:** контактная сеть, инфраструктура, изменение натяжения, консоль, узел крепления, наклон опоры, сила трения.

#### Abstract

The overhead system is a critical part of the infrastructure which is responsible for interaction between the electric locomotive and the electric power system, and consequently, the speed limit for electric stock (ES). The wires tension is one of the main parameters affecting the permissible ES speed. Deviations in wires tension significantly affect the suspension parameters.

New projects for speeds up to 250 km/h provide for the wire tension change of  $\pm 5\%$ . However, this standard is not followed in practice. It is necessary to determine the causes of this situation and the ways to reduce the actual tension change.

In laboratory conditions, the stand has been designed and the research methods have been developed to study the impact of the structure inclination angle in different directions on the friction of pivot arm joints with the structure; test results have been obtained.

**Key words:** overhead system; infrastructure; tension change; pivot arm; joint; structure inclination; friction.

Согласно «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», одна из основных задач связана с организацией высокоскоростного движения для устойчивого социально-экономического развития страны, повышением конкурентоспособности национальной экономики и обеспечением лидирующих позиций на основе опережающего и инновационного развития железнодорожного транспорта [1].

Развитие скоростных и высокоскоростных железнодорожных перевозок обеспечит улучшение транспортных связей, создаст более привлекательные условия для пассажиров, повысит комфортность и безопасность пассажирских перевозок, сократит время в пути.

Для решения задачи по организации скоростного пассажирского движения необходимо произвести замену и модернизацию контактной сети на проектируемых участках высокоскоростного движения.

При проектировании контактных подвесок для высоких скоростей движения стремятся увеличить натяжение проводов и тросов контактных подвесок с целью обеспечения более равномерной эластичности контактной сети и повышения качества токосъема. Кроме того, при скоростях движения свыше 200 км/ч допускается изменение натяжения проводов и тросов по длине анкерного участка не более  $\pm 5\%$  от номинального значения [2].

Однако, в силу того что натяжения несущего троса и контактного провода в пределах анкерного участка непостоянны, меняются при изменении температуры (в том числе в компенсированных подвесках), а также из-за влияния реакций консолей и фиксаторов, трения в компенсаторах, трения в узлах крепления консолей, перекосов струн, вертикальной несоосности узлов крепления консоли, выдерживать данную норму в реальных условиях эксплуатации затруднительно. Особенно заметны изменения натяжения проводов на кривых участках пути [3].

Отклонения натяжений проводов существенно влияют на параметры подвески. Меняется положение струн, стрела провеса и, как следствие, эластичность контактной подвески. Недопустимо превышать натяжение контактного провода скоростной подвески, имеющего номинальное натяжение, близкое к предельно допустимому по механической прочности.

В России ведущей организацией в области разработки, проектирования, производства и информационной поддержки контактной сети железных дорог является ЗАО «Универсал-контактные сети». При составлении проектов реконструкций и строительства участков железных дорог компания использует программные модули собственной разработки, которые включают в себя различные типы расчетов, направленных на определение максимально допускаемых длин пролетов контактной подвески; нагрузок, действующих на опорно-поддерживающие конструкции; рациональных параметров контактных подвесок при проходе в искусственных сооружениях; а также модули по выбору типоразмеров и параметров поддерживающих устройств и построению чертежей армировок опор и жестких поперечин и др. [4]. Одним из основных параметров контактной подвески является длина анкерного участка и изменение натяжения по длине анкерного участка. Расчет длин анкерных участков представлен в литературе [5, 6] и требует усовершенствования с точки зрения учета механических факторов, например наличия трения в элементах крепления поддерживающих конструкций и компенсирующих устройствах.

Усовершенствование существующих методов расчета длины анкерного участка позволит увеличить точность определения приращения натяжения вдоль всего анкерного участка и проверить правильность расположения конструкций на проектируемом участке контактной сети.

Выполнение инженерных расчетов — необходимая часть проектирования конструкций контактной сети с учетом особенностей внешней среды (климатические: ветер, осадки, гололед; геодезические: характеристики грунта, глубина залегания слоев; тип местности: открытая, степь, лесистая, густой лес, насыпь, выемка). Перечисленные особенности оказывают влияние на режим работы контактной подвески как напрямую (климатические, тип местности), так и косвенным образом (геодезические). Воздействие последних становится заметным только через некоторый промежуток времени: в период эксплуатации устройств контактной сети происходит изменение положения опорных конструкций из-за просадок грунта, что приводит к смещению расположенных на опоре поддерживающих конструкций относительно их исходного положения. Примером такой конструкции является консоль, которая для исправной работы требует вертикальной установки на опоре. В ходе отклонения опоры от ее начального положения происходит смещение поддерживающих конструкций, что в дальнейшем влечет изменение настроек контактной подвески как в геометрическом плане расположения в пути, так и в отношении основных показателей и параметров. Изменение угла наклона опоры влияет на величину трения в узлах крепления консоли, которая, в свою очередь, вызывает изменение натяжения проводов и тросов в анкерном участке.

При строительстве и реконструкции контактной подвески установка опор должна производиться строго вертикально. Допускаются следующие отклонения от проектных данных [7]:

- по развороту опор в плане по отношению к направлению, перпендикулярному оси пути,  $\pm 3^\circ$  ( $\operatorname{tg} 3^\circ = 1/20$ );
- по расстоянию от оси пути до опор на уровне головки рельса +150 мм;
- по наклону оси опоры относительно вертикали — 2% высоты опоры в сторону, противоположную действию основных нагрузок, и 1% — вдоль оси пути, а на участках скоростного движения поездов (161 — 200 км/ч) в сторону поля и вдоль оси пути — 0,5%, для анкерных опор — 0,5% в сторону, противоположную действию основных нагрузок, опоры жестких поперечин должны быть установлены вертикально.

В действительности из-за особенностей методики установки, типа грунта наклон опоры с течением времени изменяется [8]. Вследствие этого происходит смещение расположенных на опоре поддерживающих конструкций с несколькими узлами крепления, имеющих вертикальную соосность. Примером таких элементов являются узлы крепления консоли к опоре. Их расположение относительно вертикальной оси влияет на возможность поворота консоли (и на величину трения в узлах крепления), а следовательно, на изменение натяжения проводов и тросов в анкерном участке. Для изучения данного вопроса необходимо экспериментально подтвердить имеющиеся предположения. С этой целью в ОмГУПС в лаборатории конструкций контактной сети, ЛЭП и токосъема разработаны стенд и методика испытаний.

Основа стенда — промежуточное крепление консоли (рама), через которое последняя устанавливается на опору. Промежуточное крепление представляет собой раму, сваренную из уголков № 45, металлических пластин толщиной 6 мм для присоединения штатных узлов крепления консоли и металлической пластины толщиной 6 мм с прорезью (рис. 1). Перед монтажом в местах установки промежуточного крепления на опоре закладывают пластины толщиной 6 мм при помощи изогнутых шпилек.

Пластины на опоре и пластина промежуточного крепления с прорезью имеют скругленные углы в целях обеспечения безопасности. На пластины, расположенные на опоре, устанавливают промежуточное крепление, при этом нижнюю часть рамы устанавливают через шпильку, чтобы была возможность имитировать наклон опоры перпендикулярно оси пути. Для имитации наклона опоры параллельно оси пути на раме предусмотрена пластина с прорезью, позволяющая вращать нижнюю пятю консоли относительно верхней пятю крепления тяги на угол до  $7^\circ$ . Кроме того, на двух пластинах рамы сделано по три отверстия, наличие которых дает возможность проверить трение при несоосной установке узлов крепления консоли. На установленные на раме узлы крепления монтируется консоль.

Измерения производятся следующим образом. На горизонтальную тягу консоли посредством троса (разрывной прочностью до 1000 кг) крепится подставка с грузами калибром 25 кг каждый, при помощи которых задается вертикальная результирующая нагрузка, действующая на консоль (вес и натяжение несущего троса и контактных проводов, вес струн и зажимов, других элементов контактной подвески). В эксперименте задавалась нагрузка 125, 150, 175, 200, 250 кг для исследования влияния величины нагрузки на значение силы трения в узле крепления. К точке крепления троса с грузами закрепляется динамометр, затем параллельно поверхности



Рисунок 1 — Общий вид стенда

земли и перпендикулярно тяги консоли задается усилие через динамометр для поворота консоли. Фиксируется значение усилия, при котором консоль начала движение, это значение будет равно силе трения в узлах крепления.

Испытания проводились в различных режимах:

- 1) консоль устанавливается в штатном порядке;
- 2) консоль устанавливается на опору с имитацией угла наклона опоры параллельно оси пути от 1 до 7° (угол  $\alpha$ );
- 3) консоль устанавливается на опору с имитацией угла наклона опоры перпендикулярно оси пути от 1 до 5° (угол  $\beta$ );
- 4) консоль устанавливается на опору с имитацией угла наклона опоры в параллельном и перпендикулярном направлении оси пути одновременно;

- 5) консоль устанавливается на опору с несоосным положением (№ 1 — по часовой стрелке, № 2 — против часовой стрелки) верхнего и нижнего узлов крепления.

Имитируемый угол наклона опоры (консоли) определяется при помощи специального угломера.

Изменение угла наклона консоли параллельно и перпендикулярно оси пути на стенде показаны на рис. 2.

Результаты испытаний представлены в виде графиков зависимостей на рис. 3, где  $\alpha$  и  $\beta$  — углы наклона опоры,  $P$  — величина вертикальной нагрузки на консоль

Результаты испытаний показывают, что изменение угла наклона опоры влияет на величину трения в узлах крепления консоли (чем сильнее наклонена опора, тем больше становится трение в узлах крепления), следовательно, необходимо учитывать данный фактор при проведении инженерных расчетов.

Влияние силы трения в узлах крепления поворотных консолей на изменение натяжения при различных углах наклона опор оценивается исходя из экспериментальных данных.

Для того чтобы определить тип зависимости, по которой изменяется величина трения в узлах крепления консолей от угла и направления наклона опоры, следует аппроксимировать экспериментально полученные данные в виде графиков. Для примера воспользуемся результатами испытаний стандартных креплений консоли для контактной подвески КС-160 пере-



Рисунок 2 — Имитация наклона опоры параллельно (а) и перпендикулярно (б) оси пути

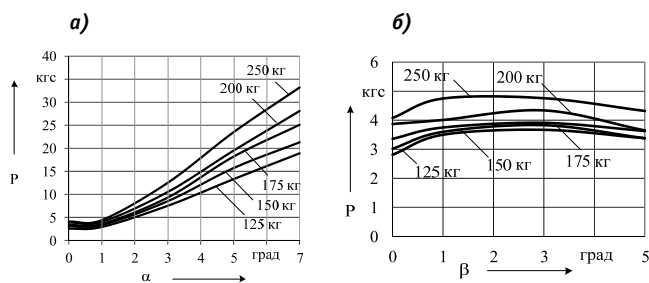


Рисунок 3 — Изменение силы трения в узлах крепления консоли к опоре при наклоне консоли в параллельном (а) и перпендикулярном (б) оси пути направлениях

менного тока. Результаты аппроксимации для типа контактной подвески ПБСМ1-95 + МФ100 + М35 приведены на рис. 4.

Получены формулы определения сил трения в узлах крепления консоли при наклоне опор параллельно, перпендикулярно и произвольно относительно оси пути. Под произвольным наклоном опоры здесь и далее будем понимать как сочетание

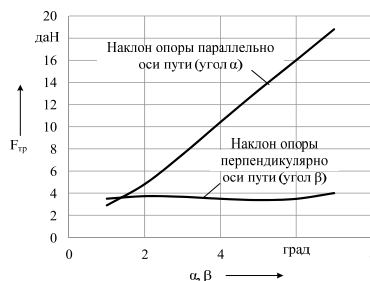


Рисунок 4 — Зависимость силы трения в узлах крепления консолей от направления и величины угла наклона опоры

одновременного наклона опоры в двух направлениях (параллельном и перпендикулярном) относительно оси пути.

Силу трения в узлах крепления консоли при произвольном положении опоры следует находить как сумму векторов (рис. 5). Примем следующие обозначения:  $F_{\text{тра}}$  — величина силы трения в узлах крепления консоли при наклоне опоры параллельно оси пути;  $\Delta T_{\text{тра}}$  — потери натяжения при наклоне опоры параллельно оси пути;  $F_{\text{тр}\beta}$  — величина силы трения в узлах крепления консоли при наклоне опоры перпендикулярно оси пути;  $\Delta T_{\text{тр}\beta}$  — потери натяжения при наклоне опоры перпендикулярно оси пути;  $F_{\text{тр}\gamma}$  — величина силы трения в узлах крепления консоли при произвольном наклоне опоры относительно оси пути;  $\Delta T_{\text{тр}\gamma}$  — потери натяжения при произвольном наклоне опоры относительно оси пути.

