

ТРАНСПОРТ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УРАЛ

**СИСТЕМНОЕ ПОСТРОЕНИЕ
ТРАНСПОРТНЫХ ХОЛДИНГОВ**

**МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ПАТТЕРНОВ
ТРАНСПОРТНОГО ПОВЕДЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ
РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ВЫБОРА
ПРИОРИТЕТНОСТИ ПРОПУСКА
ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ ЧЕРЕЗ СТАНЦИИ
УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДА ПРОЦЕССА
ПЕРЕВОЗОК ПАССАЖИРОВ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ
К РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ БРУТТО-КОНТРАКТА**



TRANSPORT

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Галкин Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, главный редактор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
2. Буйносов Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
3. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия
4. Симармата Джулиатер, доктор менеджмента, Институт транспорта и логистики Трисакти, Джакарта, Индонезия
5. Цяо Цун, канд. техн. наук, Чжэнчжоуский железнодорожный профессиональный технический институт, Чжэнчжоу, Китай

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Бородин Андрей Федорович, д-р техн. наук, профессор, Москва
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Гриценко Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, Челябинск
5. Куренков Петр Владимирович, д-р экон. наук, профессор, Москва
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Локтев Алексей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Москва
10. Неволин Дмитрий Германович, д-р техн. наук, с. н. с., Екатеринбург
11. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
12. Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
13. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Тушин Николай Андреевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
15. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
16. Якунин Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Оренбург

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Galkin Alexander Gennadyevich, DSc, professor, editor-in-chief, USURT, Ekaterinburg, Russia
2. Buynosov Alexander Petrovich, DSc, professor, USURT, Ekaterinburg, Russia
3. Kozlov Petr Alexeevich, DSc, professor, Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia
4. Simarmata Juliater, DSc, Trisakti Institute of Transportation and Logistics, Jakarta, Indonesia
5. Qiao Cong, PhD, Zhengzhou Railway Vocational and Technical Institute, Zhengzhou, China

EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Borodin Andrey Fedorovich, DSc, professor, Moscow
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Gritsenko Alexander Vladimirovich, DSc, associate professor, Chelyabinsk
5. Kurenkov Petr Vladimirovich, DSc, professor, Moscow
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolaevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyayev Alexander Petrovich, DSc, professor, St. Petersburg
9. Loktev Alexey Alexeevich, DSc, professor, Moscow
10. Nevolin Dmitriy Germanovich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
11. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
12. Sirina Nina Fridrikhovna, DSc, professor, Ekaterinburg
13. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Tushin Nikolay Andreevich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
15. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
16. Yakunin Nikolay Nikolaevich, DSc, professor, Orenburg

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

<i>Д. В. Кузьмин.</i> Метод колориметрической декодировки высот отдельных территориальных единиц гипсометрических карт	3
<i>П. А. Козлов, В. П. Козлова, Т. И. Бушуева.</i> Системное построение транспортных холдингов	11
<i>М. Р. Якимов.</i> Особенности разработки комплексной схемы организации дорожного движения Чебоксарской агломерации	15
<i>А. В. Ахромешин.</i> Методика выявления паттернов транспортного поведения на основе теории распознавания образов	20

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

<i>А. П. Буйносов, Е. А. Ширшов.</i> Выбор конструкции муфты тягового привода грузового электровоза для движения со скоростями до 160 км/ч	27
---	-----------

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>К. В. Ковалева, А. С. Митраков, В. Ф. Лапшин.</i> Применение метода анализа иерархий для обоснования конструкции кузова двухэтажного пассажирского вагона	35
---	-----------

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

<i>А. С. Крылов, Е. С. Максимова, В. К. Полякова, С. О. Ждакаев.</i> Формирование целевой конфигурации границ диспетчерских участков и сквозной процессной модели «Диспетчерское управление перевозочным процессом»	42
<i>Е. Н. Тимухина, Н. А. Тушин, К. М. Тимухин, М. М. Аманов.</i> Автоматизированный метод выбора приоритетности пропуска грузовых поездов через станции участка железной дороги	51
<i>Д. И. Хомич.</i> Выбор технологии обслуживания железнодорожных туристических маршрутов подвижным составом	56

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

<i>А. Е. Тарасова.</i> Проблема одноканальности классификаторов состояний рельсовых линий и способы ее решения	62
---	-----------

ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

<i>П. Н. Мишкuroв.</i> Пространственно-временная оптимизация транспортно-логистических процессов промышленных предприятий	66
--	-----------

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

<i>Н. Н. Якунин, К. А. Паршакова, В. В. Котов, Е. В. Фёклин.</i> Моделирование перехода процесса перевозок пассажиров автомобильным транспортом к работе в условиях брутто-контракта	74
---	-----------

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>А. А. Платунов, С. Г. Аккерман.</i> Математический анализ и прогноз достоверности контрольных измерений цифровых моделей железнодорожного пути	81
<i>С. М. Жданова, О. А. Нератова, И. Е. Парамонова.</i> Влияние растительного покрова на состояние дорожных сооружений в процессе их эксплуатации на многолетнемерзлых грунтах	85

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

<i>В. В. Томилов, О. А. Сидоров, А. В. Тарасенко.</i> Увеличение нагрузочной способности полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава	91
---	-----------

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

<i>D. V. Kuzmin.</i> The method of colorimetric decoding of heights for individual territorial units of hypsometric maps	3
<i>P. A. Kozlov, V. P. Kozlova, T. I. Bushueva.</i> Systemic structuring of transport holdings	11
<i>M. R. Yakimov.</i> Features of development for integrated traffic management scheme in Cheboksary agglomeration	15
<i>A. V. Akhromeshin.</i> A technique for identifying patterns of transport behavior based on pattern recognition theory	20

ROLLING STOCK AND TRACTION

<i>A. P. Buynosov, E. A. Shirshov.</i> Selection of coupling design for traction drive of electric freight locomotive for movement at speeds up to 160 km/h	27
--	-----------

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

<i>K. V. Kovaleva, A. S. Mitrakov, V. F. Lapshin.</i> Application of analytic hierarchy process to substantiate the body structure of a double-deck passenger car	35
--	-----------

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

<i>A. S. Krylov, E. S. Maksimova, V. K. Polyakova, S. O. Zhdekaev.</i> Formation for the target configuration of boundaries of dispatcher sections and for the end-to-end process model «Dispatcher control of the transportation process»	42
<i>E. N. Timukhina, N. A. Tushin, K. M. Timukhin, M. M. Amanov.</i> Automated method for selecting the priority of passing freight trains through stations of a railway section	51
<i>D. I. Khomich.</i> Justification of the choice of technology for servicing tourist trains with rolling stock	56

AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION

<i>A. E. Tarasova.</i> The single-channel problem of rail line state classifiers and approaches to its solution	62
--	-----------

TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES

<i>P. N. Mishkurov.</i> Spatial-temporal optimization of industrial enterprises transport and logistics processes	66
--	-----------

MOTOR TRANSPORT

<i>N. N. Yakunin, K. A. Parshakova, V. V. Kotov, E. V. Fyoklin.</i> Modeling of the process of passenger transportation by road transport to work under a gross contract	74
---	-----------

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

<i>A. A. Platonov, S. G. Akkerman.</i> Mathematical analysis and reliability forecasting for control measurements of digital railway track models	81
<i>S. M. Zhdanova, O. A. Neratova, I. E. Paramonova.</i> The impact of vegetation in the condition of road constructions during their operation on permanently frozen soils	85

ELECTRIC SUPPLY

<i>V. V. Tomilov, O. A. Sidorov, A. V. Tarasenko.</i> Pantograph head increasing current load for mainline electric rolling stock	91
--	-----------

Научная статья
УДК 625.721

Метод колориметрической декодировки высот отдельных территориальных единиц гипсометрических карт

Дмитрий Владимирович Кузьмин¹

¹Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

The method of colorimetric decoding of heights for individual territorial units of hypsometric maps

Dmitriy V. Kuzmin¹

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Аннотация

В статье описывается разработанный автором метод формирования исходной матрицы высот, позволяющей провести анализ морфометрических свойств полигона трассирования. Полигон сепарируется на отдельные территориальные единицы, каждая из которых имеет собственный рейтинг по совокупности различных критериев (таких как антропогенная нагрузка, морфометрия и т.д.). Рейтинг отдельной территориальной единицы определяет перспективность ее рассмотрения при решении задачи трассирования линейных объектов наземного транспорта. Подобная дискретная модель полигона фактически представляет собой взвешенный граф, поиск пути в котором осуществляется различными алгоритмами, такими как алгоритмы Дейкстры, A* и алгоритм поиска в ширину.

Ключевые слова: морфометрия рельефа, формирование матрицы высот, пространственное развитие транспортной инфраструктуры с учетом морфометрических свойств местности

Abstract

The article describes the method developed by the author for forming the initial height matrix, which makes it possible to analyze the morphometric properties of the tracing polygon. The polygon is separated into separate territorial units, each of which has its own rating based on a set of different criteria (such as anthropogenic load, morphometry, etc.). The rating of a separate territorial unit determines the prospects of its consideration when solving the problem of tracing linear objects of land transport. Such a discrete polygon model is actually a weighted graph, in which the search for a path is carried out by various algorithms, such as Dijkstra's algorithm, A* and the breadth-first search algorithm.

Keywords: morphometry of the relief, formation of the height matrix, spatial development of the transport infrastructure taking into account the morphometric properties of the terrain

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-3-10

Ключевая проблема морфометрического анализа рассматриваемого в статье полигона состоит не в получении рейтингов отдельных территориальных единиц, а в формировании исходной матрицы высот. Сложность заключается в переходе от непрерывного векторного изображения к дискретной матричной форме, позволяющей оценить абсолютную или среднюю высоту отдельной территориальной единицы. Существует множество аспектов, определяющих трудности практического выполнения такой операции на основе экспертных оценок. Прежде всего это связано с тем, что фрагментированное пространство может состоять из тысяч пикселей, каждый из которых требует оценки высоты, и это серьезно осложняет использование экспертных мнений.

Картографирование высот рельефа выполняется с помощью гипсометрических карт. При этом высотные и рельефные характеристики местности передаются посредством изогипс или цвета (рис. 1) [1].

На рис. 1 высоты местности закодированы цветом, который соответствует абсолютной высоте, представленной на шкале. Проблемами численного измерения и описания цветов занимается такая научная дисциплина, как колориметрия [2].

Суть предлагаемого метода формирования исходной матрицы морфометрических данных заключается в колориметрическом декодировании цвета ячейки гипсометрической карты и в получении значения высоты, соответствующего ее цвету. С учетом объема работы колориметрический анализ каждой отдельной территориальной единицы целесообразно выполнять программно.

На первом этапе необходимо фрагментировать рассматриваемый полигон на отдельные территориальные единицы. В связи с тем что размер отдельной территориальной единицы может составлять тысячи метров, ее морфометрические характеристики способны меняться многократно. Таким образом, цветовое кодирование ячейки не будет монохромным и предполагает использование несколько цветов. Следовательно, для оценки высот необходимо определить некий средний цвет отдельной территориальной единицы.

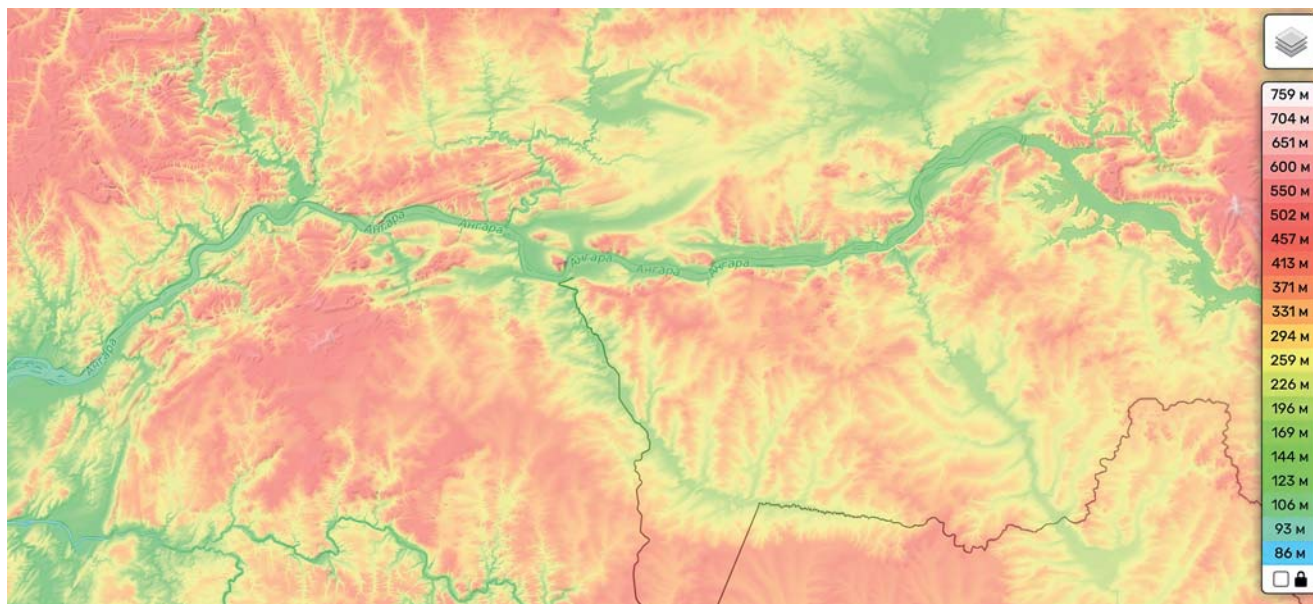


Рис. 1. Пример гипсометрической карты [1]

Представленная шкала высот имеет 20 опорных цветов, однако точная оценка цвета в описанном выше случае требует более плавного, детализированного перехода между цветами. Для этого выполним процедуру линейной интерполяции цветовой шкалы, т.е. добавим в шкалу промежуточные цвета. В формальном виде процесс интерполяции цветовой шкалы можно описать следующим образом.

Пусть дана последовательность пар «цвет — числовое значение высоты»:

$$(c_i, h_i), i = 0, 1, \dots, N,$$

где $c_i \in R^3$ — вектор, задающий цвет в некотором цветовом пространстве; $h_i \in R$ — соответствующее числовое значение высоты.

Необходимо сформировать новую шкалу из $M > N$ пар, равномерно распределенных между парами исходной шкалы:

$$(c_j^*, h_j^*), j = 0, 1, \dots, M - 1.$$

Разделим отрезок шкалы на N сегментов между парами (c_i, h_i) и (c_{i+1}, h_{i+1}) для $i = 0, 1, \dots, N - 1$ и в каждом сегменте интерполируем цвета и значения.