Для типа контактной подвески ПБСМ1-95 + МФ100 + М35 получены следующие зависимости величины силы трения в соответствии с наклоном опоры:

$$F_{\text{тра}} = 0,0097 \cdot \alpha^4 - 0,185 \cdot \alpha^3 + 1,25 \cdot \alpha^2 - 0,6847 \cdot \alpha + 2,51;$$

$$F_{\text{тр}\beta} = 0,0288 \cdot \beta^3 - 0,317 \cdot \beta^2 + 0,9782 \cdot \beta + 2,81.$$

При произвольном наклоне консоли

$$F_{\text{мр}\gamma} = \sum_{i=1}^{m-1} \sqrt{F_{\text{мр}\alpha}^2 + F_{\text{мр}\beta}^2}.$$

С использованием данной формулы может быть оценена величина сил трения, возникающих в узлах крепления консолей, на опорах для любых типов контактных подвесок.

## Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.06.08 № 877-р. С. 6 — 10.
2. Сидоров О.А., Заренков С.В., Ходунова О.А. Исследование влияния натяжения проводов на качество токосъема // Вестник РГУПС. 2013. № 2 (50). С. 54 — 60.
3. Иванов В.А., Галкин А.Г., Кудряшов Е.В. Разработка контактной сети для ВСМ России // Инновационный транспорт. 2011. № 1 (1). С. 16 — 22.
4. Кудряшов Е.В., Заренков С.В., Ходунова О.А. Метод расчета эластичности контактной подвески на основе простой конечно-элементной модели. Измерения эластичности // Известия Транссиба. 2011. № 4 (8). С. 16 — 26.
5. Михеев В.П. Контактные сети и линии электропередачи. М. : Маршрут, 2003. 421 с.
6. Фрайфельд А.В., Брод Г.Н. Проектирование контактной сети. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1991. 335 с.
7. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868) / Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. М. : ТРАНСИЗДАТ, 2002. 184 с.
8. Ковалев А.А., Лобанова Г.С., Несмелов Ф.С. Разработка метода расчета наклона опоры контактной сети на основе учета деформационных характеристик грунта // Транспорт Урала. 2010. № 1 (24). С. 69 — 71.

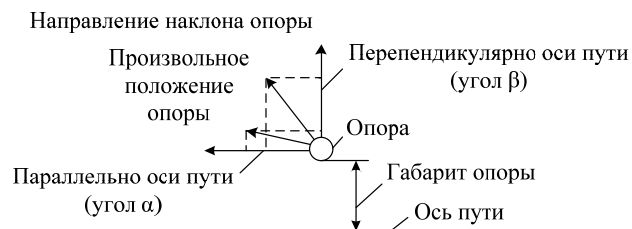


Рисунок 5 — Определение величины силы трения в узлах крепления консоли при ее произвольном положении

## Выводы

1. На изменение натяжения проводов и тросов контактной подвески влияет положение опорных и поддерживающих конструкций.
2. Разработан стенд и предложена универсальная методика для определения трения в узлах крепления консолей.
3. При расчете максимальной длины анкерного участка необходимо учитывать трение в узлах крепления консолей в зависимости от положения опор.

## References

1. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v RF do 2030 goda. Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. [Strategy for the rail transport development in Russia until 2030. Order of the Government of the Russian Federation dated 17 June 2008] No. 877-r. 6-10 s.
2. Sidorov O.A., Zarenkov S.V., Khodunova O.A. Issledovaniye vliyaniya natyazheniya provodov na kachestvo tokos'yoma [Study of the wires tension impact on the current collection quality] // Vestnik RSTU. 2013. No.2 (50). s. 54–60.
3. Ivanov V.A., Galkin A.G., Kudryashov E.V. Razrabotka kontaktnoy seti dlya VSM Rossii [Overhead system development for high-speed railways in Russia] // Innotrans. 2011. No.1 (1). s. 16–22.
4. Kudryashov E.V., Zarenkov S.V., Khodunova O.A. Metod rascheta elastichnosti kontaktnoy podveski na osnove prostoy konechno-elementnoy modeli. Izmereniya elastichnosti [Method of calculating the overhead catenary elasticity based on a simple finite element model. Elasticity measurements] // Izvestiya Transsiba, 2011. No. 4(8). s. 16–26.
5. Mikheyev V.P. Kontaktnyye seti i linii elektroperedach. [Overhead systems and power lines] M.: Marshrut, 2003. 421 s.
6. Frayfel'd A. V., Brod G. N. Proyektirovaniye kontaktnoy seti. 3-ye izd., pererab. i dop. [Overhead system designing. 3rd ed., rev. and add.] M.: Transport, 1991. 335 s.
7. Pravila ustroystva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoy seti elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog (TsE-868). Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniya Ministerstva putey soobshcheniya Rossiyskoy Federatsii [Rules for design and maintenance of an overhead system of electrified railways (TsE-868). Department of Electrification and Power Supply of the Ministry of Railways of the Russian Federation]. M.: TRANSIZDAT, 2002. 184 s.
8. Kovalev A.A., Lobanova G.S., Nesmelov F.S. Razrabotka metoda rascheta naklona opory kontaktnoy seti na osnove ucheta deformatsionnykh kharakteristik grunta [Development of the overhead structure inclination calculating method by taking into account the ground deformation characteristics] // Transport of the Urals. 2010. No.1 (24). s. 69–71.

УДК 621.336

**Александр Николаевич Смердин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС),  
**Алексей Евгеньевич Чепурко**, аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ CFD-МЕТОДА ПРИ РАСЧЕТЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Alexander N. Smerdin, PhD. in Engineering.**, Associate Professor of Department. «Electrical railway transport supply» of Omsk State University of Railway Transport (OSURT),  
**Alexey E. Chepurko**, Post-graduate student at the Department of « Electrical railway transport supply » of Omsk State University of Railway Transport (OSURT)

### Application Peculiarities Of CFD-Method In Calculation Of Electrically Moved Vehicles Current Collective Device Aerodynamic Forces

#### Аннотация

В настоящее время рост производительности вычислительных машин позволил активно развиваться вычислительной аэрогидродинамике (Computational Fluid Dynamics — CFD). Сегодня CFD-исследования могут эффективно применяться на железнодорожном транспорте. Авторами данные исследования были выполнены для расчета аэродинамических характеристик примитивов и отдельных узлов токоприемника.

**Ключевые слова:** поэлементный CFD-анализ, модель турбулентности, аэродинамическая подъемная сила, аэродинамическое лобовое сопротивление, граничные условия, вихревая вязкость, пограничный слой.

#### Abstract

At present the growth of computers performance allows computational aerohydrodynamics (Computational Fluid Dynamics - CFD) to be developed actively. Today CFD-studies can be effectively used at the railway transport. The authors have performed these studies to calculate the aerodynamic characteristics of the primitives and individual blocks of the current collective device.

**Key words:** CFD-analysis of elements, turbulence model, aerodynamic lift force, aerodynamic drag, boundary conditions, eddy viscosity, boundary layer.

**К**онтактное нажатие при взаимодействии токоприемника с контактной подвеской не остается постоянным. Одной из его составляющих является аэродинамическая вертикальная сила, действующая на токоприемник. Ее определяют в ходе проведения линейных испытаний, требующих значительных материальных затрат.

В последнее десятилетие за счет широкой компьютеризации появилась альтернатива линейным и лабораторным испытаниям. Это методы вычислительной гидрогазодинамики (CFD), для которых разработаны специализированные программные продукты.

Процесс моделирования CFD состоит из трех основных этапов: генерации расчетной сетки, разработки числового алгоритма и моделирования турбулентных течений. Последний из этих этапов в настоящее время является основной проблемой вычислительной аэрогидродинамики. На сегодняшний день существуют следующие наиболее распространенные CFD-модели турбулентности [1].

1. Прямое численное моделирование (DNS — Direct Numerical Simulation).

2. Осреднение по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (RANS — Reynolds Averaged Navier-Stokes equations), замкнутых с помощью алгебраических или дифференциальных моделей турбулентности.

3. Метод крупных вихрей LES (Large Eddy Simulation).

4. Метод отсоединенных вихрей DES (Detached Eddy Simulation), который является комбинацией подходов RANS и LES.

Авторами для CFD-исследований был использован модуль инженерного анализа Flow Simulation программного комплекса САПР SolidWorks 2010, в котором применяется метод RANS. Для моделирования турбулентных течений в нем используется стандартная  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности Лаундера — Сполдинга, основанная на решении системы дифференциальных уравнений в частных производных [2, 3].

Особенностью моделирования такого физического процесса является то, что токоприемник представляет собой конструкцию, состоящую из большого количества элементов с различными характерными размерами. Полученные результаты существенно зависят от выбора граничных условий [4]. Пример расчетной сетки при CFD-исследовании для асимметричного токоприемника АИСТ и для его верхнего узла показан на рис. 1.

На рис. 1 можно видеть, что при моделировании воздействия на отдельные элементы расчетная сетка оказывается мельче, чем при моделировании токоприемника целиком. Для получения мелкой расчетной сетки для всего токоприемника обычно используют опцию уточнения, которая существенно увеличивает время моделирования. В лаборатории «КС и ЛЭП» имени профессора В.П. Михеева ОмГУПС разработана методика «позлементного CFD-анализа». При применении данной методики должна быть учтена аэродинамическая интерференция, т. е. взаимодействие и взаимовлияние потоков от отдельных элементов токоприемника.

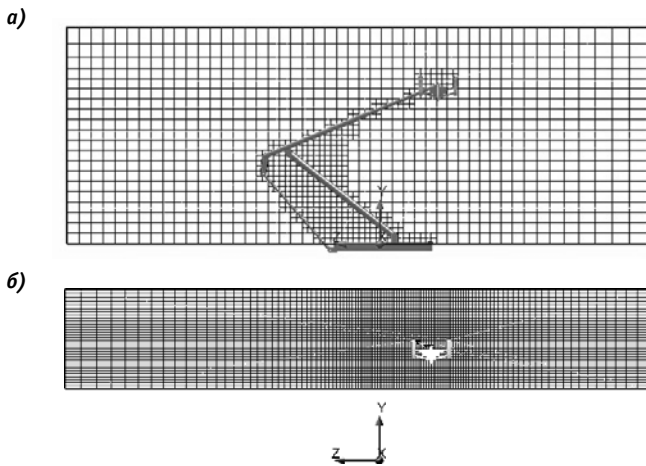


Рисунок 1 — Расчетная сетка при CFD-исследовании токоприемника (а) и его верхнего узла (б)

Авторами для изучения влияния аэродинамической интерференции при использовании для CFD-исследования САПР SolidWorks было проведено моделирование воздействия воздушного потока на два стержня диаметром 6 мм с центрами, находящимися на расстоянии друг от друга 40 мм. Схема обдувки представлена на рис. 2. Штриховой линией показано, как были разбиты области при «позлементном CFD-анализе». В табл. 1 приведены начальные условия для моделирования.

Таблица 1 — Начальные условия при CFD-исследовании примитивов

Тип начального условия	Значение
Скорость потока	50 м/с
Температура	293 К
Плотность воздуха	1,204 кг/м <sup>3</sup>
Кинематическая вязкость	15,1 м <sup>2</sup> /с
Давление	760 мм рт. ст.

Граничные условия: *adiabatic wall* (адиабатическая стенка); *roughness* (шероховатость поверхности) — 5 мкм; *real wall* (условие «без скольжения»); на гранях расчетной области — условия по умолчанию.

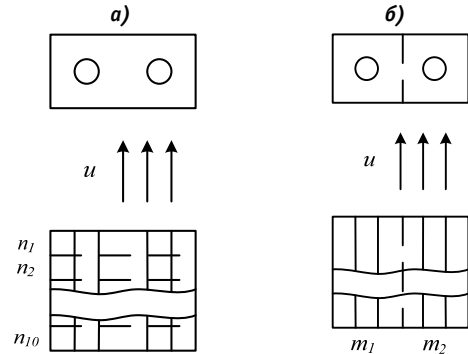


Рисунок 2 — Схемы фронтальной обдувки стержней при горизонтальном (а) и вертикальном разделении областей (б)

При рассмотрении рис. 2а получили, что при граничных условиях, соответствующих обдувке стержней «целиком», лобовое сопротивление равно 9,45 Н. В случае «позлементной обдувки» при  $n = 10$  лобовое сопротивление элементов области  $n_1$  составляло 0,95 Н,  $n_2$  — 0,95 Н,  $n_3$  — 0,95 Н,  $n_4$  — 0,94 Н,  $n_5$  — 0,94 Н,  $n_6$  — 0,94 Н,  $n_7$  — 0,94 Н,  $n_8$  — 0,95 Н,  $n_9$  — 0,95 Н,  $n_{10}$  — 0,95 Н. Суммарное значение составило 9,46 Н. Таким образом, при выбранном направлении воздушного потока (см. рис. 2а) аэродинамическая интерференция учитывается, следовательно, применив принцип суперпозиции, можно значение лобового сопротивления области  $n_1$  умножить на число областей  $n$ .

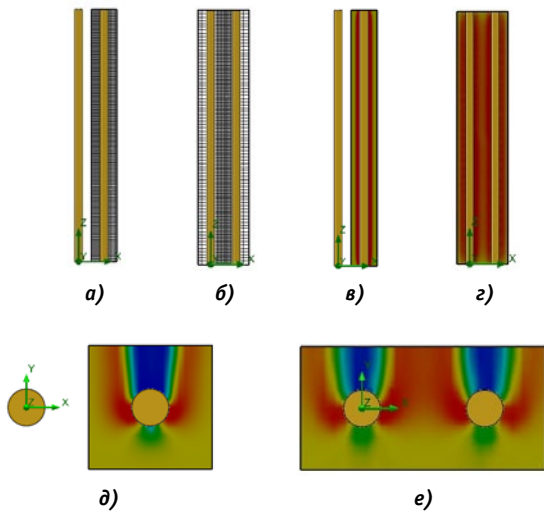
На рис. 3 показаны расчетная сетка и спектры обтекания для варианта 2б (см. рис. 2б). При моделировании обтекания стержней «целиком» аэродинамическое сопротивление составило 9,45 Н. При моделировании обтекания стержня в области  $m_1$  — 2,71, в области  $m_2$  — 2,68 Н. В сумме — 5,39 Н. Интерференция в этом случае не учитывается, хотя интерферирующие потоки хорошо заметны на рис. 3е.

При обдуве обоих стержней происходит пересечение потоков, они создают область повышенного давления между стержнями, что приводит к увеличению лобового сопротивления. Схему разделения в соответствии с рис. 2б в данном случае использовать нельзя.

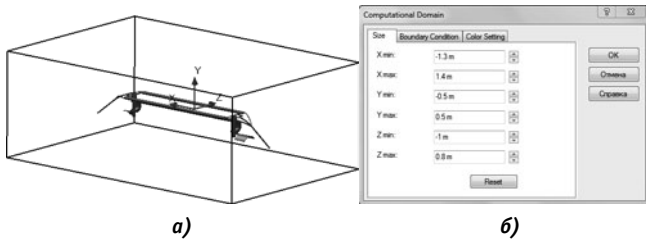
Исследования на примитивах позволяют заключить, что подобный подход применим и к токоприемникам, что дает возможность произвести CFD-моделирование на обычном ПК. CFD-анализу был подвергнут полоз токоприемника типа АХ. Полоз и расчетная область показаны на рис. 4. Начальные и граничные условия задавались такими же, как в случае со стержнями.

При расчете полоза полностью использовалась опция уточнения второго уровня. При этом получили лобовое сопротивление равным 117,8 Н, подъемную силу — 20,87 Н.

Согласно предложенному авторами способу генерации граничных условий, исследуемый полоз был разбит на участки (рис. 5).



**Рисунок 3** — CFD-исследование стержней: а — генерация расчетной сетки для одного стержня; б — для обоих стержней; в — спектр обтекания для одного стержня, вид спереди; г — для обоих стержней; д — спектр обтекания для одного стержня, вид сверху; е — для обоих стержней

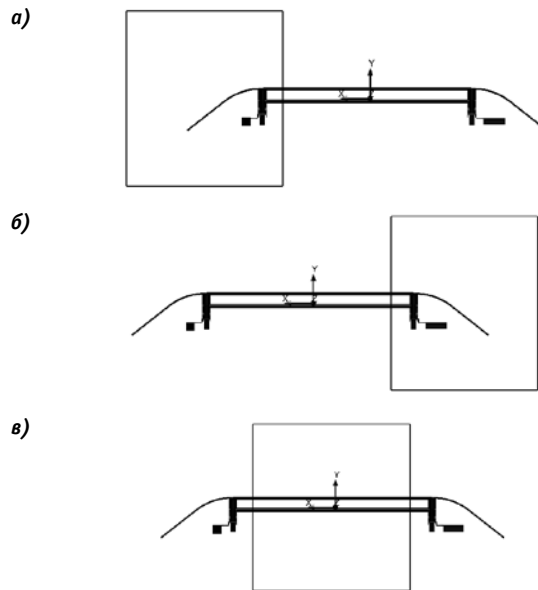


**Рисунок 4** — Исходные данные для CFD-анализа полоза токоприемника типа АХ: а — вид модели; б — расчетная область

Для граничных условий, показанных на рис. 5а и 5б, были получены следующие результаты: лобовое сопротивление — 26,22 и 33,54 Н, подъемная сила — 5,16 и 9,00 Н. При CFD-анализе центральной части (см. рис. 5в) аэродинамические силы составили: лобовое сопротивление — 51,67 Н, подъемная сила — 6,34 Н. В сумме центральная и крайние части дают аэродинамические силы: лобовое сопротивление — 111,43 Н, подъемная сила — 20,5 Н. Время, затраченное на CFD-анализ, составило 125 мин 6 с.

Задание граничных условий для «поэлементного CFD-анализа» токоприемника невозможно без учета аэродинамической интерференции его отдельных элементов. Интерференция выражается в изменении полей скоростей и давлений вблизи данных элементов. Это объясняется существованием пограничного слоя, толщина которого зависит от формы и положения тела в потоке, состояния поверхности, вязкости и скорости движения среды. Позади тела пограничный слой переходит в спутную струю — область с мелкими вихрями, которая по мере удаления от тела исчезает.

Определение толщины пограничного слоя, а следовательно, но, интерферирующих областей является сложной задачей, которая на данный момент теоретически решена только для тел простой формы, таких как плоская пластина или шар. Тол-



**Рисунок 5** — Граничные условия при CFD-анализе полоза токоприемника типа АХ: а, б — крайние части полоза; в — средняя часть полоза

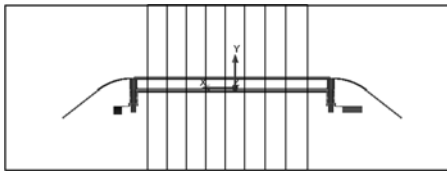
щина пограничного слоя зависит от многих факторов, среди которых — скорость потока, температура окружающей среды, размеры и формы элементов токоприемника. Для токоприемника данные параметры рассчитываются эмпирическим путем. На практике за толщину пограничного слоя принимают линию, на которой скорость среды отличается от скорости внешнего потока не более чем на 1% [5]. При практических расчетах толщину пограничного слоя для турбулентного и ламинарного потока можно приблизительно рассчитать по выражению [6]:

$$\begin{cases} \delta_a = 5 \cdot \sqrt{\frac{v \cdot x}{u}}; \\ \delta_m = 0,37 \cdot \sqrt[5]{\frac{v \cdot x^4}{u}} \end{cases} \quad (1)$$

где  $x$  — продольный характерный размер тела, м;  
 $v$  — кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  
 $u$  — скорость потока, м/с.

Граничные условия (рис. 6) для удобства выбраны таким образом, что объемы их областей составляли 12,5% от области, показанной на рис. 5в. Общее лобовое сопротивление для всего верхнего узла — 112 Н, общая подъемная сила — 20,64 Н. Эти данные соответствуют данным расчета полоза целиком с двойным уточнением в большей степени, чем при обдуве средней части полоза (см. рис. 5в).

Нужно отметить, что при «поэлементном CFD-анализе» суммарное время моделирования составило 57 мин 40 с, а при моделировании полоза токоприемника типа АХ целиком с двойным уточнением — 106 мин 31 с, что на 84,7% больше. Суммарное количество ячеек (cells) в первом случае было равно 754 000, во втором случае — 608 000.

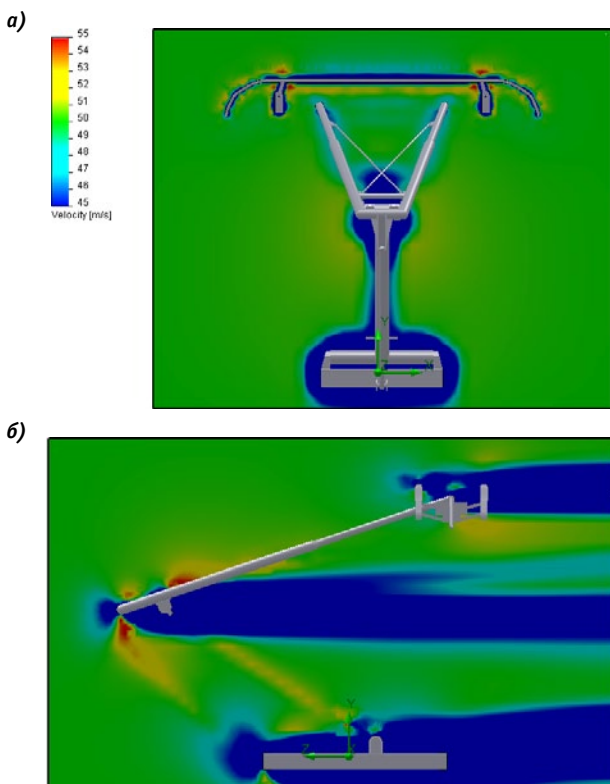


**Рисунок 6** — Граничные условия при «поэлементном CFD-анализе» полоза токоприемника типа АХ

При расчете толщины пограничного слоя авторами статьи принимались некоторые допущения. Течения на первом по ходу движения полозе, верхнем валу, верхней раме, спицах и соединительной тяге считали ламинарными. Второй по ходу полоз попадал в спутную струю, поэтому принимали его обтекание турбулентным. Данный вид обтекания принимался и для каретки, которая рассматривалась вместе с элементами крепления к полозу, также создающими спутные струи.

Спутные струи создавались и отдельными частями конструкции при обтекании шарнирного соединения штанг. По этой причине турбулентным принималось обтекание нижней штанги, основания и шарнирного соединения штанг. Наибольшая толщина пограничного слоя наблюдалась при обтекании основания и составила 30 мм.

Авторами статьи было проведено CFD-исследование скоростного токоприемника на мелкой сетке (начальные и граничные условия такие же, как в случае с примитивами) и получены спектры обтекания (рис. 7).



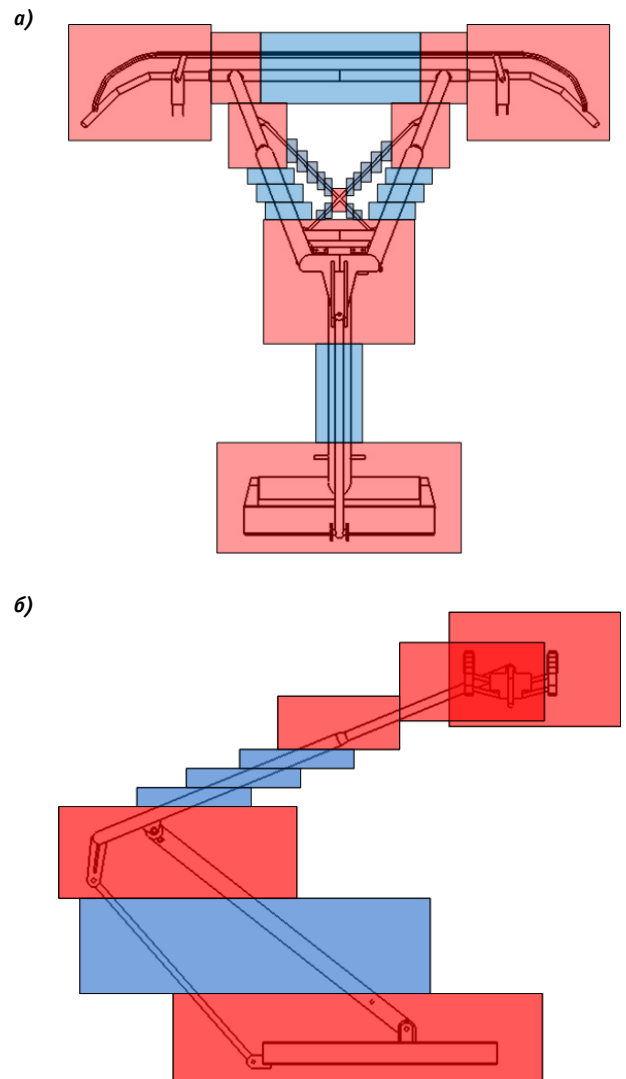
**Рисунок 7** — Спектры обтекания скоростного асимметричного токоприемника: а — вид спереди; б — вид справа

На основании исследований спектров обтекания, аэродинамической интерференции элементов токоприемника и толщины пограничного слоя авторами предложено задавать граничные условия при CFD-исследовании токоприемника в соответствии с рис. 8.

Аэродинамически подобные области указаны синим цветом, их можно разбить на более мелкие элементы и «продуть» только один раз, а затем применить принцип суперпозиции. Области, которые нельзя разбить на подобные элементы, обозначены красным цветом.

В настоящее время в лаборатории «КС и ЛЭП» ОмГУПС ведется работа над процессом алгоритмизации и автоматизации разбиения рабочей области на отдельные блоки для применения разработанного метода «поэлементного CFD-анализа».

Таким образом, авторами были получены следующие результаты.