Пусть на i -м сегменте требуется разместить k_i таким образом, чтобы $\sum_{i=0}^{N-1} k_i = M - 1$. Для каждого сегмента и шага $m = 0, 1, \dots, k_i$ вычислим: нормированный параметр интерполяции

$$t = \frac{m}{k_i};$$

интерполированный цвет

$$c_{i,m}^* = (1 - t)c_i + tc_{i+1};$$

интерполированное числовое значение высоты

$$h_{i,m}^* = (1 - t)h_i + th_{i+1}.$$

После этого каждую новую получаемую пару будем добавлять в итоговую шкалу. Пример интерполяции цветовой шкалы высот приведен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Исходная шкала

Цвет	Цвет BGR	Высота, м
	255, 255, 255	1000
	255, 0, 0	500
	0, 0, 0	0

Таблица 2

Интерполированная шкала

Цвет	Цвет BGR	Высота, м
	255, 255, 255	1000
	255, 127, 127	750
	255, 0, 0	500
	127, 0, 0	250
	0, 0, 0	0

Плотность и плавность интерполированной шкалы напрямую определяют точность декодирования цвета и точность формирования числового значения высоты.

При работе с цветом применяют различные цветовые модели. Для представленного примера выбрана модель BGR (Blue, Green, Red) со следующей последовательностью компонентов: синий, зеленый, красный. Эта модель используется библиотекой OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [3] и позволяет работать с изображениями (распознавать, анализировать и классифицировать объекты) при программной реализации различными языками (C++, Java, Python и пр.). По умолчанию OpenCV читает все изображения в формате BGR, поэтому на этапе их обработки применяется эта цветовая модель.

Определение среднего цвета ячейки представляет собой среднее арифметическое значение по каждому цветовому каналу (синему, зеленому, красному) модели BGR:

$$\bar{C} = \left(\frac{1}{|S|} \sum_{(x,y) \in S} I_{x,y,0}, \frac{1}{|S|} \sum_{(x,y) \in S} I_{x,y,1}, \frac{1}{|S|} \sum_{(x,y) \in S} I_{x,y,2} \right),$$

где $I_{x,y,0}$, $I_{x,y,1}$, $I_{x,y,2}$ — значение соответственно синего, зеленого и красного канала в пикселе (x, y) ; $|S|$ — количество пикселей в ячейке,

$$S = \{(x, y) | x_1 \leq x < x_2, y_1 \leq y < y_2\}.$$

Полученный средний цвет ячейки необходимо сравнить с палитрой цветов интерполированной шкалы и найти в ней ближайший цвет, т.е. наиболее похожий по своим цветовым параметрам. Для количественной оценки цветов при их сравнении используют иную модель цветового пространства — LAB [4]. Она представляет собой непрерывное трех-

мерное цветовое пространство, построенное по трем осям: L — light / яркость от черного к белому; A — ось градации от красного к зеленому; B — ось градации от желтого к синему. Таким образом, LAB-модель описывает все цвета видимого спектра, присваивая каждому из них собственную уникальную координату (рис. 2).

Этот способ описания всей цветовой палитры видимого спектра позволяет использовать математические методы сравнения цветов по принципу их координатной близости, так как LAB-модель фактически является евклидовым пространством.

Следовательно, отнесение среднего цвета ячейки к цвету шкалы высот можно выполнить путем определения координатно ближайшего к ней опорного цвета интерполированной шкалы в LAB-пространстве:

$$R = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (A_1 - A_2)^2 + (B_1 - B_2)^2},$$

где (L_1, A_1, B_1) — координата среднего цвета ячейки; (L_2, A_2, B_2) — координата опорного цвета шкалы.

Таким образом, ячейке присваивается значение высоты, соответствующее ближайшему цвету интерполированной цветовой шкалы высот.

Рассмотрим программную реализацию формирования исходной матрицы морфометрических данных путем использования колориметрической декодировки высот отдельных территориальных единиц на примере полигона (67.49397, 64.07032) гипсографической карты, полученного с помощью сервиса [5] и представленного на рис. 3.

На рис. 3 синим квадратом обозначена граница территории полигона с физическими размерами 10×10 км. Шкала высот имеет 20 опорных позиций и определяет диапазон значений от 93 до 243 м.

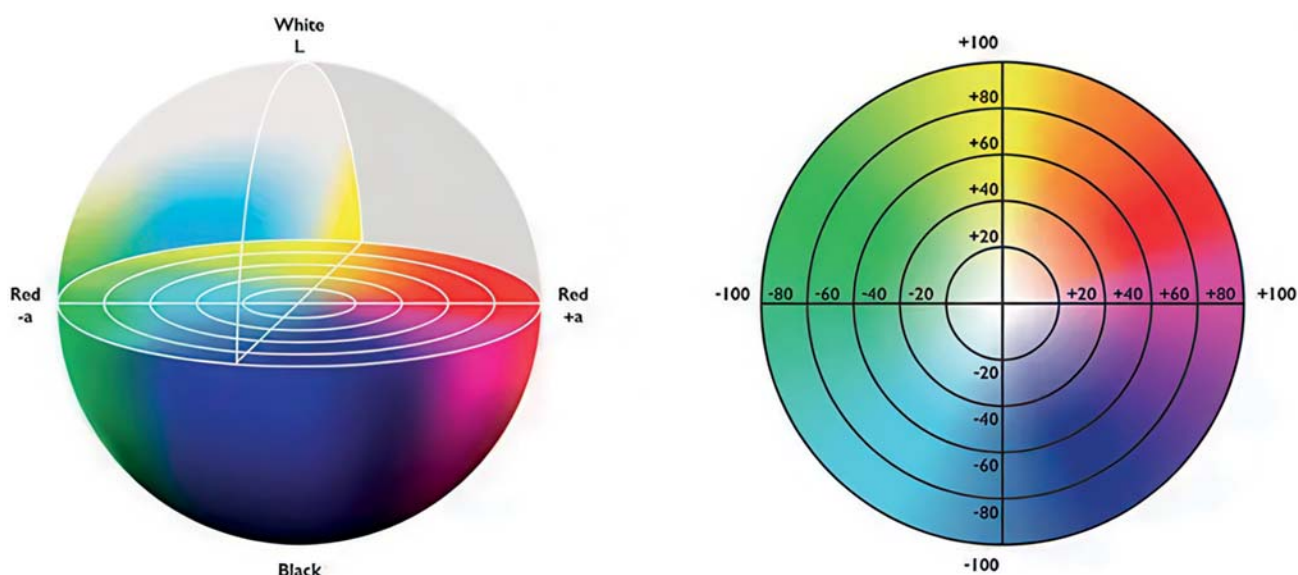


Рис. 2. Модель цветового пространства LAB

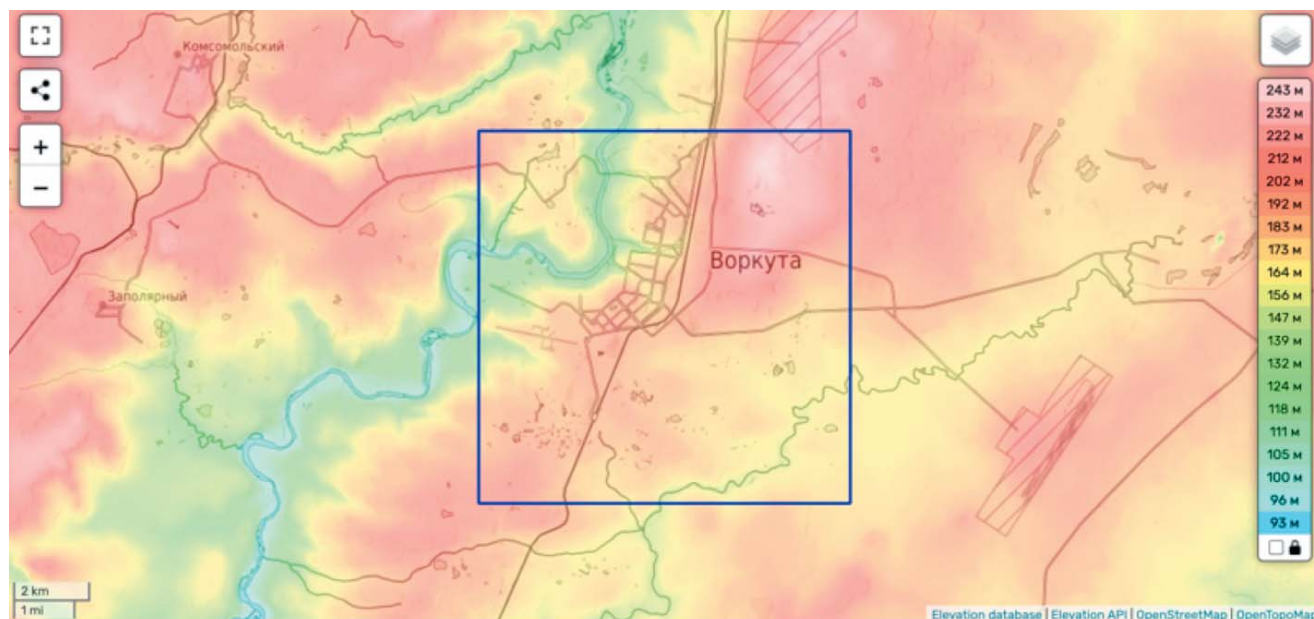


Рис. 3. Гипсометрическая карта рассматриваемого полигона

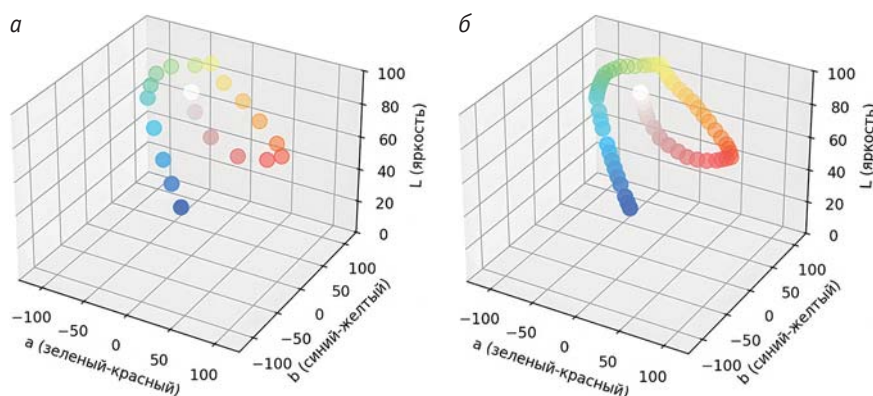


Рис. 4. Опорные цвета шкалы высот в пространстве цветовой модели LAB:

а — исходная цветовая шкала (20 пар); б — интерполированная цветовая шкала (60 пар)

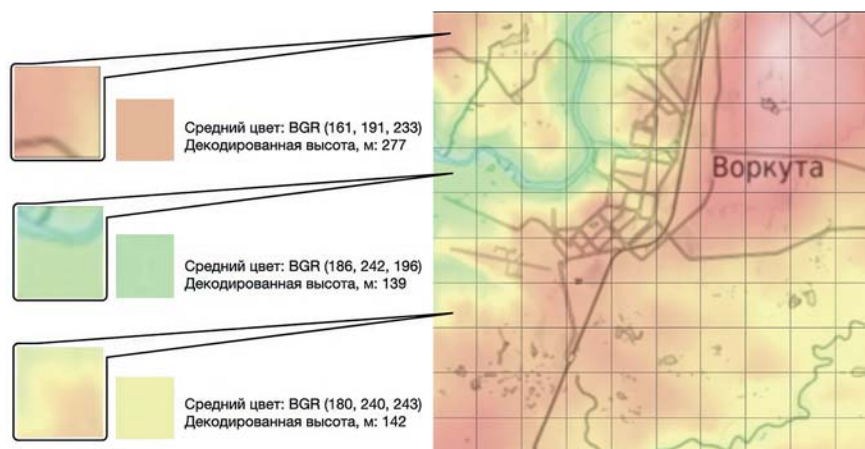


Рис. 5. Дискретное пространство полигона со средними цветами отдельных территориальных единиц и декодированными высотами

Программно выполним интерполяцию шкалы высот до 60 пар «цвет — высота». Результаты интерполяции цветовой шкалы представим в рамках трехмерного пространства цветовой модели LAB (рис. 4).

Фрагментируем полигон на 100 отдельных территориальных единиц с размером 1×1 км (рис. 5) и определим средний цвет ячейки, т.е. среднее значение каждого цветового канала (синего, зеленого, красного) по всей совокупности пикселей, включенных в ячейку.

Для установления цвета, ближайшего к полученному среднему цвету ячейки интерполированной шкалы высот, определим их расположение в рамках трехмерного евклидова пространства цветовой модели LAB (рис. 6).

Таким образом, определяются все пары «средний цвет ячейки — опорный цвет интерполированной шкалы». После образования пар каждая ячейка получает соответствующее значение высоты, и формируется матрица декодированных высот (рис. 7).

Отобразим полученный результат в виде трехмерной модели рассматриваемого полигона с помощью инструментов библиотеки построения интерактивных 3D-графиков Plotly [6] на Python. Проведем серию экспериментов с различными размером отдельных террито-

риальных единиц и степенью интерполяции цветовой шкалы высот (рис. 8).

Данный метод очень чувствителен к качеству изображения гипсометрической карты по целому ряду аспектов: масштабу карты, разрешению изображения и наличию посторонних включений (подписей, разметки, транспортных коммуникаций и пр.). Помимо этого итоговый результат в значительной степени зависит от дискретизации шкалы и размера ячейки. Например, при низкой дискретизации полигона линейные объекты наземной транспортной инфраструктуры остаются нераспознаваемыми, что не снижает качества декодированного датасета. Однако при уменьшении размера ячейки объекты распознаются и фактически начинают выступать в качестве препятствий при трассировании, так как имеют собственные значения высот (рис. 9).

Результаты экспериментов по декодированию гипсометрической карты с различным пространственным и цветовым разрешением позволяют сделать ряд выводов. При небольшом разрешении качество трехмерной модели высот достаточно низкое, так как существенная часть деталей (мелких форм рельефа) рассматриваемого полигона остается нераспознаваемой. Значительные области карты, имеющие фактически разные высоты, объединены единым цветовым пространством, переход между ними содержит цветовые ступени — так называемые бэндинги. При повышении пространственного разрешения доступными для распознавания становятся более мелкие детали (например, русла рек), в том числе колориметрически распознаются различные шумы карты (подписи, дорожно-транспортная сеть и пр.). Дальнейшее повышение цветового и пространственного разрешения приводит к росту шума трехмерной модели. При наличии графических и текстовых элементов карты (таких как подписи рек, населенных пунктов, линии сетки, условные знаки и пр.) они становятся читаемыми и распознаются как реальные объекты с соответствующими высотами, что, разумеется, снижает качество итогового результата.

Поэтому для повышения качественного формируемого датасета необходима подготовительная работа по фильтрации исходного материала карты. Важен фокус

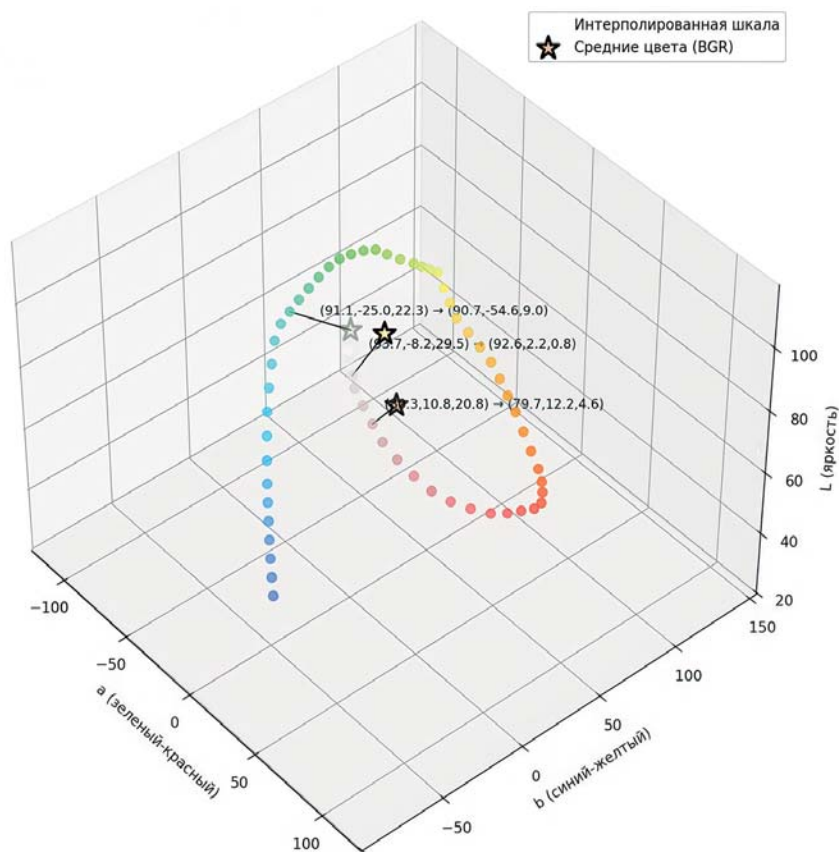
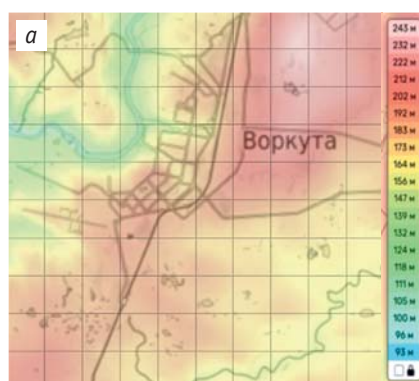


Рис. 6. Расположение трех пар «средний цвет ячейки — опорный цвет интерполированной шкалы» в евклидовом пространстве модели LAB



б

227 150 137 137 139 153 224 227 227 224
137 139 137 150 150 161 222 227 227 224
139 139 142 139 153 159 222 224 224 224
139 137 139 137 153 159 220 220 222 227
139 139 150 159 159 224 222 224 227 153
139 150 227 222 224 227 230 153 139 142
142 142 227 224 230 232 142 142 142 139
227 227 227 224 227 153 139 142 139 139
227 224 224 156 227 230 142 142 139 142
224 224 156 150 150 142 142 142 142

Рис. 7. Результат формирования исходной матрицы морфометрических данных путем колориметрической декодировки высот отдельных территориальных единиц:

а — гипсометрическая карта фрагментированного полигона;

б — колориметрически декодированная матрица высот

на таких аспектах, как разрешение, масштаб и информационная чистота. Кроме того, значимыми являются степень дискретизации полигона (размер отдельной территориальной единицы) и градация цветовой шкалы.

Рассмотренный метод имеет ограниченную точность, однако может быть использован для оперативного сбора данных в рамках выполнения предварительного морфометрического анализа полигона.

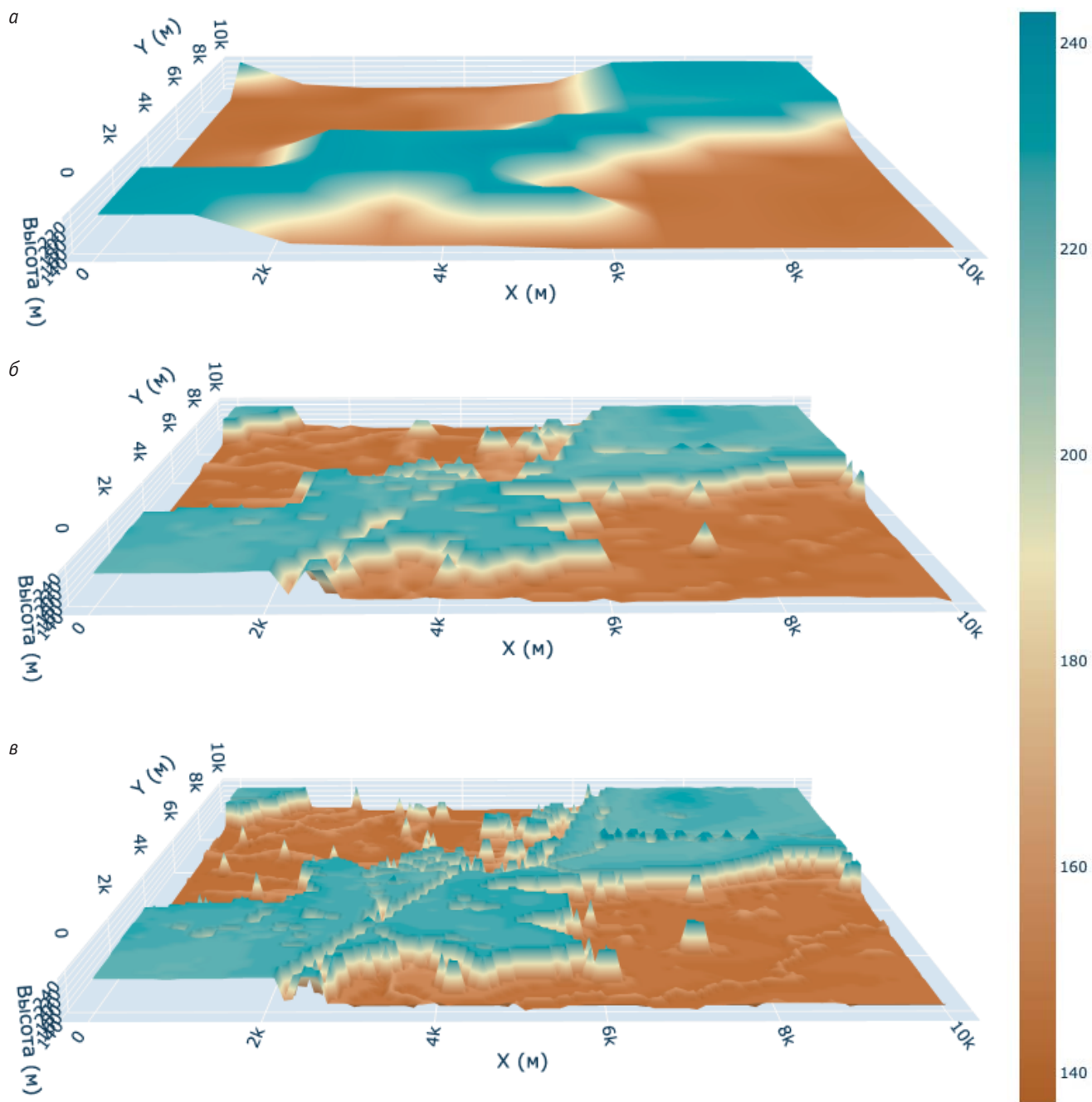


Рис. 8. Трехмерная цифровая модель полигона, построенная по декодированной матрице высот:

- а — размер ячейки 1×1 км, интерполяция шкалы 60 цветов;
- б — размер ячейки 200×200 м, интерполяция шкалы 60 цветов;
- в — размер ячейки 100×100 м, интерполяция шкалы 120 цветов

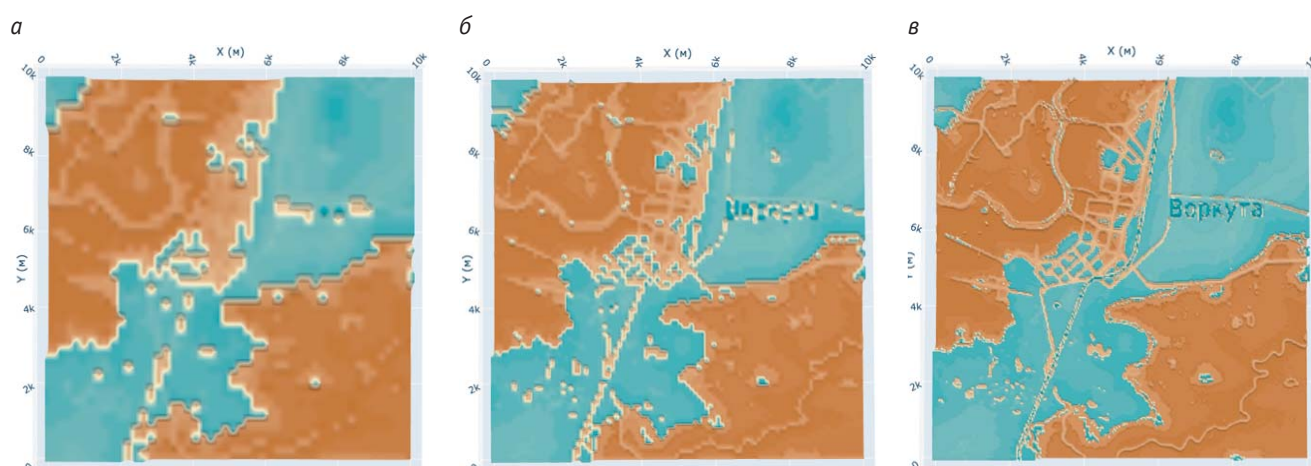
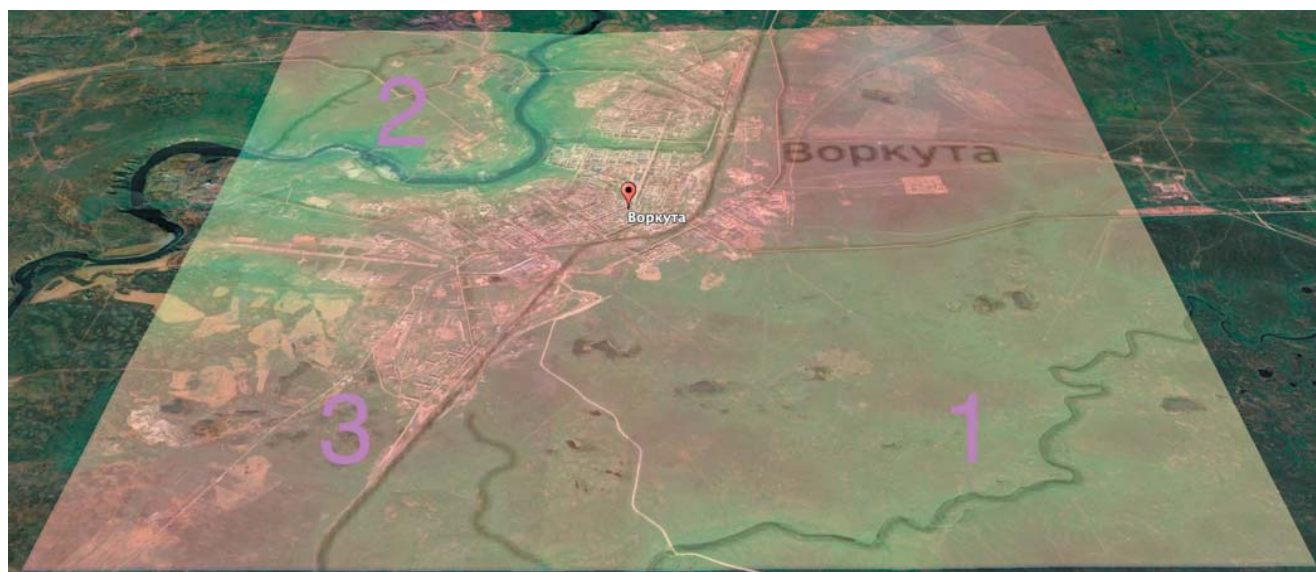


Рис. 9. Результаты декодирования гипсометрической карты с различной степенью детализации морфометрической 3D-модели полигона:
 1 — р. Юньяга; 2 — р. Воркута; 3 — железнодорожная линия; а — размер ячейки 200×200 м, интерполяция шкалы 60 цветов;
 б — размер ячейки 100×100 м, интерполяция шкалы 120 цветов; в — размер ячейки 33×33 м, интерполяция шкалы 180 цветов

Полученная матрица высот позволит проанализировать морфометрическую характеристику полигона и установить перспективы использования каждой отдельной территориальной единицы для трассирования. Матрица морфометрических

рейтингов отдельных территориальных единиц полигона фактически представляет собой взвешенный граф, поиск пути в котором может быть выполнен одним из множества известных алгоритмов: A*, Дейкстры, поиска в ширину [7–10].