**Рисунок 8** — Граничные условия при CFD-анализе токоприемника с аэродинамически подобными областями при применении «поэлементного CFD-анализа»: а — вид спереди; б — вид справа



1. Рассмотрен способ моделирования газодинамических процессов посредством ПЭВМ с использованием CFD-метода. Проведен обзор существующих на сегодняшний день CFD-моделей турбулентности и приведен программный комплекс, использующий выбранную CFD-модель.

2. На основании численного CFD-исследования полоза токоприемника типа АХ доказана эффективность «поэлементного CFD-анализа».

3. На основе анализа аэродинамического подобия элементов токоприемника даны рекомендации по заданию граничных условий при проведении CFD-исследований токоприемника с применением «поэлементного CFD-анализа».

4. Использование предложенного метода позволило сократить время расчета аэродинамических сил токоприемника по сравнению с ранее применяемыми.

## Литература

1. Выбор подхода к определению турбулентной скорости распространения пламени в цилиндре газового двигателя / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Кабанов, Г.В. Майстренко и др. // Вестник национального технического университета «ХПИ». 2009. № 47. С. 112 — 126.

2. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.

3. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2001. 108 с.

4. Паранин А.В. Математическое моделирование силового воздействия ветра на провода контактных подвесок с учетом турбулентного отрывного течения // Транспорт Урала. 2009. № 3. С. 103 — 107.

5. Соляник П.Н., Сургайло М.Л., Чмовж В.В. Экспериментальная аэродинамика: учеб. пособие по лабораторному практикуму. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. 96 с.

6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.

## References

1. Vbor podkhoda k opredeleniy turbulentnoj skorosti rasprostraneniya plameni v tsilindre gazovogo dvigatelya [The Approach to the Determination of Turbulent Flame Spreading Velocity in the Gas Engine Cylinder] / Abramchuk F.I., A. Kabanov G.V., Maystrenko V., et al. / Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "ХПИ". 2009, № 47. p. 112 - 126.

2. SolidWorks 2007/2008. Kompjyternoye modelirovaniye v injenernoy praktike [Computer Modeling in Engineering Practice] / Alyamovskiy A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V., et al. St. Petersburg.: BHV-Petersburg, 2008, 1040 p.

3. Belov I.A., Isaev S.A. Modelirovaniye turbulentnikh techeniy [Modeling of Turbulent Flows] / Balt. gos. tekhn. univ. St. Petersburg., 2001. 108 p.

4. Paraniin A.V. Matematicheskoye modelirovaniye silovogo vozdeystviya vetra na provoda kontaktnikh podvesok s uchetom turbulentnogo otrivnogo techeniya [Mathematical Modeling of the Wind Power on the Wires of Wire Suspensions with Account of the Turbulent Separated Flow] / Transport of the Urals. 2009. №3. p. 103 - 107.

5. Solyanik P.N., Surgaylo M.L., Chmovzh V.V. Eksperimentalnaya aerodinamika: uchebnoye posobiye po laboratornomu praktikumu. [Experimental Aerodynamics: textbook for laboratory practicum.] Kharkov: Nats. Aerokosm Univ. "Kharkiv. aviats. Inst.", 2007. 96 p.

6. Schlichting G. Teoriya pogranychogo sloya [Theory of the Boundary Layer]. Moscow: Nauka, 1974. 712 p.

УДК 537.8

Альфия Резавановна Закирова, старший преподаватель кафедры НОЦ «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
 Константин Борисович Кузнецов, доктор технических наук, профессор кафедры НОЦ «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## ОЦЕНКА ЭМП НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Alfiya R. Zakirova, senior lecturer of "Technosphere safety" SEC department, Ural State University of Railway Transport (USURT)

Konstantin B. Kuznetsov, DSc, prof. of "Technosphere safety" SEC department, Ural State University of Railway Transport (USURT)

## Evaluation Of Electromagnetic Fields At Workplaces Of Traction Power Supply Electrical Workers

### Аннотация

Электротехнический персонал электроустановок тягового электроснабжения подвергается воздействию комплекса вредных факторов производственной среды, основными из которых являются электрическое (ЭП) и магнитное поля (МП). Рассмотрены вопросы влияния ЭМП на персонал тягового электроснабжения. На рабочих местах проанализированы уровни напряженности МП и ЭП с учетом высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока в частотном диапазоне до 10 кГц. В ряде случаев уровни напряженности МП частотой 50 Гц превышают нормируемые значения. Предложено устройство для защиты персонала от вредного влияния МП.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, персонал тягового электроснабжения, высшие гармонические составляющие выпрямленного тока и напряжения, защита от магнитных полей.

### Abstract

Electrical workers of electric traction power supply are exposed to a complex of harmful industrial factors; the main ones are electrostatic (EF) and magnetic fields (MF). The problems of EMF impact on the traction power supply staff are discussed. Levels of EF and MF intensity at the workplace have been analyzed with the higher harmonic components of the rectified voltage and the current in the frequency range up to 10 kHz. In some cases, the levels of magnetic intensity at 50 Hz exceed the nominal values. A device for the staff protection from the MP harmful effects is suggested.

**Key words:** electromagnetic field, traction power supply staff, higher harmonic components of the rectified voltage and current, protection against magnetic fields.

Электротехнический персонал электроустановок тягового электроснабжения по роду своей деятельности подвергается воздействию электромагнитных полей от целого ряда гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока в диапазоне от 0 до 10 кГц.

Проведенные отечественными и зарубежными специалистами физиологические исследования свидетельствуют о вредном воздействии электромагнитного поля (ЭМП) низкой частоты (НЧ) на организм человека [1 — 6], в результате такого воздействия возникают заболевания сердечно-сосудистой, нервной, эндокринной, иммунной систем, а также лейкоемия и опухоли головного мозга.

Исследование статистики показало [7], что за 25 лет количество обращений работников Западно-Сибирской железной дороги — филиала ОАО «РЖД» в медицинские учреждения по некоторым заболеваниям существенно возросло в сравнении с контрольными группами городских жителей: по заболеваниям злокачественных опухолей — более чем в два раза, по заболеваниям эндокринной системы и системы кровообращения — в четыре раза. Можно предполагать, что рост обращений связан с множеством причин, однако здесь нельзя исключать вредное воздействие ЭМП.

Результаты статистического исследования данных о заболеваниях электротехнического персонала на полигоне Свердловской железной дороги [4] свидетельствует, что персонал локомотивных бригад обращается в медицинские учреждения с заболеваниями нервной и эндокринной систем, системы кровообращения и крови, новообразованиями от 5,8 до 10,7 раз чаще, чем персонал неэлектротехнический (персонал локомотивных бригад тепловозов на участках без электрической тяги). С большой степенью вероятности это связано и с вредным воздействием ЭМП спектра частот выпрямленного тока и напряжения.

Считается, что в идеальной электроэнергетической системе энергия должна передаваться при номинальных значениях частоты и напряжения, не изменяющихся во времени. В

реальных энергосистемах эти условия не выполняются. Отклонение форм кривых тока и напряжения от правильной синусоиды обычно представляют с помощью гармонических составляющих.

Выпрямительные преобразователи ТП служат генераторами высших гармоник тока и напряжения [8 — 9]. Помимо постоянного ЭМП и переменного ЭМП промышленной частоты на рабочих местах персонала присутствует переменное ЭМП высших гармонических составляющих выпрямленного тока и напряжения с частотой в диапазоне до 10 кГц.

Вредное воздействие электромагнитных полей связано с длительным нахождением персонала в электроустановках разного уровня напряжений, в том числе выпрямленного напряжения и тока, включающего спектр высших гармонических составляющих повышенной частоты.

В общем случае частота  $f_k$  при симметричном питающем напряжении (коэффициент несимметрии равен 1) определяется следующим образом [10]:

$$f_k = f_c \cdot k \text{ и } k = m \cdot e, \quad (1)$$

где  $e$  — натуральный ряд целых чисел от 1 до  $\infty$ ;  
 $f_c$  — частота тока питающей сети, Гц;  
 $m$  — число пульсаций выпрямленного напряжения.

Поэтому частоту возникающего ЭМП можно представить в виде ряда 100, 200, 300, 400, 500 и т. д. через каждые 100 Гц и теоретически до бесконечности.

Частота  $f_k$  при симметричном питающем напряжении (коэффициент несимметрии больше 1) определяется следующим образом [10]:

$$f_k = f_c \cdot k \text{ и } k = 2 \cdot e. \quad (2)$$

Практика показывает появление на рабочих местах на тяговой подстанции ряда гармоник 50, 100 и 300 Гц. Возможно, это связано с несимметричным питающим напряжением.

Наличие пульсаций выпрямленного напряжения ухудшает не только работу потребителей, но и оказывает вредное влияние на обслуживающий электротехнический персонал.

Гармоники выпрямителя тяговой подстанции снижаются сглаживающими фильтрами, состоящими из реактора и ряда включенных параллельно друг другу индуктивно-емкостных контуров. Необходима оценка эффективности работающих сглаживающих фильтров.

С помощью виртуальной модели выпрямителя [11] можно теоретически оценить на рабочих местах персонала тягового электроснабжения уровни напряженности ЭП и МП высших гармонических составляющих выпрямленного тока и напряжения. Данная модель позволит получить спектр высших гармонических составляющих выпрямленного тока и напряжения при идеальной работе сглаживающего фильтра, гармонический состав которого можно сравнить с гармоническим составом выпрямленного тока и напряжения на действующих тяговых подстанциях.

Для оценки электромагнитных полей на рабочих местах персонала тяговой подстанции с учетом высших гармонических составляющих проведены экспериментальные исследования уровней напряженности ЭП и МП в машинном зале

РУ-3,3 кВ (рис. 1). Измерения проведены прибором «Экофизика» МИ ПКФ-09-001 в соответствии с методикой измерения ЭМП, обеспечивающим автоматическое измерение модулей напряженностей ЭП и МП при любой ориентации датчика в пространстве с допустимой относительной погрешностью измерения не более 20%.



Рисунок 1 — Машинный зал РУ-3,3 кВ

Проведены измерения напряженности ЭП и МП от «+» и «-» шины на высоте 1,8 м от поверхности пола и на расстоянии 0,5 м от него. Эскиз помещения с расположением точек измерения приведен на рис. 2 — 3.

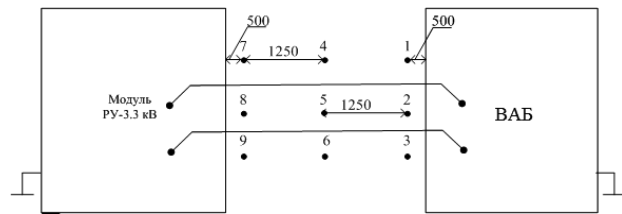


Рисунок 2 — Эскиз расположения шин от модуля РУ-3,3 кВ до автоматического быстродействующего выпрямителя ВАБ, вид сверху

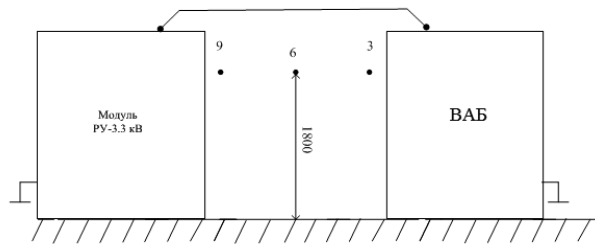


Рисунок 3 — Эскиз шин от модуля РУ-3,3 кВ до автоматического быстродействующего выпрямителя ВАБ, вид сбоку

Исследования проведены при температуре +18°C, относительной влажности 40%; температура наружная -25°C, ветер 3 — 5 м/с; рабочее напряжение  $U_{\text{раб}} = 3,3$  кВ, рабочий выпрямленный ток  $I_{\text{раб}}$  до 1000 А; коэффициент загрузки сети 0 — 1.

В табл. 1 приведены результаты анализа напряженности МП в точках № 1 — 9 под шинным мостом в РУ-3,3 кВ.

Таблица 1 — Анализ напряженности МП (А/м) под шинным мостом в РУ-3,3 кВ

$f_{кр}, \text{Гц}$	№ точки									$H_{норм}, \text{А/м}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
50	8	6	12	125	125	125*	15	8,5	6,5	80
100	6	5	5	8	10	9	6	5	4	Не норм.
200	2	1	1	5	7	7	3	2	2	Не норм.
250	5	4	0	18	18	18	15	4	4	Не норм.
350	3	2	2	10	10	5	11	3	3	Не норм.
400	0,5	0,5	0,7	2	2	2	1	0,5	0,8	Не норм.
500	0,5	0,5	0,7	0,2	0,1	0,2	0,5	0,5	0,8	Не норм.
550	0,5	0,5	0,7	7	6	8	7	0,5	0,8	Не норм.
$I_{дл}, \text{А}$	400	300	600	1000	1000	1000	750	420	350	

\*Выделенные значения превышают нормируемые по СанПиН 2.2.4.1191-03.