Сведения об авторе:

Дмитрий Владимирович Кузьмин,
 кандидат технических наук, доцент кафедры
 «Логистика и управление транспортными системами»
 Российского университета транспорта (МИИТ)

Author's information:

Dmitriy V. Kuzmin,
 PhD in Engineering, Associate Professor of Logistics
 and Management of Transport Systems Department,
 Russian University of Transport (MIIT)

Литература

1. Топографическая карта Россия, высота, рельеф. URL: <https://ru-ru.topographic-map.com/map-pk6jmt/%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%8F/?center=58.24689%2C97.37957&zoom=8&base=2>.
2. Жбанова В. Л. Вопросы применения цифровой колориметрии в современных научных исследованиях // Светотехника. 2021. № 2. С. 5–14. ISSN 0039-7067.
3. OpenCV provides a real-time optimized Computer Vision library, tools, and hardware. It also supports model execution for Machine Learning (ML) and Artificial Intelligence (AI). URL: <https://opencv.org/>.
4. Маргулис Д. Photoshop Lab Color. Загадка каньона и другие приключения в самом мощном цветовом пространстве. Москва : Интелбук, 2006. 479 с.
5. Топографическая карта Россия, высота, рельеф (Воркута). URL: <https://ru-ru.topographic-map.com/map-pk6jmt/%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%8F/>.
6. Plotly. URL: <https://plotly.com/python/>.
7. Malczewski J. On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches // Transactions in GIS. 2000. 4(1): 5–22. DOI: 10.1111/1467-9671.00035.
8. Faster Algorithms for the Shortest Path Problem / R. Ahuja, K. Mehlhorn, J. Orlin, R. Tarjan // Journal of the ACM. 1990. Vol. 37. No. 2. Pp. 213–223. DOI: 10.1145/77600.77615.
9. Dijkstra E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs // Numerische Mathematik. 1959. 1. Pp. 269–271.
10. Botea A., Müller M., Schaeffer J. Near Optimal Hierarchical Path-Finding (HPA*) // Journal of Game Development. 2004. Vol. 1. No. 1. Pp. 7–28.

References

1. Topographic map of Russia, height, relief. URL: <https://ru-ru.topographic-map.com/map-pk6jmt/%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%8F/?center=58.24689%2C97.37957&zoom=8&base=2>. (In Russian).
2. Zhdanova V. L. Issues of digital colorimetry application in modern scientific research. *Light & Engineering*. 2021. No. 2. Pp. 5–14. ISSN 0039-7067. (In Russian).
3. OpenCV provides a real-time optimized Computer Vision library, tools, and hardware. It also supports model execution for Machine Learning (ML) and Artificial Intelligence (AI). URL: <https://opencv.org/>.
4. Margulis D. Photoshop LAB Color. The Canyon Conundrum and Other Adventures in the Most Powerful Colorspace. Moscow : Intelbook, 2006. 479 p. (In Russian).
5. Topographic map of Russia, height, relief (Vorkuta). URL: <https://ru-ru.topographic-map.com/map-pk6jmt/%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%8F/>. (In Russian).
6. Plotly. URL: <https://plotly.com/python/>.
7. Malczewski J. On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. *Transactions in GIS*. 2000. 4(1): 5–22. DOI: 10.1111/1467-9671.00035.
8. Ahuja R., Mehlhorn K., Orlin J., Tarjan R. Faster Algorithms for the Shortest Path Problem. *Journal of the ACM*. 1990. Vol. 37. No. 2. Pp. 213–223. DOI: 10.1145/77600.77615.
9. Dijkstra E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*. 1959. 1. Pp. 269–271.
10. Botea A., Müller M., Schaeffer J. Near Optimal Hierarchical Path-Finding (HPA*). *Journal of Game Development*. 2004. Vol. 1. No. 1. Pp. 7–28.

Научная статья

УДК 65.012:656.2

Системное построение транспортных холдингов

Петр Алексеевич Козлов¹, Валерия Петровна Козлова², Татьяна Ивановна Бушуева³¹Научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия²Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия³Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Systemic structuring of transport holdings

Petr A. Kozlov¹, Valeriya P. Kozlova², Tatyana I. Bushueva³¹Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia²Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia³Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье рассматривается развитие транспортного холдинга как сложной системы, включающей независимые транспортные фирмы и управляющую компанию. Анализируются противоречия между интересами отдельных фирм и холдинга в целом, необходимость учета структуры грузопотоков, адаптивности и доступности транспортных средств. Подчеркивается важность системного подхода и оптимизационного моделирования для обеспечения устойчивого и рационального развития холдинга.

Ключевые слова: транспорт, система, транспортный холдинг, устойчивость, адаптивность

Abstract

The article examines the development of a transport holding as a complex system comprising independent transport companies and a management entity. It analyzes the contradictions between the interests of individual firms and the holding as a whole, as well as the need to consider freight flow structures, adaptability, and the availability of transport assets. The importance of a systemic approach and optimization modeling is emphasized as key to ensuring the sustainable and rational development of the holding.

Keywords: transport, system, transport holding, stability, adaptability

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-11-14

О СИСТЕМНОМ ПОДХОДЕ

Зачем нужен системный подход? Предполагается, что он должен играть некоторую организующую роль при построении сложных реальных объектов.

В XIX — конце XX в. эта проблема под разными названиями (теория систем, системный подход, системный анализ) обсуждалась весьма широко. В дискуссиях участвовали и технологи, и философы, и математики, причем разброс мнений был достаточно широк. Приведем и прокомментируем некоторые цитаты.

Фридрих Энгельс: «Система — это ограниченное множество взаимодействующих элементов» [1]. Звучит неплохо. Но такое определение вполне применимо и к стулу: ведь если бы не было взаимодействия между элементами, стул бы развалился.

Академик Н. Н. Моисеев, математик, утверждал: «Понятие «система» относится к числу тех, для которых трудно дать акkuratное определение. Для наших целей достаточно того интуитивного понятия системы, которое имеется у каждого, изучающего предмет» [2]. Но для содержательного использования системного подхода как метода, по-видимому, интуитивного понятия мало.

С ним, по сути, соглашался академик А. И. Берг: «Несмотря на широкое распространение понятия «система», до настоящего времени не существует общепринятого его определения» [3].

А вот что пишет один украинский профессор: «Система — настолько общее понятие, что дать ему универсальное для всех случаев жизни определение очень трудно. Системы бывают простыми, сложными и сверхсложными. Простая — обыкновенный оконный затвор. Сложная — персональный компьютер. Сверхсложная — экономика пассажирских перевозок» [4]. Если в один класс входит и «оконный затвор» как материальный объект, и «экономика» как некоторое его свойство (скажем, как скорость полета пули), то трудно увидеть здесь организующее свойство понятия.

Определенный итог подводит Б. Г. Юдин: «Развитие системных исследований в целом до сих пор не опиралось на какую-то общепринятую теоретическую концепцию». И совершенно

очевидно, что «развитие системных исследований принесло весьма скромные результаты» [5].

В обсуждениях по системной проблеме часто упоминалась «целостность» как главное свойство системы. Аристотель говорил, что «целое — это когда нельзя какую-то часть отнять и какую-то — добавить». Но любой механизм, который был создан человеком и работает, — это целое. Скажем, велосипед, мясорубка и пр. Что же — они все системы?

В нашей статье используется системный подход, разработанный в научной школе профессора П. А. Козлова [6, 7]. Основное определение системы звучит так: «Система — это целостное образование с активным самоподдержанием, при этом его элементы также являются системами».

Здесь следует отметить два важных аспекта.

Первый. Активное самоподдержание. Система — это целостное образование. И устойчивость этого целого при наличии разного рода случайных воздействий среды обеспечивает активное самоподдержание. При этом основой активного самоподдержания является адаптивность.

Активное самоподдержание — вот что отличает систему от других объектов. Ведь существует второй закон термодинамики — само по себе все разрушается. А система этому противодействует. Значит, устойчивость транспортной системы в среде со случайными воздействиями обеспечивает адаптивность, т.е. гибкую организацию работы.

Второй. Каждый элемент — тоже система. Соответственно возникает противоречие: объект — или элемент, или система? Здесь следует вспомнить Гегеля. Он сформулировал важное положение, с которым многие не согласны: как только вы произнесли «или» — «или», вы уже ошиблись. В этой форме истина существовать не может. Только так: «и» — «и». На наш взгляд, это положение подтверждается слишком часто.

Таким образом, не «или элемент, или система», а «и элемент, и система». Это важный принцип построения организованной материи. И главная трудность — найти гармонию между этими двумя противоречивыми свойствами. Например,

область — это система. Но каждый район в ней тоже должен иметь системные свойства. А значит, иметь и полномочия, и средства. Кстати, прежде каждая железная дорога, которая, несомненно, является элементом сети, имела солидную самостоятельность. Реформа эти полномочия отняла. Конечно, с отрицательными последствиями.

Значит, элемент как система имеет свои системные параметры и механизмы их самоподдержания. И здесь возникает противоречие. С одной стороны, подчиненный элемент тесно связан со всей системой, а с другой — он является независимой системой. Итак, не или связь, или независимость, а и связь, и независимость. И опять же необходимо найти гармонию.

Отсюда следует важный вывод. Система — это принцип рационального построения организованной материи.

РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНОГО ХОЛДИНГА КАК СИСТЕМЫ

В качестве объекта для рассмотрения примем некоторый аналог реального транспортного холдинга.

Пусть холдинг состоит из трех транспортных фирм, работающих в разных тер-

риториальных округах — Центральном, Уральском и Сибирском, и управляющей компании.

Ожидается рост грузооборота — необходимо увеличивать транспортные средства. Здесь для упрощения рассматриваются относительно взаимозаменяемые виды транспортных средств (рис. 1).

Гармоничное структурно-функциональное развитие представляет собой довольно сложную задачу. При этом необходимо учитывать много факторов:

интересы отдельных фирм, входящих в холдинг;

интересы холдинга в целом, которые не всегда могут совпадать с интересами отдельных фирм;

производительность и доходность различных приобретаемых транспортных средств;

наличие в продаже транспортных средств;

особенности использования транспортных средств в холдинге;

возможные рыночные изменения внешних условий и др.

Каждая фирма, как независимая система, естественно, стремится получить наибольший доход, но при учете всех возникающих условий (рис. 2).

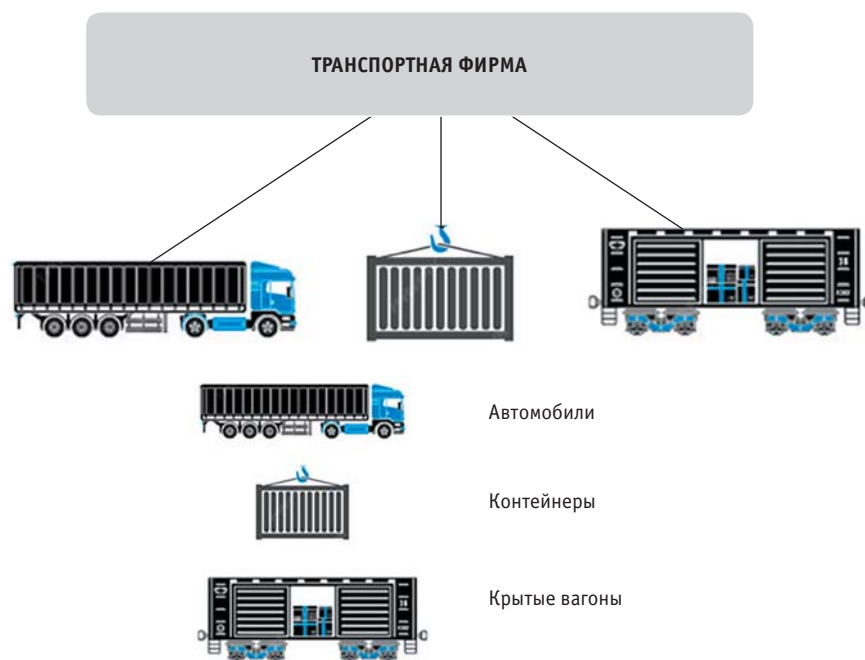


Рис. 1. Транспортные средства фирмы



Рис. 2. Функции транспортной фирмы

Управляющая компания, во-первых, должна обеспечивать устойчивость холдинга в целом. Структура потоков может меняться, и транспортные фирмы могут оказаться в более или менее выгодных условиях. У управляющей компании имеются два основных регулирующих действия (рис. 3).

При распределении средств между транспортными фирмами управляющая компания, естественно, стремится получить наибольший доход от будущих перевозок во всем холдинге. Это в значительной мере будет зависеть от того, насколько структура транспортных средств соответствует структуре грузопотока.

Но каждая фирма должна учитывать и заключенные контракты на перевозки, при невыполнении которых начисляются штрафы.

Необходимо также учитывать гибкую технологию работы каждой фирмы холдинга. При существенной нехватке транспортных средств в одной из фирм,



Рис. 3. Основные функции управляющей компании

угрозе срыва перевозок и возникновении штрафов другие фирмы могут оказать помощь в выделении ей своих транспортных средств. Такая адаптивность соответствует системному построению холдинга.

Вариантов работы холдинга (с учетом структуры грузопотоков в каждой фир-

ме, производительности и доходности относительно взаимозаменяемых транспортных средств, а также всех ограничений) — большое множество. Для выбора эффективных решений требуется специальная оптимизационная модель. Описание такой модели и расчетов будет рассмотрено в отдельной статье.

Сведения об авторах:

Петр Алексеевич Козлов,
доктор технических наук, профессор,
лауреат Государственной премии Российской Федерации,
президент Научно-производственного холдинга «СТРАТЕГ»

Валерия Петровна Козлова,
доктор экономических наук, профессор,
профессор кафедры «Системы управления транспортной
инфраструктурой» Российского университета транспорта (МИИТ)

Татьяна Ивановна Бушуева,
старший преподаватель кафедры «Управление в социальных
и экономических системах, философия и история»
Уральского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Petr A. Kozlov,
DSc in Engineering, Professor,
Laureate of the State Prize of the Russian Federation,
President of Research & Production Holding STRATEG

Valeriya P. Kozlova,
DSc in Economics, Professor,
Professor of Transport Infrastructure Management Systems Department,
Russian University of Transport (MIIT)

Tatyana I. Bushueva,
Senior Lecturer of Management in Social and Economic Systems,
Philosophy and History Department,
Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Эшби У. Р. Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1962. 394 с.
2. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. Москва : Наука, 1981. 487 с.
3. Управление, информация, интеллект / А. И. Берг, Б. В. Бирюков, Н. Н. Воробьев [и др.]. Москва : Мысль, 1976. 383 с.
4. Аксенов И. М., Разумова Е. Н. Системность в маркетинге пассажирских перевозок // Мир транспорта. 2013. Т. 11. № 2 (46). С. 24–29. ISSN 1992-3252.
5. Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. 1980. Москва : Наука, 1981. 424 с.
6. Козлов П. А. О системах и системности на транспорте // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8.
7. Козлов П. А. Системные исследования — новый подход // Наука и техника транспорта. 2014. № 1. С. 46–50. ISSN 2074-9325.