Из табл. 1 видно, что определенным значениям тока и частоты соответствует свое значение напряженности МП. Для точек № 4 — 6 уровни напряженности МП составляют 125 А/м, что превышает значения ПДУ МП по [12] в 1,5 раза. Значения напряженности МП, указанные для данных точек, представляют опасность для здоровья электротехнического персонала. Возникает необходимость в разработке средств защиты для ограничения времени влияния МП на персонал.

Показано, что при выпрямленных токах, значительно превышающих 1000 А, измеренные значения напряженности МП от высших гармонических составляющих переменного тока, приведенные к частоте 50 Гц, могут достигнуть десятикратного превышения значения действующих норм.

В табл. 2 приведены результаты анализа напряженности ЭП в точках № 1 — 9 под шинным мостом в РУ-3,3 кВ.

Таблица 2 — Анализ напряженности ЭП (В/м) под шинным мостом в РУ-3,3 кВ

$f_{кр}, \text{Гц}$	$U_{раб} = 3,3 \text{ кВ}$									$E_{норм}, \text{В/м}$
	№ точки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
25	12	8	12	28	12	12	17	53	12	Не норм.
50	9	9,8	10	17	10	42	42	14	10	5000
100	2	2	2	4	2	3	3	4	2	Не норм.
150	5	7,5	5	8	7	7	8	8	7	Не норм.
200	1	0,7	0,6	1	0,8	0,9	1	1	1	Не норм.
300	2	3	2	4	3	4	3	3	3	Не норм.
400	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	Не норм.
500	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Не норм.
600	1	2,1	1	3	2	0,3	3	3	2	Не норм.

Из табл. 2 видно, что величине рабочего напряжения РУ и частоте соответствует определенное значение напряженности ЭП.

Уровни напряженности ЭП под шинным мостом (от ВП до ячеек РУ-3,3 кВ) представляют собой небольшие значения, что обусловлено для ряда измеряемых точек нахождением токоведущих частей над металлическими ячейками, где силовые линии напряженности ЭП от шин, проходящих над ячейками, замыкаются на них. Для уровня напряженности ЭП характерны неизменные значения величин напряженности, так как напряжение электроустановок практически остается неизменным. Уровни напряженности ЭП не являются опасными для

здоровья электротехнического персонала и не представляют интереса для дальнейших исследований, в отличие от МП.

Проведена оценка МП под отходящими шинами выпрямительного преобразователя (ВП) на расстоянии 1,8 м от поверхности пола и на расстоянии 0,5 м от него. Эскиз помещения и расположение точек измерения приведены на рис. 4.

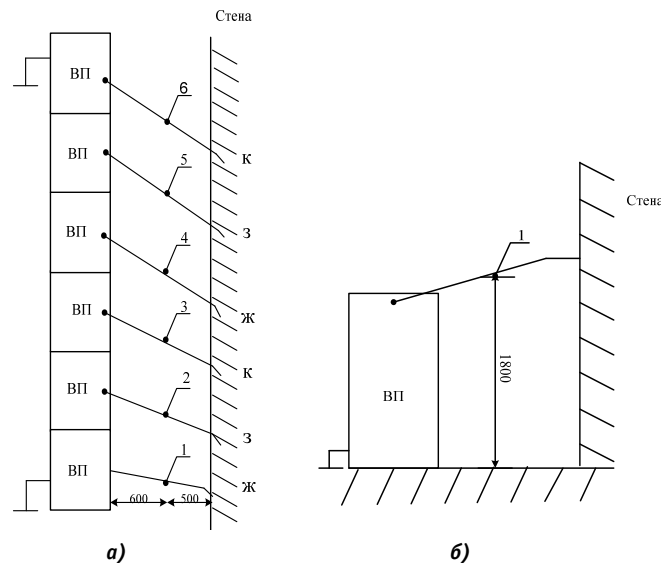


Рисунок 4 — Эскиз шин от ВП: а — вид сверху; б — вид сбоку

В табл. 3 приведены результаты анализа напряженности МП в точках № 1 — 6 под отходящими шинами ВП.

Таблица 3 — Анализ напряженности МП (А/м) под отходящими шинами ВП

$f_{кр}, \text{Гц}$	№ точки						$H_{норм}, \text{А/м}$
	1	2	3	4	5	6	
50	125	125	125	125	125	125*	80
100	6	10	5	8	10	9	Не норм.
200	3	2	2	3	4	2	Не норм.
250	18	18	17	18	18	18	Не норм.
350	15	2	2	10	16	10	Не норм.
400	0,5	0,2	0,2	0,1	0,5	0,5	Не норм.
500	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Не норм.
550	0,5	8	7	7	8	8	Не норм.
$I_{дл}, \text{А}$	1000	1000	1000	1000	1000	1000	

\*Выделенные значения превышают нормируемые по СанПиН 2.2.4.1191-03.

Из табл. 3 видно, что определенной величине тока и частоте соответствует свое значение напряженности МП. Для точек № 1 — 6 напряженность МП составляет 125 А/м, что превышает значения ПДУ МП по [12] в 1,5 раза. Возникает необходимость в разработке средств защиты для снижения продолжительности воздействия МП.

Результаты измерений напряженности ЭП в точках № 1, № 3, № 6 при  $U_{раб} = 3,1 \text{ кВ}$  приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что наибольшее значение напряженности ЭП отмечено при частоте 50 Гц и составляет 73 В/м, что не превышает уровень ПДУ (0,5 кВ/м). Уровень напряженности

Таблица 4 — Анализ напряженности ЭП (В/м) под шинным мостом в РУ-3,3 кВ

№ точки $f_{ст}$ Гц	1	3	6	$E_{норм}$ В/м
25	60	50	50	Не норм.
50	72	73	55	5000
100	68	69	69	Не норм.
150	44	45	44	Не норм.
200	32	31	31	Не норм.
300	20	20	20	Не норм.
400	17	18	18	Не норм.
500	12	13	12	Не норм.
600	10	10	10	Не норм.

ЭП для частоты 50 Гц в рассмотренных точках, как и в точках предыдущих измерений ЭП, не представляет опасности для здоровья электротехнического персонала.

Основной задачей охраны труда является защита электротехнического персонала тягового электроснабжения от вредных производственных факторов, в частном случае — от МП. Представленные данные при определенных условиях свидетельствуют о вредных условиях труда на рабочих местах электротехнического персонала тягового электроснабжения. В настоящее время отсутствуют какие-либо измерительные и сигнальные средства для контроля уровня МП, воздействующего на электротехнический персонал, поэтому необходима разработка технических предложений по защите персонала от МП, например, с использованием устройств контроля напряженности магнитного поля.

Для сохранения жизни и защиты здоровья персонала от МП предлагается использовать способ контроля уровня напряженности МП [13] и реализующее этот способ сигнализирующее устройство о превышении уровня нормируемой напряженности МП (рис. 5).

Устройство работает следующим образом. Переменное магнитное поле 10 электроустановки переменного тока 1 воздействует на спиралевидную рамку 3 антенного датчика 2, подключенного к блоку питания (на схеме не представлен), создает в нем переменный ток, пропорциональный величине напряженности воздействующего магнитного поля 10. Полученный сигнал переменного тока поступает на вход усилителя 4, имеющего входное полное сопротивление, близкое к нулю. На выходе усилителя 4 формируется сигнал переменного напряжения, кратный величине входящего переменного тока. Переменное напряжение с выхода усилителя 4 поступает на звено частотной коррекции 5, учитывающее особенности частотных свойств антенного датчика 2 и усилителя 4. После звена частотной коррекции 5 на вход порогового элемента 6 подается сигнал переменного напряжения с заданной величиной, соответствующей напряженности магнитного поля в 100 мкТл. При этом если величина сигнала переменного напряжения будет ниже соответствующего ему максимального предельно допустимого уровня напряженности магнитного поля в 100 мкТл, то на сигнальном устройстве 7 горит зеленая лампа 8. При превышении максимального предельно допустимого уровня напряженности магнитного поля сигнал с порогового элемента 6 поступает на красную лампу 9 сигнального устройства 7.

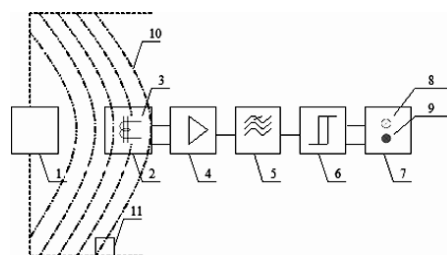


Рисунок 5 — Схема устройства контроля уровня напряженности магнитного поля электроустановок переменного тока

Применение предлагаемого способа и устройства для его осуществления обеспечивает непрерывный контроль напряженности магнитного поля и позволяет предупредить персонал о превышении его предельно допустимого уровня.

При оценке напряженности ЭМП по существующим в настоящее время нормативным документам [12, 14] не учитывается спектр частот до 10 кГц (кроме 50 и 10 кГц). Нормы некоторых стран и соответствующие им энергетические нагрузки для диапазона частот до 10 кГц представлены в табл. 5.

Анализ нормирования напряженности ЭМП низкочастотного (НЧ) диапазона в разных странах показывает, что встречаются противоречия для одного и того же диапазона частот: нормируются разные уровни напряженности ЭМП, причем величины нормируемых значений отличаются в десятки и даже сотни раз.

Таблица 5 — Нормируемые параметры ЭМП при общем воздействии в низкочастотном диапазоне

Страна	Частота $f$ , Гц	Напряженность ЭП, кВ/м	Напряженность МП, А/м
Великобритания (профессионалы и население)	24 — 600	25 — 1	2667 — 107
	750 — 1000	1	85 — 64
	>1000	1	64
Япония (профессионалы и население)	50/60	3	—
	>100	0,614	163
	>10000	0,275	72,8
Республика Корея (профессионалы и население)	8 — 25	20	2500
	25 — 820	20 — 0,61	800 — 24,4
	>820	0,61	24,4
Directive 2004/40/EC	25 — 820	500/f	20/f
	820 — 2500	610	24,4
	2500 — 10000	610	24,4
Россия СанПиН 2.2.4.1191-03	50	5,0	80,0

В настоящее время директивой ЕС (Directive 2004/40/EC) установлены допустимые уровни напряженности ЭП и МП для частотного диапазона от 0 до 300 ГГц. Предлагается использовать зависимость значений напряженности МП (А/м) и ЭП (В/м) от частоты по Европейской директиве для частотного диапазона от 50 до 820 Гц.

Допустимые уровни напряженности по директиве ЕС [15] в зависимости от частоты используются для приведения значения напряженности МП от высших гармонических составляющих выпрямленного тока к нормируемым значениям напряженности МП для частоты 50 Гц по СанПиН 2.2.4.1191-03. Появляется

возможность получить расчетные значения напряженности МП переменного тока в частотном диапазоне от 50 до 820 Гц.

Зависимость значений напряженности МП (А/м) и ЭП (В/м) от частоты с использованием нормируемого значения для 50 Гц  $H_{норм}$  в этом случае с использованием российских нормируемых значений напряженности будет иметь вид

$$H_{рФ50} = \alpha_{МП} \frac{20}{f} \text{ и } E_{рФ50} = \alpha_{ЭП} \frac{500}{f}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{МП}$  и  $\alpha_{ЭП}$  — коэффициенты приведения для магнитной и электрической составляющих ЭМП;

$f$  — частота, Гц.

Коэффициент приведения

$$\alpha_{МП} = \alpha_{ЭП} = 0,02 \cdot f. \quad (4)$$

Воздействие на электротехнический персонал суммарного спектра напряженности МП и индукции МП от высших гармонических составляющих  $H_{пр}$  (А/м) и  $B_{пр}$  (Тл), приведенных к частоте 50 Гц, можно оценить из соотношения

$$H_{пр} = \sum_{j=1\Gamma\text{ц}}^{10\text{кГц}} \alpha_{МП} H_i \text{ и } B_{пр} = \sum_{j=1\Gamma\text{ц}}^{10\text{кГц}} \alpha_{МП} B_i, \quad (5)$$

где  $H_i$  — измеренные значения напряженности МП;

$B_i$  — измеренные значения индукции МП.

Анализ приведенных значений напряженности МП к частоте 50 Гц под шинным мостом в РУ-3,3 кВ при среднем токе тяговой подстанции (3000 А) представлен в табл. 6.

**Таблица 6 — Анализ приведенных значений напряженности МП к частоте 50 Гц под шинным мостом в РУ-3,3 кВ при среднем токе тяговой подстанции (3000 А)**

№ точки $f_k$ Гц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$H_{норм}$ , А/м
50	60	60	60	375	375	375	60	61	56	80
100	90	100	50	48	60	54	48	71	69	40
200	60	40	20	60	84	84	48	58	68	20
250	188	200	0	270	270	270	300	143	173	16
350	158	140	70	210	210	105	308	151	179	11
400	30	40	28	48	48	48	32	28	56	10
500	38	50	35	6	3	6	20	35	70	8
550	41	55	39	231	198	264	308	39	77	7

При пересчете экспериментальных значений под шинным мостом для реальных значений тока тяговой подстанции уровни напряженности МП на рабочих местах могут превышать ПДУ МП (80 А/м) [12] для разных точек измерения в 4,6 раз.

Воздействие суммарного спектра напряженности ЭП от высших гармонических составляющих  $E_{пр}$  (В/м)

$$E_{пр} = \sum_{j=1\Gamma\text{ц}}^{10\text{кГц}} \alpha_{ЭП} E_i. \quad (6)$$

Для частотного диапазона от 10 до 820 Гц значения ПДУ МП рекомендуется принимать в соответствии с директивой ЕС [14] равными 24,4 А/м, а значения ПДУ ЭП — равными 610 В/м.

Анализ приведенных значений напряженности ЭП под шинным мостом в РУ-3,3 кВ к частоте 50 Гц показан в табл. 7.

**Таблица 7 — Анализ приведенных значений напряженности ЭП к частоте 50 Гц**

№ точки $f_k$ Гц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$E_{норм}$ , В/м
25	6	4	6	14	6	6	8,5	26,5	6	10000
50	9	9,8	10	17	10	42	42	14	10	5000
100	4	4	4	8	4	6	6	8	4	2500
150	15	22,5	15	24	21	21	24	24	21	1667
200	4	2,8	2,4	4	3,2	3,6	4	4	4	1250
300	12	18	12	24	18	24	18	18	18	833
400	4	1,6	1,6	2,4	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	625
500	2	1	1	1	1	1	1	1	1	500
600	12	25,2	12	36	24	3,6	36	36	24	417
$\Sigma E_i$ , В/м	68	88,9	64	130	88,8	109	141,1	133,1	89,6	

\* По методическим указаниям «Критерии оценки ЭМП в производственных условиях для частотного диапазона до 10 кГц».

Из табл. 7 видно, что уровни напряженности ЭП не превышают ПДУ, предлагаемых в методических указаниях «Критерии оценки ЭМП в производственных условиях для частотного диапазона до 10 кГц».

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Результаты статистических исследований свидетельствуют о том, что электротехнический персонал обращается в медицинские учреждения с заболеваниями нервной и эндокринной системы, системы кровообращения и крови, новообразованиями от 5,8 до 10,7 раз чаще, чем персонал неэлектротехнический.

2. Впервые на рабочих местах в РУ-3,3 кВ исследованы уровни напряженности ЭП и МП с учетом высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения и тока в частотном диапазоне до 10 кГц. Показано, что уровни напряженностей ЭП не превышают допустимых значений при любых режимах работы тяговых подстанций. Уровень магнитных полей как для отдельных гармоник выпрямленного тока, так и при комплексном воздействии спектра гармонических составляющих, приведенных по разработанной методике к частоте 50 Гц, во многих случаях превышает нормируемые значения.

3. Для сохранения жизни и защиты здоровья персонала от МП предлагается использовать способ контроля уровня напряженности МП и реализующее этот способ устройство.

4. Для решения проблемы нормирования напряженности ЭМП частотой до 10 кГц на электротехнический персонал разработаны «Критерии оценки ЭМП в производственных условиях для частотного диапазона до 10 кГц». Появилась возможность установить ПДУ ЭМП с учетом одновременного воздействия нескольких полей разного диапазона частот. Такая методика легко применима при контроле ЭМП, в том числе и при аттестации рабочих мест.

5. В дальнейших исследованиях возникает необходимость более глубокого рассмотрения уровней вредного воздействия МП с учетом различных схем выпрямления выпрямительных преобразователей, условий работы электроподвижного состава, конструктивного устройства тяговых подстанций, эффективности применяемых сглаживающих фильтров с помощью модели виртуального выпрямителя.

## Литература

1. Влияние электромагнитных полей на организм человека : сборник научных статей. М. : Фонд «Новое тысячелетие», 1998. 214 с.
2. Григорьев О.А. Электромагнитные поля и здоровье человека. Состояние проблемы // Энергия . 1999. № 5. С. 26 — 32.
3. Григорьев Ю.Г., Степанов В.С., Григорьев О.А. Электромагнитная безопасность человека : справочно-информационное издание / Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения. М. : Изд-во РУДН, 1999. 145 с.
4. Закирова А.Р. Защита электротехнического персонала тягового электроснабжения от вредного воздействия электромагнитных полей : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2013. 160 с.
5. Закирова А.Р. Оценка вредных факторов воздействия электромагнитного поля на персонал тяговых подстанций. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2010. 82 с.
6. Закирова А.Р., Кузнецов К.Б. О риске вредного воздействия на человека ЭМП электрических установок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2012. Вып. 17. № 16. С. 56 — 61.
7. Ширшов А.Б. Средства защиты от вредного и опасного воздействия электромагнитных полей тяговой сети : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2006. 104 с.
8. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. М. : Транспорт, 1999. 464 с.
9. Кузнецов К.Б., Мишарин А.С. Электробезопасность в электроустановках железнодорожного транспорта. Екатеринбург : Изд-во УрГАПС. 1999. 435 с.
10. Низов А.С. Электромагнитная совместимость : методическое пособие с заданиями, методическими указаниями, справочными материалами. Екатеринбург, 2006. 68 с.
11. <http://epa.susu.ac.ru/assets/files/PromElektronika/VirtLR3.pdf>
12. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. М. : Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. 38 с.
13. Пат. 2436111 Российская Федерация Способ контроля уровня напряженности магнитного поля электроустановок переменного тока и устройство для его осуществления / А.Р. Закирова, К.Б. Кузнецов К.Б.; заявл. 10.12.11; опубл. 10.12.11. Бюл. № 34.
14. Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда // Бюллетень нормативных и методических документов Госсанэпиднадзора. 2005. Вып. 3 (21).
15. Directive 2004/40/EC on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents // Official Journal of the Europe Union. L 159. 30.04.04.

## References

1. Vliyaniye elektromagnitnykh poley na organizm cheloveka. Sbornik nauchnykh statey. [The influence of electromagnetic fields on the human body. Collected articles] M.: Fond Novoye tysyacheletiyе. 1998. 214 s.
2. Grigoryev O.A. Elektromagnitnyye polya i zdorovye cheloveka. Sostoyaniye problemy [Electromagnetic fields and human health. State of the issue] // Energiya. 1999. No. 5. s. 26 32.
3. Grigoryev Yu.G., Stepanov V.S., Grigoryev O.A. Elektromagnitnaya bezopasnost cheloveka: Spravochno-Informatsionnoye izdaniye [Human electromagnetic safety: Reference and Information Book] / Rossiyskiy nationalnyy komitet po zashchite ot neioniziruyushchego izlucheniya. [Russian National Committee on Non-Ionizing Radiation Protection] M. Izd-vo RUDN, 1999. 145 s.
4. Zakirova A.R. Zashchita elektrotekhnicheskogo personala tyagovogo elektrosnabzheniya ot vrednogo vozdeystviya elektromagnitnykh poley [Protecting traction power supply workers from the harmful effects of electromagnetic fields]: Dis. ... kand. tekhn. nauk Ekaterinburg, 2013. 160 s.
5. Zakirova A.R. Otsenka vrednykh faktorov vozdeystviya elektromagnitnogo polya na personal tyagovykh podstantsiy. [Evaluation of harmful effects of electromagnetic fields on the traction substations staff] Ekaterinburg: Izd-vo USURT, 2010. 82 s.
6. Zakirova A.R., Kuznetsov K.B. O riske vrednogo vozdeystviya na cheloveka EMP elektricheskikh ustanovok [About the risk of electrical installations' EMF harmful effects on humans] // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika." 2012. Issue 17. No. 16. s. 56–61.
7. Shirshov A.B. Sredstva zashchity ot vrednogo i opasnogo vozdeystviya elektromagnitnykh poley tyagovoy seti [Means of protection from the harmful and hazardous effects of power traction electromagnetic fields]: Dis. ... kand. tekhn. Nauk. Ekaterinburg, 2006. 104 s.
8. Burkov A.T. Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli. [Electronic equipment and transmitters] M.: Transport, 1999. 464 s.
9. Kuznetsov K.B., Misharin A.S. Elektrobezopasnost v elektroustanovkakh zheleznodorozhnogo transporta. [Electrical safety in railways' electric facilities] Ekaterinburg : Izd-vo UrGAPS. 1999. 435 s.
10. Nizov A.S. Elektromagnitnaya sovmestimost: Metodicheskoye posobiye s zadaniyami, metodicheskimi ukazaniyami, spravochnymi materialami. [Electromagnetic Compatibility: Textbook with tasks, guidelines, reference materials] Ekaterinburg, 2006. 68s.
11. <http://epa.susu.ac.ru/assets/files/PromElektronika/VirtLR3.pdf>
12. SanPiN 2.2.4.1191-03. Elektromagnitnyye polya v proizvodstvennykh usloviyakh. [Electromagnetic fields in the industrial environment] M.: Federalnyy tsentr Gossanepidnadzora Minzdrava Rossii [Federal Centre for Sanitary Inspection of the Ministry of Health of Russia], 2003. 38 s.
13. Zakirova A.R., Kuznetsov K.B. Sposob kontrolya urovnya napryazhennosti magnitnogo polya elektroustanovok peremennogo toka i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya. Pat. RF na izobreteniyе [Method for controlling the level of the electrical AC facilities magnetic field intensity and device for its implementation. RF pat. for invention] No. 2436111 dated 10.12.2011, publ. 10.12.2011. Bul. No. 34.
14. R 2.2.2006 – 05. Rukovodstvo po gigiyenicheskoy otsenke faktorov rabochey sredy i trudovogo protsessа. Kriterii i klassifikatsiya usloviy truda [Guide to hygienic evaluation of industrial environment and working process factors. Criteria and classification of working conditions] // Byulleten normativnykh i metodicheskikh dokumentov Gossanepidnadzora. 2005. Issue 3 (21).
15. Directive 2004/40/EC on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents //Official Journal of the European Union. L 159. 30.4.2004.

УДК 621.332.3

Александр Васильевич Ефимов, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,  
Игорь Григорьевич Дутов, аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

## РЕГУЛИРОВКА ЗИГЗАГОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПЕНСИРОВАННОЙ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ

Alexander V. Efimov, PhD, professor, "Transport power supply" department, Ural State University of Railway Transport, Igor G. Dutov, post-graduate student, "Transport power supply" department, Ural State University of Railway Transport

### Zigzags Adjustment Of Compensated Catenary

#### Аннотация

Рассмотрено влияние температуры на положение консолей и значение зигзагов контактного провода в пределах анкерного участка. Приведена методика расчета углов отклонения консолей от нормативного положения, учитывающая геометрические параметры контактной подвески. Проанализирован график изменения среднемесячной температуры в течение года. Предложена методика корректировки зигзагов контактного провода в зависимости от температуры и удаленности от средней анкеровки. Показано, что при проектировании значение зигзагов следует выбирать на основе тяговых и теплотехнических расчетов для конкретного профиля пути, на котором располагается анкерный участок.

**Ключевые слова:** контактная подвеска, изменение зигзагов, температура проводов, отклонение консоли, анкерный участок, корректировка зигзагов, контактные пластины, обрыв проводов, длина пролета, аварийный зигзаг.

#### Abstract

The influence of temperature on the arm position and the values of the contact wire stagger within the anchor area is viewed. The calculating methods of the arm deviation angles from specified position, taking into account the geometric parameters of catenary are given. The analysis of the chart change of average monthly temperature during a year is given. The technique of adjusting the contact wire staggers, depending on the temperature and the distance from the middle anchoring is presented. It is noted that for designing, the values should be selected on the basis of traction and thermal calculations for a specific track profile with anchor area.

**Key words:** catenary, zig zag changes, wire temperature, arm deviation, anchor area, zig zag adjustment, contact plates, broken wires, span length, emergency zig zag.

При электрификации участков железных дорог, на которых осуществляется или планируется движение подвижного состава со скоростью свыше 200 км/ч, как правило, используется вертикальная компенсированная контактная подвеска. В частности, такая подвеска была применена при строительстве контактной сети участка Москва — Санкт-Петербург [1].

На работу контактной подвески оказывает существенное влияние большое количество случайных климатических факторов, таких как температура, сила давления ветра, толщина стенки гололеда и т. д. Под действием всех этих факторов происходит отклонение провода от начального положения, которое может привести к сходу его с полоза токоприемника, поломке токоприемника или обрыву провода. Устранение последствий подобных повреждений — весьма длительный и трудоемкий процесс, который, как правило, приводит к сбоям в графике движения поездов. Для того чтобы не допустить подобных инцидентов, отклонению проводов контактной подвески следует уделять очень большое внимание.

#### Исследование влияния температуры проводов контактной подвески на положение консолей

При изменении температуры изменяется длина проводов, и, следовательно, все консоли компенсированной подвески отклоняются от проектного положения. Значение угла отклонения консоли тем больше, чем ближе расположена эта консоль (точнее, опора с этой консолью) к границе анкерного участка (АУ). В результате происходит смещение контактной подвески как вдоль оси пути, так и поперек. Смещение ее в плоскости, параллельной оси пути, не оказывает особого влияния на работу линии, так как является незначительным по сравнению с длиной пролета, а вот в плоскости, перпендикулярной оси пути, достигает ощутимых значений и при определенных условиях может привести к сходу контактного провода с полоза токоприемника. Чтобы определить, насколько велико смещение контактной подвески, необходимо рассчитать углы отклонения консолей на протяжении всего АУ в зависимости от температуры.