References

1. Ashby W. R. Brain Design. The origins of adaptive behavior. Moscow : Foreign Literature Publishing House, 1962. 394 p. (In Russian).
2. Moiseev N. N. Mathematical problems of systems analysis. Moscow : Science, 1981. 487 p. (In Russian).
3. Berg A. I., Biryukov B. V., Vorobyev N. N. [et al.]. Management, information, intelligence. Moscow : Thought, 1976. 383 p. (In Russian).
4. Aksenov I. M., Razumova E. N. System approach in marketing of passenger traffic. *World of Transport and Transportation*. 2013. Vol. 11. No. 2 (46). Pp. 24–29. ISSN 1992-3252. (In Russian).
5. System research. Methodological problems. Annual. 1980. Moscow : Science, 1981. 424 p. (In Russian).
6. Kozlov P. A. On systems and systematicity in transport. *Transport of the Urals*. 2016. No. 2 (49). Pp. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. (In Russian).
7. Kozlov P. A. System research — a new approach. *Science and technology in transport*. 2014. No. 1. Pp. 46–50. ISSN 2074-9325. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.021

Особенности разработки комплексной схемы организации дорожного движения Чебоксарской агломерации

Михаил Ростиславович Якимов¹¹Институт транспортного планирования Российской академии транспорта, Москва, Россия

Features of development for integrated traffic management scheme in Cheboksary agglomeration

Mikhail R. Yakimov¹¹Institute of Transport Planning, Russian Academy of Transport, Moscow, Russia

Аннотация

В статье определены место и роль проекта комплексной схемы организации дорожного движения в процессе создания эффективной транспортной системы городской агломерации, сформулированы цели и задачи научных исследований, предшествующих разработке проекта. Рассмотрены результаты социологических и натурных исследований современного функционирования транспортной системы, определяющие особенности транспортного поведения жителей Чебоксарской городской агломерации. Представлены основные положения комплексной схемы организации дорожного движения и мероприятия по улучшению транспортной и пешеходной связности Чебоксарской городской агломерации, включая строительство и реконструкцию новых автомобильных дорог, а также предложения по классификации и категорированию действующих элементов дорожно-транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: транспортный спрос, схема организации движения, интенсивность движения, транспортная подвижность

Abstract

The article defines the place and role of the draft integrated traffic management scheme in the process of creating an efficient urban agglomeration transport system, and formulates the goals and objectives of scientific research preceding the development of the draft scheme. The results of sociological and field studies of the modern functioning of the transport system are considered, which determine the features of the transport behavior for residents of Cheboksary urban agglomeration. The main provisions of the integrated traffic management scheme and measures to improve the transport and pedestrian connectivity of Cheboksary urban agglomeration, including the construction and reconstruction of new highways, as well as proposals for the classification and categorization of existing elements of road transport infrastructure, are presented.

Keywords: transport demand, traffic management scheme, traffic intensity, transport mobility

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-15-19

ВВЕДЕНИЕ

Комплексная схема организации дорожного движения (КСОДД) представляет собой обязательный документ планирования транспортных систем как для городов, так и для городских агломераций. Минтрансом России 18 февраля 2025 г. утвержден приказ № 49, определяющий состав и содержание документации по организации дорожного движения, в частности КСОДД [1]. Согласно этому приказу, вступившему в силу 28 февраля 2025 г., КСОДД включает в себя утверждаемую часть (титульный лист, паспорт схемы, данные о согласовании, графические материалы) и обосновывающую часть (анализ дорожной ситуации, оценку состояния дорог, варианты решений и их эффективность, очередность реализации, графические схемы).

Внедрение КСОДД направлено на повышение безопасности, пропускной способности улиц и оптимизацию транспортных потоков. Кроме того, реализация мероприятий должна учитывать правовые нормы и современные управленческие решения, обеспечивая комплексный подход к развитию транспортной инфраструктуры [2].

Цель исследования, представленного в публикуемой статье, включала определение основных направлений повышения эффективности функционирования улично-дорожной сети (УДС) Чебоксарской городской агломерации, предупреждение и минимизацию негативных последствий заторовых ситуаций в условиях продолжающегося роста автомобилизации для удовлетворения транспортных потребностей города с минимальными издержками и максимальной безопасностью (снижение аварийности, а также негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения).

Задачи исследования:

анализ перспективных факторов и социально-экономических тенденций, влияющих на спрос передвижения населения; анализ условий безопасности дорожного движения, мест концентрации дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и очагов аварийности;

анализ существующей системы организации дорожного движения и дорожно-транспортных условий на УДС Чебоксарской городской агломерации;

разработка концепции КСОДД и стратегии ее реализации; определение приоритетных направлений развития системы организации дорожного движения Чебоксарской городской агломерации и обоснование выбора оптимального варианта развития УДС и системы организации дорожного движения Чебоксарской городской агломерации;

разработка комплексных адресных мероприятий по совершенствованию организации дорожного движения в Чебоксарской городской агломерации;

определение и обоснование состава мероприятий по организации дорожного движения в Чебоксарской городской агломерации;

определение эффективности предложенных мероприятий по итогам реализации КСОДД.

В рамках исследования по разработке КСОДД Чебоксарской городской агломерации выполнены транспортные и социологические обследования, направленные на изучение интенсивности движения и транспортной подвижности населения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ КСОДД ЧЕБОКСАРСКОЙ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Методы исследования основаны на сборе и углубленном анализе первичной информации о функционировании транспортной системы объекта. Они касаются двух источников получения информации: это натурное исследование функционирования транспортной системы и социологическое исследование транспортного поведения людей. Методика обследования

транспортных потоков включала сбор данных в ключевых точках дорожной сети с использованием видеонаблюдения и анализа направлений маневров. Полученные данные позволили выявить проблемные участки и создать прогнозную модель для оптимизации транспортных потоков. Максимальная интенсивность транспортных потоков индивидуального транспорта в г. Чебоксары наблюдается на Московском проспекте, улицах Калинина, Юлиуса Фучика, Советской и на проспекте Ивана Яковлева. Максимальная интенсивность транспортных потоков грузового транспорта характерна для различных участков автодороги «Волга».

Параллельно проведено социологическое исследование транспортной подвижности с использованием метода личных интервью. Респонденты предоставили информацию о целях поездок, предпочтительных видах транспорта и временных затратах, что позволило уточнить распределение транспортного спроса (рис. 1 и 2).

Представленные на рис. 1 и 2 результаты исследования определяют особенности транспортного поведения жителей Чебоксарской городской агломерации через изменение баланса объема спроса на транспортное поведение с различными целями. По сравнению с транспортными системами других регионов [3–5] в Чебоксарской городской агломерации и в будний, и в выходной день значительно большее число транспортных перемещений составляют передвижения, связанные с учебными целями. Это обстоятельство формирует одну из особенностей функционирования транспортной системы, учет которой в дальнейшем необходим при формировании базовых определяющих соотношений на этапе построения модели транспортного спроса.

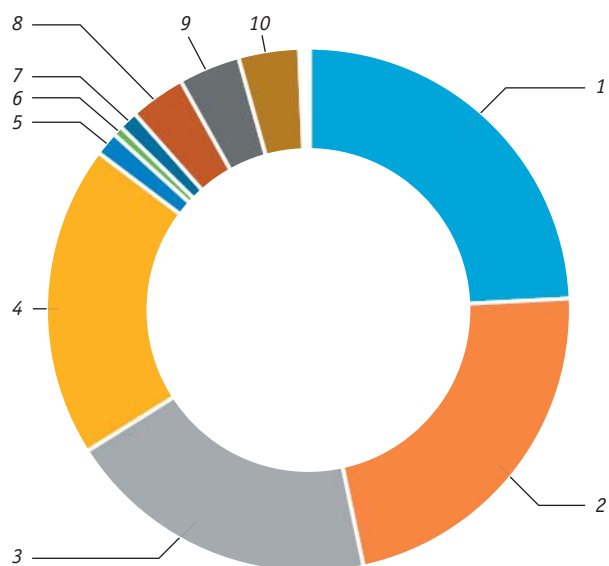


Рис. 1. Распределение поездок жителей Чебоксарской городской агломерации по целям поездок в будний день:
1 — дом–работа; 2 — работа–дом; 3 — дом–прочее; 4 — прочее–дом; 5 — работа–прочее; 6 — прочее–работа; 7 — работа–работа; 8 — прочее–прочее; 9 — дом–учеба; 10 — учеба–дом

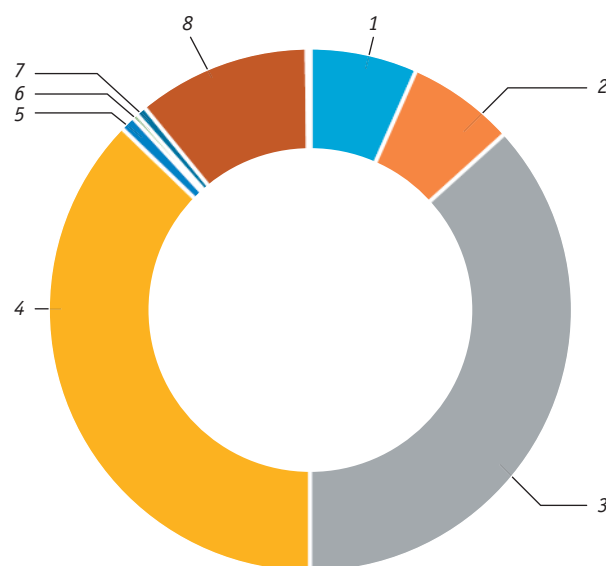


Рис. 2. Распределение поездок жителей Чебоксарской городской агломерации по целям поездок в выходной день:
1 — дом–работа; 2 — работа–дом; 3 — дом–прочее; 4 — прочее–дом; 5 — работа–прочее; 6 — прочее–работа; 7 — работа–работа; 8 — прочее–прочее

В рамках исследования выполнен детальный анализ текущих и прогнозных показателей социально-экономического развития региона, таких как численность населения, объем валового регионального продукта, индекс промышленного производства, индекс потребительских цен и ряд других.

Также проанализировано планируемое развитие системы расселения и застройки. На 1 января 2022 г. население Чувашской Республики составило 1 198 429 чел., из которых 64,2 % проживают в городах и 35,8 % — в сельской местности. За 2021 г. численность населения сократилась на 9446 человек (0,8 %), в основном за счет естественной убыли и миграционного оттока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С 2010 по 2020 г. численность республики снизилась на 4,7 %, при этом численность городского населения росла, а сельская — снижалась ускоренными темпами. Основная причина миграции — более высокий уровень жизни и большее количество рабочих мест в городах.

Чебоксарский городской округ демонстрирует устойчивый прирост населения, тогда как в Новочебоксарске и примыкающих районах в последние годы наблюдается естественная убыль. Прогнозы на 2024–2032 гг. предполагают рост населения на 13,34 %, главным образом за счет развития жилищного строительства в Чебоксарах и Новочебоксарске.

Чебоксарская агломерация остается центром экономической и демографической активности республики, в то время как сельская местность продолжает испытывать отток трудоспособного населения, особенно женщин детородного возраста.

Установлено, что транспортная сеть Чувашской Республики включает 12 557,7 км автомобильных дорог, из которых 85,2 % — местного значения, 12,4 % — регионального и муниципального, 2,5 % — федерального. По плотности дорог с твердым покрытием Чувашия занимает лидирующие позиции в Приволжском федеральном округе.

Основные транспортные магистрали — федеральные трассы М-7 «Волга», А-151 «Цивильск — Ульяновск» и Р-176 «Вятка». Однако значительная часть дорог и мостов требует ремонта, а более 55 % мостовых сооружений находятся в аварийном состоянии.

Железнодорожная инфраструктура представлена участками направлений Москва — Казань — Екатеринбург и Красный Узел — Канаш — Чебоксары. В республике также функционируют аэропорт Чебоксары и внутренние водные пути, включая Чебоксарский речной порт.

Основные проблемы транспортной системы — это высокая загрузка автомобильных дорог, недостаточное развитие инфраструктуры, устаревание городского транспорта и недостаток качественных автомобильных дорог в сельской местности.

Прогнозная математическая модель транспортной системы Чебоксарской городской агломерации, созданная на основе программного обеспечения MATSim, учитывает перемещение жителей с использованием личного, муниципального и межмуниципального транспорта [6–9]. Выполненная актуализация модели включала корректировку данных о расселении, местах приложения труда и о транспортной подвиж-

ности населения, а также добавление в модель подвижного состава общественного транспорта и ограничений для грузового транспорта.

В перспективных сценариях на этапе прогнозного моделирования учтены мероприятия по развитию дорожно-транспортной инфраструктуры Чебоксарской агломерации, обеспечивающие эффективное планирование транспортной системы на долгосрочный период.

При разработке КСОДД были проанализированы данные об эксплуатационном состоянии технических средств организации дорожного движения, состав парка транспортных средств и уровень автомобилизации, параметры, характеризующие дорожное движение, параметры эффективности организации дорожного движения, параметры движения маршрутных транспортных средств, состояние безопасности дорожного движения, причины и условия возникновения ДТП [10, 11].

Выполнен анализ негативного воздействия транспортных средств на окружающую среду, безопасность и здоровье населения, а также анализ финансирования деятельности по организации дорожного движения. Проведена оценка финансовых затрат, связанных с организацией и управлением движением.

В процессе разработки КСОДД предложены мероприятия по улучшению транспортной и пешеходной связанности Чебоксарской городской агломерации, в том числе строительство новых дорог, реконструкция существующих улиц и развитие пешеходной инфраструктуры. Реализация мероприятий запланирована до 2032 г. в рамках трех сценариев — базового, консервативного и оптимального. Основное внимание уделено сокращению времени в пути, повышению доступности транспорта и созданию комфортной среды для пешеходов, включая маломобильные группы населения. Категорирование дорог в Чебоксарской городской агломерации проводится с учетом текущей загрузки, перспективного развития территорий и планируемого строительства. В существующей сети дорог изменений категоричности не требуется. Для реконструируемых и новых участков предусмотрено разделение на магистральные улицы общегородского и районного значения, а также на улицы местного значения. Перспективные категории улиц определены в проектных сценариях КСОДД.

В ходе исследования проанализировано качество функционирования отдельных пересечений и участков УДС Чебоксарской городской агломерации. По полученным результатам сформирован перечень объектов, для которых разработаны локальные мероприятия, позволяющие улучшить качество функционирования транспортной системы и повысить безопасность дорожного движения.

Кроме того, проанализирована эффективность КСОДД, определены целевые показатели транспортной системы, смоделированы различные сценарии ее развития (базовый, консервативный и оптимальный), выполнена оценка социально-экономических эффектов от реализации мероприятий. Также рассмотрены вопросы безопасности движения, экологической нагрузки и транспортного обслуживания, включая прогнозируемые изменения по числу ДТП, объемам выбросов загрязняющих веществ и временным затратам участников дорожного движения. Как показали расчеты, наибольшая эффективность

достигается при реализации оптимального сценария, обеспечивающего улучшение дорожных условий и повышение экономической выгоды для региона.