Существующая на данный момент методика определения отклонения консолей [2] основана на расчете изменения длины



провода под действием температуры без учета геометрических параметров контактной подвески. Мы приведем свою методику.

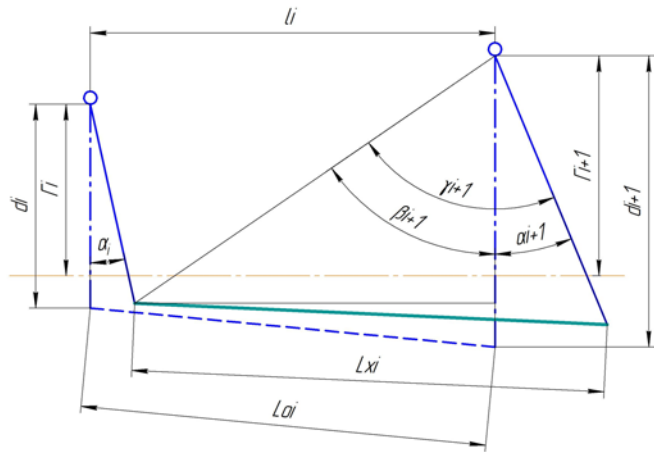


Рисунок 1 — Расчет угла поворота консоли на прямом участке пути

Для определения углов отклонения консолей на прямом участке пути (рис. 1) необходимо знать:

- габариты опор;
- длины консолей;
- длины пролетов между опорами.

Под длиной консоли будем понимать расстояние по горизонтали между двумя плоскостями, параллельными оси пути, в одной из которых располагается пята консоли, а в другой — точка фиксации проводов контактной сети. В случае когда применяется вертикальная контактная подвеска, эти расстояния для несущего троса и контактного провода будут одинаковыми.

Длина провода в одном пролете при температуре  $t_0 = +5^\circ\text{C}$  незначительно (менее 0,5%) отличается от длины пролета, поэтому за длину провода при температуре  $t_0 = +5^\circ\text{C}$  примем длину пролета.

Длина провода с учетом его температуры определяется из выражения

$$L_{xi} = L \cdot (1 + \alpha \cdot (t_x - t_0)), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения материала провода, для меди  $\alpha = 17 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$t_0$  — температура, при которой все консоли АУ расположены перпендикулярно (на прямом участке) либо радиально (на кривой) относительно оси пути, для расчета  $t_0 = +5^\circ\text{C}$ ;

$t_x$  — расчетная температура проводов контактной подвески.

Затем определим угол  $\beta_{i+1}$  (см. рис. 1) по формуле

$$\beta_{i+1} = \arctg \frac{l_i - d_i \cdot \sin \alpha_i}{d_i \cdot \cos \alpha_i + \Gamma_{i+1} - \Gamma_i}, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  — угол отклонения  $i$ -й консоли.

Расчет необходимо вести от опоры со средней анкеровой, так как при любой температуре положение консоли у этой опоры не меняется, следовательно, угол ее отклонения  $\alpha_0 = 0$ . Угол  $\gamma_{i+1}$  (см. рис. 1) найдем из выражения

$$\gamma_{i+1} = \arccos \frac{d_{i+1}^2 + (l_i - d_i \cdot \sin \alpha_i)^2 + (d_i \cdot \cos \alpha_i + \Gamma_{i+1} - \Gamma_i)^2 - L_{xi}^2}{2 \cdot d_{i+1} \cdot \sqrt{(l_i - d_i \cdot \sin \alpha_i)^2 + (d_i \cdot \cos \alpha_i + \Gamma_{i+1} - \Gamma_i)^2}}. \quad (3)$$

Угол отклонения  $i+1$ -й консоли определяется как разность углов  $\beta_{i+1}$  и  $\gamma_{i+1}$

$$\alpha_{i+1} = \gamma_{i+1} - \beta_{i+1}. \quad (4)$$

Для остальных консолей АУ расчет повторяется.

Для определения углов отклонения консолей на кривом участке пути, кроме габаритов опор, длин консолей и длин пролетов, необходимо знать радиус кривизны участка пути, а также определить, с какой стороны пути относительно центра кривой располагаются опоры. Для учета последнего фактора введем коэффициент  $r$ . Если суммарное усилие, действующее на консоль, направлено в сторону от опоры (опора стоит с внешней стороны кривой, консоль растянутая), как это показано на рис. 2а, то примем  $r = 1$ . Если же это усилие направлено в сторону опоры (опора стоит с внутренней стороны кривой, консоль сжатая), то  $r = -1$  (рис. 2б).

Численное значение угла  $\delta_i$  (см. рис. 2) определяется через

$$\sin \delta_i = \frac{l_i}{2 \cdot R_i}, \quad (5)$$

где  $R_i$  — радиус кривой;

$l_i$  — длина пролета.

Длину провода с учетом его температуры находим из выражения (1).

Для упрощения записи расчетных формул введем некоторые переменные  $A_i$  и  $B_i$ , которые будут равны:

$$A_i = l_i + r \cdot (\Gamma_i + \Gamma_{i+1}) \cdot \sin \delta_i - r \cdot d_i \cdot \sin(\delta_i + r \cdot \alpha_i); \quad (6)$$

$$B_i = d_i \cdot \cos(\delta_i + r \cdot \alpha_i) + (\Gamma_{i+1} - \Gamma_i) \cdot \cos \delta_i. \quad (7)$$

Угол  $\beta_{i+1}$  (см. рис. 2) найдем из выражения

$$\beta_{i+1} = \arctg \frac{A_i}{B_i} - r \cdot \delta_i, \quad (8)$$

а угол  $\gamma_{i+1}$  — из выражения

$$\gamma_{i+1} = \arccos \frac{d_{i+1}^2 + A_i^2 + B_i^2 - L_{xi}^2}{2 \cdot d_{i+1} \cdot \sqrt{A_i^2 + B_i^2}}. \quad (9)$$

Угол отклонения  $i+1$ -й консоли определяется как разность углов  $\beta_{i+1}$  и  $\gamma_{i+1}$  по выражению (4).

Необходимо отметить, что методика расчета для кривых участков пути является наиболее общей и подходит также для расчета углов поворота консолей и на прямых участках. В этом случае необходимо принять радиус кривой  $R = \infty$ , коэффициент  $r = 1$ .

### Исследование влияния температуры проводов на значение зигзагов контактной подвески

При повороте консоли под действием температуры происходит смещение точки фиксации проводов контактной подвески, а следовательно, увеличение либо уменьшение значения зигзага контактного провода. Определим значения этих изменений.

Значение зигзага контактного провода на прямом участке (рис 3а) определяется по формуле

$$Z_i = d_i \cdot \cos \alpha_i - \Gamma_i. \quad (10)$$

Методика определения зигзага контактного провода на кривой несколько сложнее, так как при изменении температуры точка фиксации изменяет свое положение относительно дугообразной, а не прямолинейной оси (рис 3б).

Для начала необходимо найти угол  $\omega_1$  из выражения

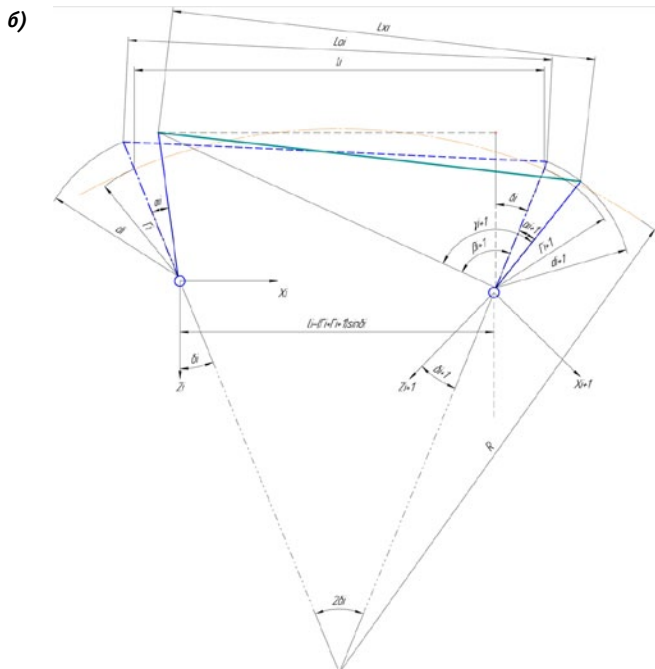
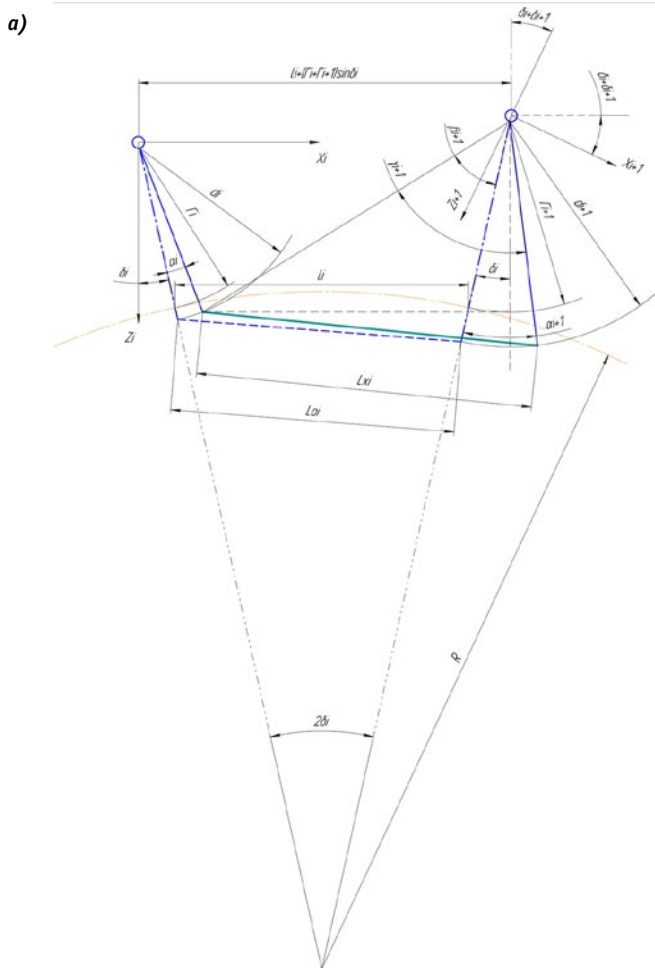


Рисунок 2 — Расчет углов поворота растянутых консолей на кривой

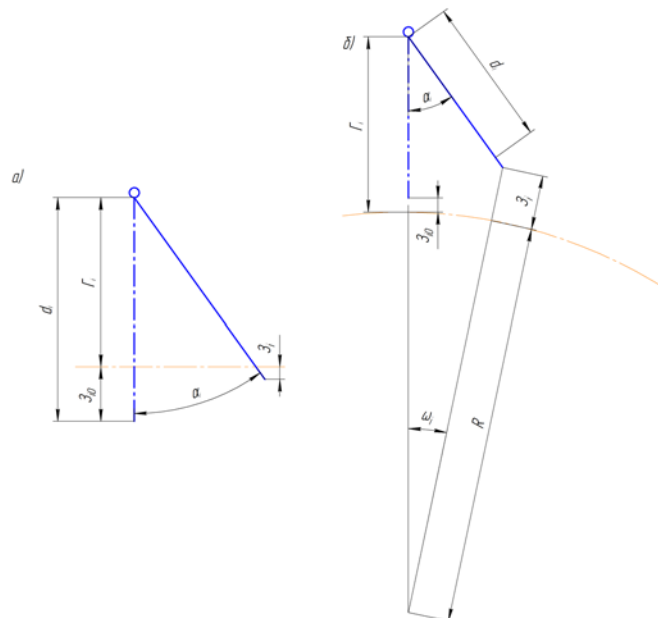


Рисунок 3 — Изменение зигзага контактного провода под действием температуры: а — на прямом участке, б — на кривой

$$\omega_i = \arctg \frac{d_i \cdot \sin \alpha_i}{R + r \cdot (\Gamma_i - d_i \cdot \cos \alpha_i)} \quad (11)$$

Далее значение зигзага определяется по формуле

$$z_i = \frac{R + r \cdot (\Gamma_i - d_i \cdot \cos \alpha_i)}{\cos \omega_i} - R \quad (12)$$

Расчеты показали, что при длине АУ, равной 1255 м, изменение температуры в допустимых пределах может вызвать увеличение зигзагов до 0,49 м на кривом и до 0,39 м на прямом участке, в то время как номинальное значение зигзага при температуре  $t_0 = +5^\circ\text{C}$  устанавливается для всех консолей  $\pm 0,4$  м и  $\pm 0,3$  м на кривом и прямом участке соответственно [3]. Таким образом, при изменении температуры отклонение величины зигзага от номинального значения может достигать 30%.

**Предложения по корректировке зигзагов при проектировании и монтаже**

На рис. 4 приведен усредненный график изменения среднемесячной температуры в течение года с 2001 по 2012 г. включительно для третьей климатической зоны [4].

В соответствии с [5], за  $t_0$  при расчетах принимается температура  $+5^\circ\text{C}$ . Однако, как мы видим из рис. 4, такая температура воздуха в течение года держится очень непродолжительное время — в переходные периоды (весной и осенью). Большую же часть времени в году температура находится значительно выше или ниже этой отметки.

Если на протяжении одного АУ рассмотреть положение консолей и, как следствие, значение зигзагов в зависимости от температуры, то получим картину, изображенную на рис. 5.

Графики, изображенные на рис. 5, получены в результате расчетов по описанной выше методике. Объектом исследова-

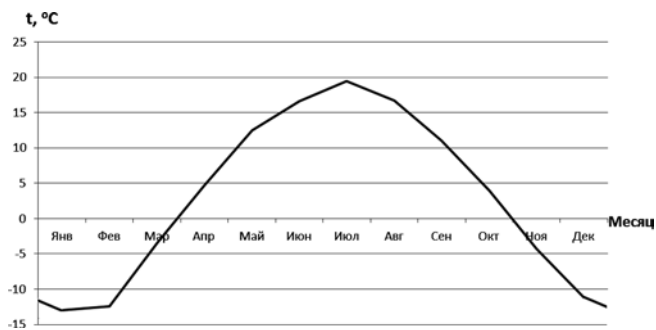


Рисунок 4 — График изменения среднемесячной температуры в течение года за 12 лет

ния был проектируемый анкерный участок контактной подвески длиной 1255 м, расположенный на прямом участке пути. Подвеска — компенсированная, вертикальная [6]. Средняя анкеровка смонтирована на опоре № 11. На всех опорах с нечетным номером установлены обратные фиксаторы, консоли работают на сжатие (зигзаги — положительные), с четным номером — фиксаторы прямые, консоли работают на растяжение (зигзаги — отрицательные). Минимальная температура выбрана в соответствии с [3] для умеренно холодного климатического района с небольшим запасом в сторону уменьшения, максимальная же обусловлена температурой максимально допустимого нагрева меди по условиям механической прочности.

Как видно из графиков, изображенных на рис. 5, смещение контактной подвески в плоскости, перпендикулярной оси пути, является односторонним, так как независимо от направления изменения температуры (увеличения или уменьшения),

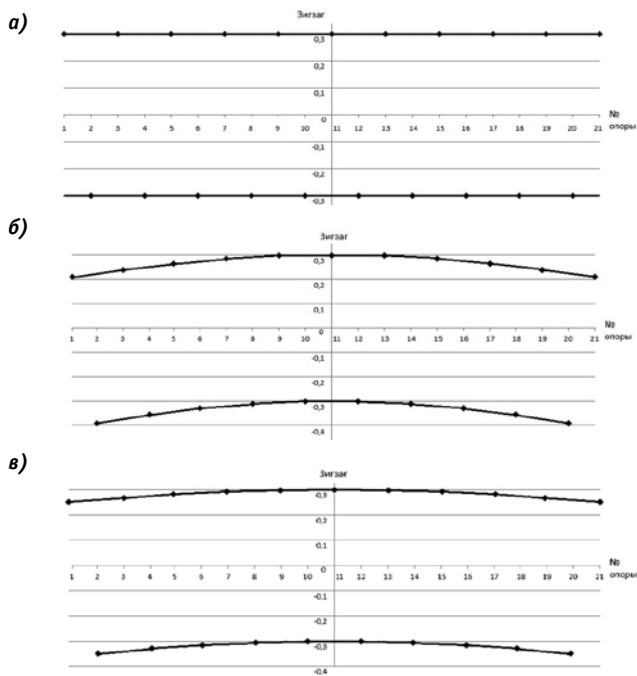


Рисунок 5 — Значение зигзагов контактного провода под действием температуры на протяжении одного АУ: а — при  $t_0 = +5^\circ\text{C}$ , б — при  $t_0 = +80^\circ\text{C}$ , в — при  $t_0 = -50^\circ\text{C}$

а следовательно, независимо от направления поворота консолей, точки фиксации проводов контактной сети смещаются в ту сторону, с которой расположены опоры. Это приводит к тому, что зона износа полоза токоприемника также смещается в сторону расположения опор, что, в свою очередь, чревато неравномерным износом контактных пластин и, как следствие, нерациональным расходом материалов.

Мы предлагаем откорректировать зигзаги проводов контактной подвески путем изменения расположения в пространстве точки фиксации проводов. Причем корректировать расстояния от опоры до точки фиксации проводов имеет смысл только на опорах с растянутыми консолями, поскольку абсолютное значение зигзага с изменением температуры на таких консолях увеличивается, в то время как на сжатых консолях уменьшается (рис. 6).

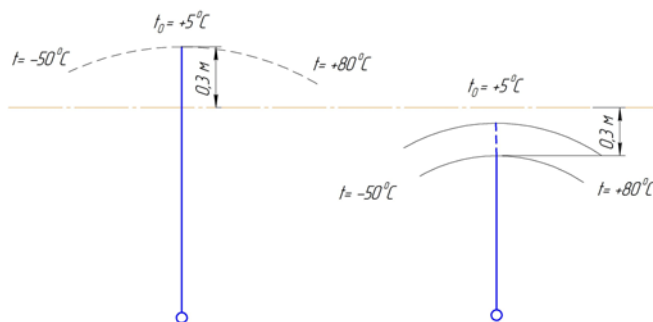


Рисунок 6 — Корректировка зигзагов для растянутых консолей

Однако если изменить зигзаги только на консолях, работающих на растяжение, то в этом случае уменьшится ширина зоны износа контактных пластин токоприемника, что опять же приведет к нерациональному использованию меди. Поэтому, чтобы избежать сужения зоны износа контактных пластин токоприемника, нужно откорректировать величину зигзагов на всех опорах анкерного участка, независимо от того, работают они на растяжение или на сжатие.

Учитывая все вышесказанное, следует изменить значение зигзага таким образом, чтобы он имел среднее значение при максимальных отклонениях. Новые значения длин консолей найдем по формуле

$$d_{ki} = \frac{d_i}{\cos \alpha_i^{80^\circ}} \quad (13)$$

Однако необходимо отметить, что воздействие ветра на контактную подвеску после описанной выше корректировки зигзагов требует более детального изучения.

### Выводы

1. Методика определения углов поворота консолей в зависимости от температуры, предложенная в данной статье, учитывает геометрические параметры контактной подвески. Это позволяет несколько повысить точность расчетов при определении отклонений, возникающих из-за изменения температуры.

2. Анализируя результаты, полученные в ходе расчета, можно сказать, что отклонения зигзагов проводов контактной подвески от среднего значения, заданного при температуре  $t_0$ ,

увеличиваются по мере приближения температуры к пиковым значениям, а также по длине АУ — по мере приближения к его границам. Кроме того, при изменении температуры в допустимых пределах зигзаги контактного провода могут достигать таких значений, которые в соответствии с [7] определяются как «штрафные» и даже «аварийные». Исходя из этого следует произвести корректировку нормативного значения зигзагов на скоростных участках в зависимости от удаленности каждой конкретной опоры от средней анкеровки.

3. При любом отклонении температуры от нормативного значения (+5°C) смещение контактной подвески происходит в сторону опор контактной сети. Это приводит к смещению зоны износа контактных пластин токоприемника к краю его полоза. На основании анализа графика изменения среднемесячной температуры и с учетом корректировки зигзагов, предложенной в данной статье, можно сделать вывод, что нормативное значение  $t_0$  следует изменить исходя из местных условий для

каждого конкретного анкерного участка. Говоря точнее, минимальную температуру для расчета следует выбирать в соответствии с климатическими условиями, в то время как максимальную можно принять равной максимально допустимой по условиям нагрева проводов (+80°C). Однако в условиях, когда известен существующий или проектируемый профиль пути и максимальный вес поездов, курсирующих по участку, тяговые и теплотехнические расчеты могут дать точное значение максимальной температуры. Таким образом, нормативное значение температуры  $t_0$  для подъемов и спусков будет различным.

4. Целесообразно внести изменения в нормативную документацию по оценке состояния контактной подвески. В частности, значения зигзагов контактного провода следует оценивать в соответствии с температурой.

Все вышеперечисленные мероприятия предназначены для повышения надежности работы устройств контактной сети в сложных и экстремальных условиях.

## Литература

1. Беляев Н.В., Чередников Д.И. Новые типовые проектные решения ЗАО «Универсал — контактные сети» по контактными сетям КС-200 и КС-160 // *Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте : матер. шестого междунар. симпоз. «Элтранс-2011»*. СПб. : ПГУПС, 2013. С. 107 — 114.
2. Контактная сеть и воздушные линии: Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтным воздушным линиям / Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. М. : ТРАНСИЗДАТ, 2001. 512 с.
3. Марквардт К.Г. Контактная сеть. 4-е изд, перераб. и доп. : учебник для вузов ж.-д. трансп. М. : Транспорт, 1994. 335 с.
4. Россия 2007 — 2013: Атлас России / сайт Алексея Гавришева. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.atlas-yakutia.ru/weather/temp/climate\\_russia-III\\_t.html](http://www.atlas-yakutia.ru/weather/temp/climate_russia-III_t.html) (дата обращения: 02.09.13).
5. Фрайфельд А.В., Брод Г.Н. Проектирование контактной сети. М. : Транспорт, 1991. 335 с.
6. Нормы проектирования контактной сети СТН ЦЭ 141-99 / Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. М., 2001. 175 с.
7. Об изменениях в методике определения балльной оценки состояния контактной сети в хозяйстве электрификации и электроснабжения : Распоряжение ОАО «РЖД» № 300р от 13.02.12.

## References

1. Belyaev N. V., Cherednikov D. I. *Novye tipovye projektnye resheniya UKS po kontaktnym setyam KS-200 i KS-160 [New standardized design solutions of Capital construction management on contact wires KS-200 and KS-160]* ZAO «Universal — kontaktnye seti». Sankt-Peterburg
2. *Kontaktnaya set i vozdushnye linii [Contact wire network and overhead lines]: Normativno-metodicheskaya dokumentatsiya po ekspluatatsii kontaktnoi seti i vysokovoltnym vozdushnym liniyam / Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniya Ministerstva putej soobshcheniya Rossijskoj Federatsii*. M.: TRANSIZDAT, 2001. 512 p.
3. Markvardt K.G. *Kontaktnaya set [Contact wire network]. 4-e izd. pererab. i dop.: Ucheb. dlya vuzov zh.-d. трансп.* M.: Transport, 1994. 335 p.
4. [http://www.atlas-yakutia.ru/weather/temp/climate\\_russia-III\\_t.html](http://www.atlas-yakutia.ru/weather/temp/climate_russia-III_t.html)
5. Fraifeld A.V., Brod G.N. *Proektirovanie kontaktnoi seti [Contact wire network design]*. M.: Transport, 1991. 335 p.
6. *Normy proektirovaniya kontaktnoi seti STN TSE 141 – 99 [Design standards for contact wire STN TSE 141 – 99] / Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniya MPS RF*. M. 2001. 175 p.
7. *Ob izmeneniyakh v metodike opredeleniya balnoi otsenki sostoyaniya kontaktnoi seti v hozyaistve elektrifikatsii i elektrosnabzheniya [On the changes in the method of determining the scoring points of contact wire network state in the electrification and power supply sector]: Rasporyazhenie ОАО «RZhD» № 300r ot 13.02.12 g.*

**Периодичность — 4 номера в год. Подписной индекс: 46463.**

**Научно-технический журнал «Транспорт Урала».**

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство ПИ №77-18098.

**Адрес редакции:**

Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66. Тел.: (343) 221-24-44, 221-24-86  
e-mail: [transporturala@usurt.ru](mailto:transporturala@usurt.ru), [lneverova@nis.usurt.ru](mailto:lneverova@nis.usurt.ru)  
<http://www.transporturala.usurt.ru>

Учредитель: Уральский государственный университет путей сообщения.

**Над выпуском работали:**

Переводчики: Ершова Елена Владимировна, Бочкарева Анна Викторовна (Департамент Международных Связей (ДМС) УрГУПС, тел.: (343) 221-24-86).  
Корректор Пупова Елена Семеновна.  
Верстка и дизайн: Курносов Антон Леонидович.

**Выпускающий редактор Неверова Людмила Васильевна.**

Контактный телефон: (343)370 00 53, 89068021451  
e-mail: [lneverova@nis.usurt.ru](mailto:lneverova@nis.usurt.ru), [lneverova@eka-net.ru](mailto:lneverova@eka-net.ru)

С 1 января 2007 года 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.

Отпечатано в ООО «Эзапринт»: г.Екатеринбург, ул. Ухтомская, 45.