Итоговая оценка социально-экономических эффектов в результате выполнения мероприятий КСОДД приведена в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, именно реализация оптимального сценария позволяет достичь максимальных социально-экономических эффектов во все годы. Главным фактором является социально-экономический эффект от снижения потерь во времени движения.

Дополнительно выполнен расчет социально-экономической эффективности от реализации оптимального сценария КСОДД (табл. 2). Расчет основан на сравнении общественных затрат и результатов при внедрении проектного варианта с затратами и результатами в случае отказа от его реализации, т.е. при базовом варианте. Результат отражен в расчете чистого дисконтированного дохода (ЧДД), тыс. руб.:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \cdot (1 + E)^{-t},$$

где R_t — эффект от реализации на t -й год; Z_t — капитальные затраты на t -й год; $(1 + E)^{-t}$ — коэффициент дисконтирования (норма дисконта, $E = 0,13$).

На основе выполненного расчета определены очередность и объемы финансирования мероприятий КСОДД Чебоксарской городской агломерации. Первоочередными выбраны мероприятия по ограничению скорости движения транспортных средств, а также мероприятия по введению светофорного регулирования и корректировке режимов работы действующих светофорных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования выполнен анализ организации дорожного движения в Чебоксарской городской агломерации, включая обследование транспортных и пешеходных потоков, а также анкетирование жителей для выявления ключевых проблем. Определены приоритетные поездки жителей Чебоксарской агломерации, связанные с транспортными корреспонденциями в учебных целях. Установлено, что, поскольку основные транспортные потоки сосредоточены на магистраль-

Таблица 1

Суммарная оценка увеличения валового внутреннего продукта при осуществлении мероприятий КСОДД, тыс. руб./год

Эффект	Сценарий	2023 г.	2024 г.	2027 г.	2032 г.
От снижения потерь во времени	Консервативный	115 000	915 270	80544	94099
	Оптимальный	117 542	1 012 830	112 300	236 400
От снижения количества ДТП	Консервативный	62295	53876	40030	22332
	Оптимальный	62295	53876	40030	22332
От снижения экологического ущерба	Консервативный	37	73	183	366
	Оптимальный	310	621	1552	3104
Итого	Консервативный	73832	969 219	845 653	963 688
	Оптимальный	180 147	1 067 327	1 164 582	2 389 436

Таблица 2

Расчет социально-экономической эффективности реализации оптимального сценария КСОДД

Параметр	Значение за период 2023–2032 гг. (с учетом дисконтирования)
Монетизированный эффект от снижения потерь во времени, тыс. руб./год	1 614 3596
Монетизированный эффект от снижения количества ДТП, тыс. руб./год	624 200
Монетизированный эффект от снижения экологического ущерба, тыс. руб./год	19 533
Общий эффект (E), тыс. руб./год	16 787 330
Капитальные вложения (K), тыс. руб./год	14 212 642,43
$E - K$, тыс. руб./год	2 574 687,57
Ставка дисконта	0,11
Срок, лет	10
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.	906 765
Внутренняя норма доходности, %	2,14
Срок окупаемости мероприятий, лет	30

ных улицах, это приводит к заторам на пересечениях. Пешеходная инфраструктура имеет такие недостатки, как препятствия и неровности, узкие или отсутствующие тротуары. Выявлены дефицит парковочных мест у значимых объектов и нарушение правил стоянки, ухудшающие условия движения.

Разработка КСОДД позволила комплексно оценить проблемы транспортной системы и рекомендовать мероприятия по их

решению. Среди предложенных мер — улучшение транспортной и пешеходной связанности, перераспределение потоков, внедрение интеллектуальных систем управления движением, оптимизация работы светофоров, улучшение пересечений, приоритет для общественного транспорта, повышение безопасности и развитие безбарьерной среды. Все они рекомендованы к реализации в соответствии с выбранным сценарием развития.

Сведения об авторе:

Михаил Ростиславович Якимов,
доктор технических наук, директор Института
транспортного планирования Российской академии транспорта

Author's information:

Mikhail R. Yakimov,
DSc in Engineering, Head of Institute of Transport Planning,
Russian Academy of Transport

Литература

1. Об установлении требований к составу и содержанию документации по организации дорожного движения : приказ Минтранса России от 18.02.2025 г. № 49. URL: <https://minjust.consultant.ru/special/documents/document/54732?ysclid=me9h0rhr46980206996>.
2. Якимов М. Р. Математические алгоритмы пространственного анализа объемов транспортного спроса в городах // Информационные технологии и инновации на транспорте : материалы VII Международной научно-практической конференции. Орел : Изд-во ОГУ, 2021. Т. 1. С. 6–15.
3. Якимов М. Р. Подходы к формированию и оценке эффективности маршрутной сети на примере Нового Уренгоя // Транспорт Урала. 2024. № 1 (80). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-3-8.
4. Якимов М. Р. Подходы к формированию и оценке эффективности маршрутной сети на примере города Архангельск // Актуальные проблемы современного транспорта. 2024. № 2 (16). С. 66–73. ISSN 2949-091X.
5. Якимов М. Р., Нестерова А. С., Попов Ю. А. Транспортное планирование: транспорт общего пользования : монография. Москва : Агентство РАДАР, 2024. 458 с.
6. Buslaev A. P., Yashina M. V., Volkov M. Algorithmic and Software Aspects of Information System Implementation for Road Maintenance Management // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2015. Vol. 365. Pp. 65–74.
7. Murray A. T. A coverage model for improving public transit system accessibility and expanding access // *Annals of Operations Research, Annals of Operations Research*. 2003. Vol. 123. Pp. 143–156. DOI:10.1023/A:1026123329433.
8. Guan J. F., Yang H., Wirasinghe S. C. Simultaneous Optimization of Transit Line Configuration and Passenger Line Assignment // *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2003. Vol. 40. Issue 10. Pp. 885–902. DOI: 10.1016/J.TRB.2005.12.003.
9. Zhao F., Ubaka I. Transit Network Optimization — Minimizing Transfers and Optimizing Route Directness // *Journal of Public Transportation*. 2004. Vol. 7. No. 1. Pp. 67–82. DOI: 10.5038/2375-0901.7.1.4.
10. Baaj M. H., Mahmassani H. S. Hybrid Route Generation Heuristic Algorithm for the Design of Transit Networks // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 1995. Vol. 3. Pp. 31–50. DOI: 10.1016/0968-090X(94)00011-S.
11. Трофименко Ю. В., Якимов М. Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов. Пермь : Агентство РАДАР, 2022. 536 с.

References

1. On the establishment of requirements for the composition and content of documentation on the organization of traffic : the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 18.02.2025 No. 49. URL: <https://minjust.consultant.ru/special/documents/document/54732?ysclid=me9h0rhr46980206996>. (In Russian).
2. Yakimov M. R. Mathematical algorithms for spatial analysis of transport demand volumes in cities. *Information technology and innovation in transport : proceedings of the 7th International scientific and practical conference*. Orel : Publishing House of OSU, 2021. Vol. 1. Pp. 6–15. (In Russian).
3. Yakimov M. R. Approaches to the formation and evaluation of the effectiveness for the route network on the example of Novy Urengoy. *Transport of the Urals*. 2024. No. 1 (80). Pp. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-3-8. (In Russian).
4. Yakimov M. R. Approaches to the formation and evaluation of the effectiveness for the route network on the example of Arkhangelsk. *Actual problems of modern transport*. 2024. No. 2 (16). Pp. 66–73. ISSN 2949-091X. (In Russian).
5. Yakimov M. R., Nesterova A. S., Popov Yu. A. Transport planning: public transport : monograph. Moscow : RADAR Agency, 2024. 458 p. (In Russian).
6. Buslaev A. P., Yashina M. V., Volkov M. Algorithmic and Software Aspects of Information System Implementation for Road Maintenance Management. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2015. Vol. 365. Pp. 65–74.
7. Murray A. T. A coverage model for improving public transit system accessibility and expanding access. *Annals of Operations Research, Annals of Operations Research*. 2003. Vol. 123. Pp. 143–156. DOI:10.1023/A:1026123329433.
8. Guan J. F., Yang H., Wirasinghe S. C. Simultaneous Optimization of Transit Line Configuration and Passenger Line Assignment. *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2003. Vol. 40. Issue 10. Pp. 885–902. DOI: 10.1016/J.TRB.2005.12.003.
9. Zhao F., Ubaka I. Transit Network Optimization — Minimizing Transfers and Optimizing Route Directness. *Journal of Public Transportation*. 2004. Vol. 7. No. 1. Pp. 67–82. DOI: 10.5038/2375-0901.7.1.4.
10. Baaj M. H., Mahmassani H. S. Hybrid Route Generation Heuristic Algorithm for the Design of Transit Networks. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 1995. Vol. 3. Pp. 31–50. DOI: 10.1016/0968-090X(94)00011-S.
11. Trofimenko Yu. V., Yakimov M. R. Transport planning: formation of efficient transport systems of large cities. Perm : RADAR Agency, 2022. 536 p. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.11

Методика выявления паттернов транспортного поведения на основе теории распознавания образов

Андрей Владимирович Ахромешин¹

¹Тульский государственный университет, Тула, Россия

A technique for identifying patterns of transport behavior based on pattern recognition theory

Andrey V. Akhromeshin¹

¹Tula State University, Tula, Russia

Аннотация

Предложена методика выявления паттернов транспортного поведения при помощи теории распознавания образов. Описаны основные понятия и методы теории образов, методика распознавания паттернов транспортного поведения, алгоритм распознавания паттерна, математическая постановка задачи распознавания. Приведены способы поиска и выявления паттернов транспортного поведения, их классификация, численные методы расчета динамики параметров состояния транспортной системы.

Разработанная методика позволяет классифицировать типы поведения индивидов, составлять иерархические системы (структуры) паттернов на разных масштабах транспортной сети, исследовать множества и подмножества состояний паттернов.

С практической точки зрения методика может быть использована для снижения погрешности при формировании представления о распределении транспортных корреспонденций по сети в рамках функционирования модуля транспортного прогнозирования, а также для моделирования городской интеллектуальной транспортной системы.

Ключевые слова: транспортное поведение, паттерн, распознавание образов, транспортная система, улично-дорожная сеть, методика

Abstract

A method for identifying patterns of transport behavior using pattern recognition theory is proposed. The basic concepts and methods of image theory, a technique for recognizing patterns of transport behavior, a pattern recognition algorithm, and a mathematical formulation of the recognition problem are described. The methods of searching and identifying patterns of transport behavior, their classification, and numerical methods for calculating the dynamics of transport system state parameters are given.

The developed methodology makes it possible to classify the types of behavior of individuals, compile hierarchical systems (structures) of patterns on different scales of the transport network, and explore sets and subsets of pattern states.

From a practical point of view, the technique can be used to reduce the error in forming an idea of the distribution of transport correspondence across the network within the framework of the functioning of the transport forecasting module, as well as for modeling an urban intelligent transport system.

Keywords: transport behavior, pattern, pattern recognition, transport system, traffic network, methodology

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-20-26

ВВЕДЕНИЕ

В статьях автора [1–4] подробно описаны подходы к изучению паттернов транспортного поведения (ТП) населения и транспортная система индивидуальных перемещений (ТСИП), изучаемая с позиции теории макросистем. Эта теория разработана академиком РАН Ю. С. Попковым [5], который занимается исследованиями в области автоматизации и математического моделирования сложных стохастических систем.

Именно теория паттернов транспортного поведения позволяет рассматривать и анализировать транспортные перемещения индивидов по различным целям, классифицировать типы и классы перемещений, кластеризовать и объединять индивидов со схожим поведением в определенные группы.

Иностранные публикации (например, [6–8]) свидетельствуют об актуальности не просто сбора данных, а информирования населения о состоянии транспортной системы. Это порождает, по сути, ее новую функцию.

Задача автора представленной статьи состояла в разработке комплекса методик для выявления и анализа паттернов ТП, объединения их в методологию управления транспортным поведением. При решении этой задачи использовались такие области знаний, как нелинейная динамика, самоорганизованная критичность, синергетика и теория сложности, теория катастроф, теория принятия решений, теория распознавания образов, теория решения инженерных задач и др.

В статье приводится методика выявления паттернов ТП при помощи теории распознавания образов. Для лучшего понимания материала представляется логичной следующая последовательность изложения материала: основные понятия и методы теории распознавания образов, методика распознавания паттернов транспортного поведения, алгоритм распознавания паттерна, математическая постановка задачи распознавания, анализ результатов.

Приведем основные положения теории распознавания образов.

Распознавание образов — это научная дисциплина, цель которой заключается в классификации объектов по нескольким категориям или классам [9].

Объектами исследования при распознавании образов могут быть изображения, массивы текстовой или иной информации, сигналы (в том числе шумы), табличные данные, медицинские диагностические параметры, явления и процессы в различных системах. К типам систем распознавания относятся детерминистские, вероятностные, логические, структурные, комбинированные.

Основными задачами теории распознавания образов являются математическое описание образов, выбор наиболее информативных признаков, описывающих данный образ, описание классов распознаваемых образов, поиск оптимальных решающих процедур, оценка достоверности классификации образов. Для решения этих задач используется различный математический аппарат — математическая логика, теория графов, топология, математическая лингвистика, математическое программирование и др. [10].

Выделяют такие типы задач распознавания, как непосредственно распознавание, автоматическая классификация образов, выбор информативного набора признаков при распознавании, приведение исходных данных к виду, удобному для распознавания, динамическое распознавание и динамическая классификация, задача прогнозирования [11].

Фактически **распознавание** представляет собой процесс абстракции данных, при котором конечные данные могут полностью отличаться от исходных. Главная цель распознавания образов — обобщение и упрощение объектов исследования.

Выделяют следующие методы распознавания образов: *статистическое распознавание* (применяется для задач с длительным временем протекания процессов в системе, где идет исследование функций, но связь между ними не рассматривается, причем набор функций — это, по сути, характеризующий вектор, который имеет определенную вероятность); *кластеризация данных* (определение и нахождение нескольких подобных кластеров в массиве данных, которые не нуждаются в какой-либо дополнительной информации известных кластеров); применение *нечетких множеств* (они эффективно описывают расширение и содержание понятия, имитируют процесс мышления человека); *структурное распознавание образов*; *синтаксический анализ*; *сопоставление структур*; *приблизительный подход к распознаванию образов*; *логический комбинаторный подход к распознаванию образов*; *использование локальных коэффициентов автокорреляции более высокого порядка* [5].

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ПАТТЕРНОВ ТРАНСПОРТНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Объектом методики является паттерн транспортного поведения, который возникает в транспортной системе и имеет свои равновесные распределения, аттракторы и переходные процессы.

Паттерн транспортного поведения — это совокупность конкретных состояний, которые «выбирает» элемент (индивид, транспортное средство, маршрут, корреспонденция и т.д.) на различных структурных уровнях транспортной макросистемы из подмножества допустимых состояний.

Паттерн ТП показывает не только поведение индивидов на транспортной сети, но и сложные явления, происходящие в самой транспортной системе.

Цель разработки методики — описать способы поиска и выявления паттернов, классифицировать эти паттерны, а также дать численные методы расчета динамики параметров состояния транспортной системы (априорные вероятности и т.д.).

Для выявления паттернов ТП используются следующие основные методы.

1. Методы теории макросистем

Известно, что любая сложная система имеет множество возможных состояний в каждый конкретный момент времени. Переход в более упорядоченное состояние есть процесс непрерывного изменения подмножеств элементов и подмножеств их состояний. Для описания этих состояний используется информационная энтропия.

2. Методы теории самоорганизации

Рассматривается эволюция сложной транспортной системы, при которой происходит переход от менее упорядоченных состояний к более упорядоченным. Для ТП это поток событий во времени, в течение которого определенные группы индивидов имеют схожее поведение и цепочки перемещений. Такие цепочки складываются в различные паттерны поведения, которые можно классифицировать (кластеризовать).

Транспортная система представляется в виде динамической макроскопической системы, в которой задаются подмножества состояний, выбирается способ заполнения подмножеств элементами, находятся априорные вероятности для элементов системы. Далее разрабатывается численный алгоритм решения задачи, который позволяет получить числа заполнения элементов транспортной системы по подмножествам состояний. Совокупность результатов решений нескольких задач есть цифровой паттерн, который представляется в виде графических схем и логического описания [1].

Приведенные выше материалы позволяют сформировать теоретическую базу изучения паттернов ТП. Для практической реализации методики необходимо разработать ее алгоритм.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ ПАТТЕРНОВ ТРАНСПОРТНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Рассмотрим конкретную последовательность действий по выявлению паттернов ТП.

1. Анализ способов получения информации. Для формирования паттернов ТП необходимо знать перемещения каждого индивидуального транспортного средства (ТС) по сети. Существует множество способов получения такой информации, которые можно классифицировать на следующие виды:

ручной, т.е. проведение натурных обследований. Этот способ предполагает большое количество учетчиков и является достаточно трудоемким;

автоматизированный — с применением каких-либо технических средств, которые могут фиксировать проезд транспортных средств. В данном случае обязательна идентификация по государственному регистрационному знаку (ГРЗ) автомобиля, также можно использовать RFID-метки, устройства с GPS-навигацией, тахографы и т.д.

2. Формирование перечня проблем, касающихся полноты и достоверности получаемой информации. Информация от

детекторов, установленных на транспортные средства, недостаточна, поскольку процент автомобилей, оборудованных такими детекторами, на улично-дорожной сети (УДС) очень мал. Поэтому информацию стоит получать с помощью транспортных детекторов — это будет оптимальным вариантом. Вместе с тем следует учитывать, что не каждый перегон и не каждое пересечение транспортной сети оборудованы подобными детекторами.

В интеллектуальных транспортных системах (ИТС) применяется много видов транспортных детекторов, однако большая их часть фиксирует лишь параметры транспортного потока, не идентифицируя каждое транспортное средство. Фиксация транспортных средств как отдельных единиц по их ГРЗ осуществляется только на стратегических детекторах, доля которых составляет не более 10 % от общего количества.

Так как распознавание происходит с помощью обработки видеоизображений, некоторые транспортные средства могут быть идентифицированы некорректно. В частности, на процент качественно получаемой информации существенно влияют погодные условия (снегопад, дождь, яркое солнце). Соответственно для формирования массива данных приходится использовать восстановление изображений.

3. Формирование допущений:

методика посвящена мониторингу, восстановлению и анализу информации о перемещении транспортных средств, составляющих совокупность и таким образом образующих паттерны; способом получения информации является автоматическая фиксация прохождения сечений УДС с помощью расположенных на ней транспортных детекторов, т.е. совокупности аппаратно-технических решений, позволяющих идентифицировать транспортное средство в определенной точке УДС. Под такими устройствами подразумеваются физические комплексы фото-видеофиксации (КФВФ), V2X-технологии, средства навигационного и тахографического контроля и т.д. В данном случае они представляют собой точки входа транспортных средств в сеть и выхода из нее;

допускается получение информации с помощью дополнительных источников, таких как метод «плавающего автомобиля», сведения региональных навигационных систем о перемещении специализированных транспортных средств (автомобилей скорой помощи и других экстренных служб, пассажирского транспорта общего пользования, уборочной техники и т.п.); места расположения транспортных детекторов;

под перемещением понимается пересечение последовательности (фиксация в местах расположения) транспортных детекторов;

перемещение считается законченным, если время между двумя прохождениями транспортных детекторов составляет более X минут при расположении между детекторами на расстоянии Y . Для каждого отдельного случая использования методики время и расстояние выбираются индивидуально;

используются транспортные детекторы, имеющие техническую возможность фиксировать ГРЗ транспортного средства.

4. Создание справочника транспортных детекторов, состоящего из ID детектора, адреса, координат места расположения, фиксируемого направления движения.

5. Сбор данных о перемещениях ТС за выбранный временной период. На этом этапе формируется анонимная база данных (БД), использующая вместо ГРЗ транспортного средства уникальные ID. Заполняются следующие поля БД: дата фиксации прохождения, время прохождения, ID транспортного средства, ID транспортного детектора, фиксируемое направление перемещения, номер перемещения.

6. Верификация данных. Обработка БД путем проверки данных на адекватность (неточность, погрешность) фиксации, очистка данных от случайных шумов, противоречий, дублирования. В соответствии с указанными в п. 2 проблемами возможны неточности полученных данных, что требует очистки, т.е. происходит процесс верификации.

7. Формирование анонимной базы данных.

8. Формирование маршрутов перемещения для каждого уникального ID транспортного средства между детекторами с восстановлением данных о траекториях перемещений.

9. Фиксация паттернов транспортного поведения для выбранного временного периода путем объединения совокупностей перемещений ТС.

10. Выявление закономерностей перемещений для различных временных периодов и направлений движения.

В рамках пп. 9 и 10 осуществляется распознавание паттернов ТП, алгоритм которого подробно описан ниже.

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ПАТТЕРНА

1. На вход системы распознавания поступает информация о цепочках перемещений индивидов по транспортной сети города. Эту информацию необходимо распознать. Объекты, подлежащие распознаванию, называют образами.

2. Задача распознавания образов состоит в соотношении исходного образа одному из классов с заранее определенными параметрами. Соотнесение идет по установленным правилам. Правила соотношения образа одному из классов называются классификаторами и реализуются в блоке классификации.

3. На выходе из блока классификации паттерну должен быть присвоен соответствующий класс, либо должно быть определено, что он не принадлежит ни к одному из классов.

4. Обнаруженный образ паттерна причисляется к тому или иному типу паттернов. Цикл распознавания начинается заново.

Для наглядности представим алгоритм распознавания паттерна в виде схемы (рис. 1).

Взаимодействие функциональных блоков (компонентов) ИТС с внешними информационными системами (ВИС) показано на рис. 2. Изначально источниками информации могут быть данные, собираемые собственными инструментальными подсистемами ИТС или сторонними ВИС, такими как РНИС (региональная навигационная система), ИС «Паутина» (информационно-аналитическая система ГИБДД) и т.д. Информация поступает в модуль внутренних и внешних сервисов, откуда далее передается в модуль транспортного прогнозирования и планирования. Одним из основных инструментов модуля является транспортная модель. При расчете четырехшаговой задачи в текущее время используется матрица корреспонденций, содержащая данные об объемах этих корреспонденций. Разработанная методика позволяет использовать качественную матрицу корреспонденций,

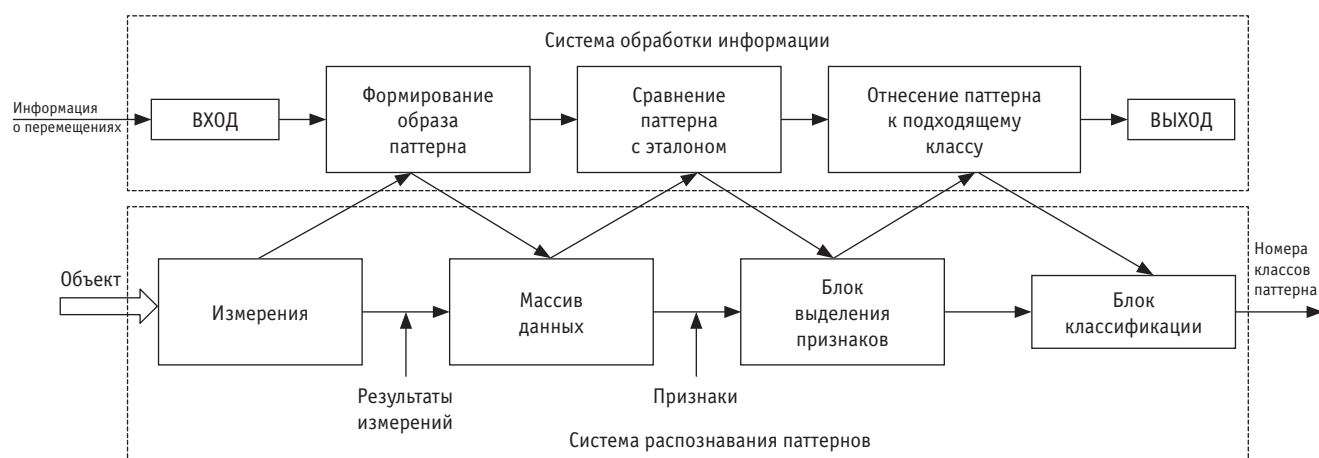


Рис. 1. Структурная схема распознавания паттернов транспортного поведения

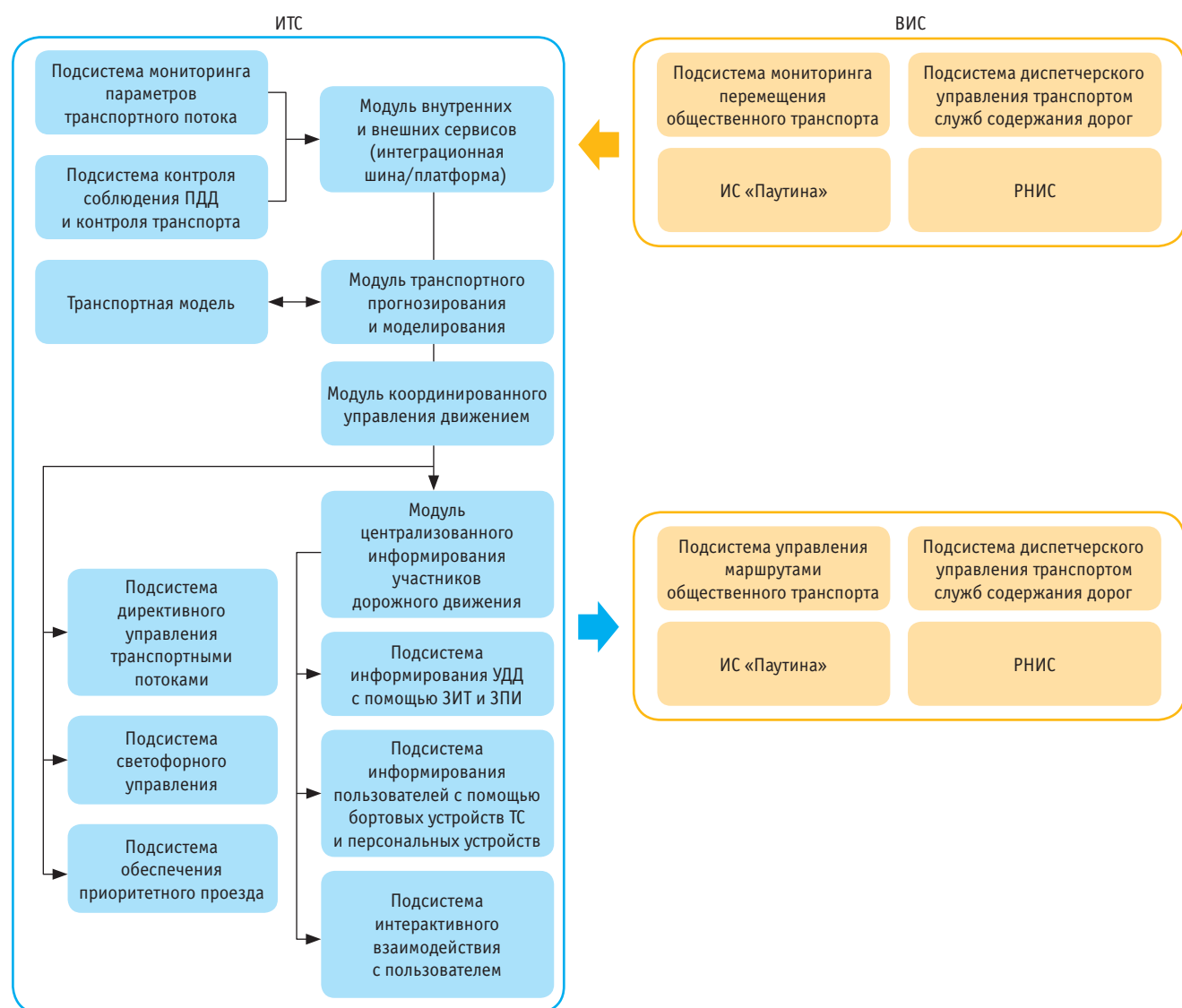


Рис. 2. Структурная схема методики выявления паттернов транспортного поведения

которая дополнительно содержит информацию, конкретизирующую для каждого объема пути перемещения между целями поездок.

Конечным результатом работы модуля транспортного прогнозирования и моделирования будут прогнозные параметры функционирования транспортной системы, в том числе загрузки улично-дорожной сети. Они позволят выбрать наиболее подходящие сценарии управления ИТС в рамках модуля координированного управления движением, передать корректирующие воздействия для инструментальных систем (например, поменять программу управления светофорным объектом), а также передать информацию участникам дорожного движения и держателям ВИС.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ПАТТЕРНОВ ТРАНСПОРТНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Математическая постановка задачи распознавания паттернов транспортного поведения представляет собой задачу классификации, т.е. разделения множества паттернов на типы (классы).

Предположим, что задано множество (М) объектов (индивидов), которое разбивается на конечное число подмножеств состояний. Подмножества и есть классы объектов (паттернов). Каждый объект имеет свой набор признаков, по которым он может быть классифицирован. Данные о принадлежности объекта к тому или иному классу представляются в виде информационного вектора (рис. 3).

Признаками классификации могут быть длина поездки, цель поездки, способ перемещения, тип используемого транспорта,

характерные дни перемещений и т.д. Список признаков зависит от целей исследования и может быть определен непосредственно при постановке задачи.

Построение математической модели включает следующие этапы.

1. Определяется множество паттернов поведения $\omega = \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$.
2. Определяется множество признаков $X = X_1, X_2, \dots, X_m$.
3. Определяется исходное подмножество состояний $Q = Q_1, Q_2, \dots, Q_n$.
4. Определяются (задаются) априорные вероятности $I = I_1, I_2, \dots, I_n$ нахождения паттерна ω в конкретном подмножестве Q . Различают энтропии Хартли, Шеннона, Реньи, Цалиса и т.д. В общем виде энтропия системы может быть описана формулой Шеннона

$$S(a) = - \sum_i p_i \ln p_i(a), \quad (1)$$

где p_i — вероятность события; $i = 1, \dots, n$.

5. Далее идет процесс распознавания в первом приближении и несколько циклов уточнения.
6. После этого определяется вариант разбиения всех паттернов на классы, осуществляется описание каждого класса и границ между ними.
7. Вычисляется критерий эффективности работы системы в первом и уточняющих приближениях.
8. Цикл продолжается до достижения наиболее приближенного критерия эффективности к заданному.

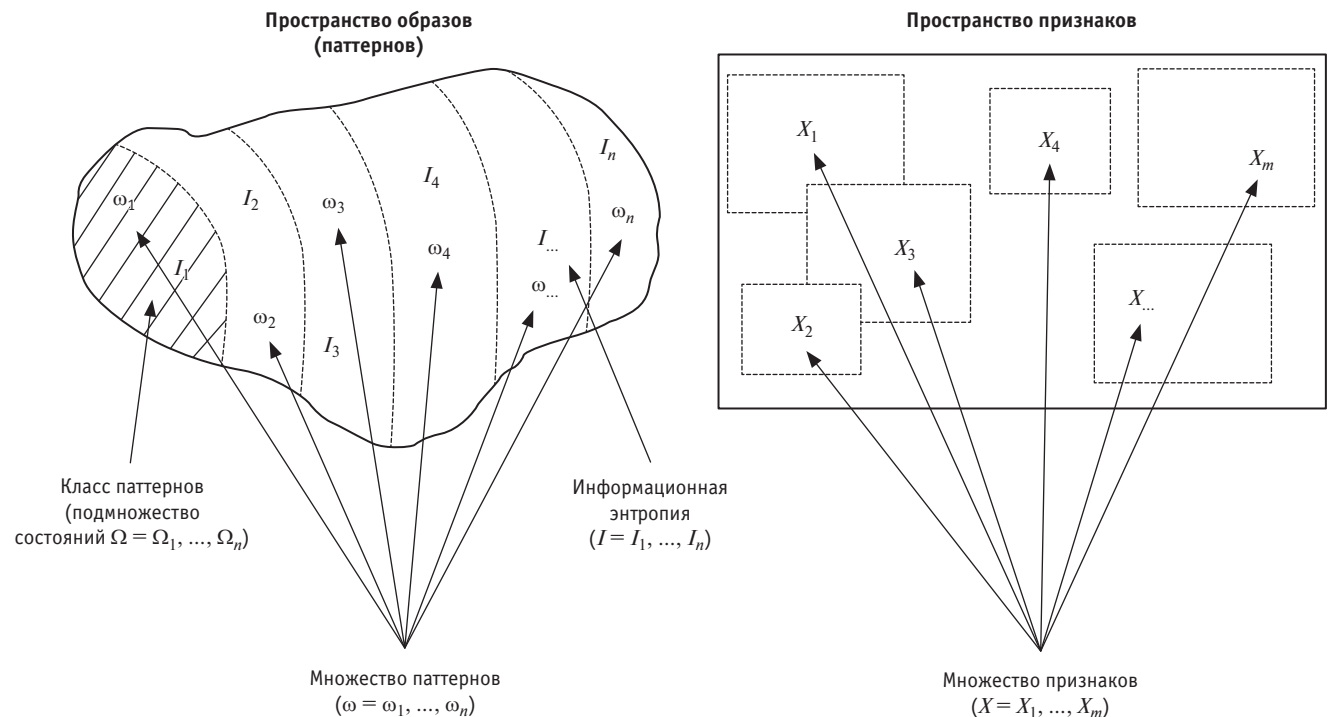


Рис. 3. Схема математической постановки задачи распознавания паттернов транспортного поведения

9. Исходя из заданных правил принятия решений формируются управляющие воздействия на систему.

Отметим, что цели решения задачи распознавания паттернов транспортного поведения индивидов состоят в разработке системы классов объектов, определении пространства признаков объектов и классов, определении границ между классами и переходных зон между ними. Также важной является задача управления системой для достижения оптимума, но в рамках настоящей статьи она не освещается, скажем только, что при ее решении необходимо определять управляющий оператор, алгоритмы распознавания и критерии оптимума.

В целом методика выявления паттернов ТП позволяет: классифицировать типы поведения индивидов; составлять иерархические системы (структуры) паттернов на разных масштабах транспортной сети; исследовать множества и подмножества состояний паттернов ТП;

обобщать паттерны в классы, т.е. решать задачи топологии и типизации транспортного поведения;

математически описывать ТП населения;

снижать погрешность распределения транспортных потоков по УДС для последующей выработки управляющих воздействий на элементы ИТС.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Прогнозирование дорожного трафика, вычисление пиковых нагрузок на УДС, решение задачи перераспределения корреспонденций по транспортной сети на основе временных рядов и прогнозных моделей.

2. Использование полученных результатов для настройки элементов ИТС.

3. Решение задачи оптимизации (издержек, времени и т.д.) для конкретного индивида и всей транспортной сети в целом.

Сведения об авторе:

Андрей Владимирович Ахромешин,

кандидат технических наук,

доцент кафедры «Транспортно-технологические машины и процессы» Тульского государственного университета

4. Оптимизация маршрутной транспортной сети под реальные потребности населения в поездках.

5. Использование для подготовки задачи информирования о состоянии транспортной системы, а также об оптимальных маршрутах перемещений в конкретный день с конкретной целью по заданным критериям (параметрам).

6. Повышение мобильности населения за счет предоставления цифровых сервисов (систем оповещения, мобильных приложений), а также оптимизации затрат на поездки.

7. Составление набора метрик эффективности функционирования транспортной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье показано, что теория распознавания образов применима для решения задач прогнозирования. Если перемещения индивидов по транспортной сети известны и классифицированы, можно строить прогнозные модели для развития транспортной сети города, уточнять матрицы корреспонденций, оптимизировать загрузку улично-дорожной сети и маршруты движения общественного транспорта. Использование такого метода обработки данных позволяет прогнозировать множество вариантов исхода будущих событий для решения задачи оптимизации при учете большого числа взаимосвязанных факторов в системах с различной детерминированностью событий.

С практической точки зрения предложенная методика может применяться для снижения погрешности при формировании представления о распределении транспортных корреспонденций по сети в рамках функционирования модуля транспортного прогнозирования и моделирования городской интеллектуальной транспортной системы.

Продолжением исследований будут апробация разработанной методики, а также предложения для ее внедрения в современные интеллектуальные транспортные системы.

Author's information:

Andrey V. Akhromeshin,

PhD in Engineering,

Associate Professor of Transport and Technological Machines and Processes Department, Tula State University

Литература

- Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Системы управления транспортным поведением населения городских агломераций. Паттерны поведения, методы их распознавания // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2024. № 4. С. 57–75. DOI: 10.25198/2077-7175-2024-4-57.
- Агуреев И. Е., Ахромешин А. В., Пышный В. А. Учет сложности в задачах транспортного спроса // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 6. С. 66–78. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-6-66.
- Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Математическая модель транспортного поведения на основе теории транспортных макросистем // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 6 (97). С. 13–18. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-2.

References

- Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Systems for managing the transport behavior of the population of urban agglomerations. Patterns of behavior, methods of their recognition. *Intellect. Innovations. Investments*. 2024. No. 4. Pp. 57–75. DOI: 10.25198/2077-7175-2024-4-57. (In Russian).
- Agureev I. E., Akhromeshin A. V., Pyshnyi V. A. Taking into account the complexity in the tasks of transport demand. *Intellect. Innovations. Investments*. 2023. No. 6. Pp. 66–78. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-6-66. (In Russian).
- Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Mathematical model of transport behaviour based on transport macrosystems theory. *World of Transport and Transportation*. 2021. Vol. 19. No. 6 (97). Pp. 13–18. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-2. (In Russian).

4. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Подходы к формализации понятия транспортного поведения населения городских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 2. С. 60–70. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.
5. Попков Ю. С. Теория макросистем: Равновесные модели. Москва : Эдиториал УРСС, 2015. 320 с.
6. Chmielewski J., Olenkowicz-Trempała P. Analysis of Selected Types of Transport Behaviour of Urban and Rural Population in the Light of Surveys // Recent Advances in Traffic Engineering for Transport Networks and Systems : proceedings of the 14th scientific and technical conference «Transport Systems. Theory & Practice 2017». Switzerland : Springer International Publishing, 2018. Pp. 27–36. DOI: 10.1007/978-3-319-64084-6_3.
7. Mattson J. Travel Behavior and Mobility of Transportation-Disadvantaged Populations: Evidence from the National Household Travel Survey. Fargo, ND, USA : Upper Great Plains Transportation Institute, 2012. 50 p.
8. Individual Travel Behavior Modeling of Public Transport Passenger Based on Graph Construction / Q. Liang, J. Weng, W. Zhou [et al.] // Journal of Advanced Transportation. 2018. Vol. 5. 13 p. DOI: 10.1155/2018/3859830.
9. Максимова В. В., Вологдин С. В. Применение распознавания образов для решения прикладных задач // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2018. № 1. С. 59–61. ISSN 1813-7946.
10. Лепский А. Е., Броневиц А. Г. Математические методы распознавания образов. Таганрог, 2009. 154 с.
11. Шаталов Н. В. Распознавание образов // Перспективы развития информационных технологий. 2014. № 19. С. 29–34.
4. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Approaches to formalizing the concept of transport behavior of the population of urban agglomerations. *Intellect. Innovations. Investments*. 2021. No. 2. Pp. 60–70. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-60. (In Russian).
5. Popkov Yu. S. Macrosystem theory: Equilibrium models. Moscow : Editorial URSS, 2015. 320 p. (In Russian).
6. Chmielewski J., Olenkowicz-Trempała P. Analysis of Selected Types of Transport Behaviour of Urban and Rural Population in the Light of Surveys. *Recent Advances in Traffic Engineering for Transport Networks and Systems* : proceedings of the 14th scientific and technical conference «Transport Systems. Theory & Practice 2017». Switzerland : Springer International Publishing, 2018. Pp. 27–36. DOI: 10.1007/978-3-319-64084-6_3.
7. Mattson J. Travel Behavior and Mobility of Transportation-Disadvantaged Populations: Evidence from the National Household Travel Survey. Fargo, ND, USA : Upper Great Plains Transportation Institute, 2012. 50 p.
8. Liang Q., Weng J., Zhou W. [et al.]. Individual Travel Behavior Modeling of Public Transport Passenger Based on Graph Construction. *Journal of Advanced Transportation*. 2018. Vol. 5. 13 p. DOI: 10.1155/2018/3859830.
9. Maksimova V. V., Vologdin S. V. Application of pattern recognition for solving applied problems. *Socio-economic management: theory and practice*. 2018. No. 1. Pp. 59–61. ISSN 1813-7946. (In Russian).
10. Lepskiy A. E., Bronevich A. G. Mathematical methods for pattern recognition. Taganrog, 2009. 154 p. (In Russian).
11. Shatalov N. V. Pattern recognition. *Prospects for development of information technology*. 2014. No. 19. Pp. 29–34. (In Russian).

Выбор конструкции муфты тягового привода грузового электровоза для движения со скоростями до 160 км/ч

Александр Петрович Буйносов¹, Евгений Александрович Ширшов¹

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Selection of coupling design for traction drive of electric freight locomotive for movement at speeds up to 160 km/h

Alexander P. Buynosov¹, Evgeniy A. Shirshov¹

¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье рассматриваются конструкции муфт продольной компенсации для использования на перспективном тяговом приводе скоростного грузового электровоза. В настоящее время тяговые приводы грузовых электровозов непригодны для движения со скоростями свыше 100–120 км/ч. Ограничениями конструкционной скорости являются требования к обеспечению надежности тягового привода, а также величина воздействия бандажей колесных пар на рельс с повышением скорости движения локомотива. Для выбора наиболее совершенных технических решений в статье анализируются конструкции муфт тяговых приводов II класса, которые могут быть использованы на грузовых локомотивах, развивающих скорость движения до 160 км/ч.

Ключевые слова: электровоз, тяговый привод, муфта, продольная компенсация, редуктор, тяговый электродвигатель, конструкция

Abstract

The article discusses the design of longitudinal compensation couplings for use on a promising traction drive of a high-speed freight electric locomotive. Currently, traction drives of electric freight locomotives are unsuitable for movement at speeds above 100–120 km/h. The limitations of the structural speed are the requirements for ensuring the reliability of the traction drive, as well as the magnitude of the impact of the wheelset bands on the rail with an increase in the speed of the locomotive. To select the most advanced technical solutions, the article analyzes the designs of class II traction drive couplings that can be used on freight locomotives with speeds up to 160 km/h.

Keywords: electric locomotive, traction drive, coupling, longitudinal compensation, gearbox, traction motor, construction

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-27-34

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня железнодорожные контейнерные перевозки не только являются неотъемлемой частью современной торговли, сочетая в себе удобство погрузки и транспортировки, но и показывают устойчивую тенденцию роста. Так, в 2011 г. их объем составлял 2,9 млн TEU, в 2017-м — 3,9 млн TEU, а в 2023-м — уже 7,4 млн TEU, при этом совокупный среднегодовой темп увеличения объемов достиг 8,6 % [1, 2].

Рост объемов, конкуренция со стороны автомобильного транспорта, необходимость сокращения времени доставки требуют повышения скорости железнодорожных контейнерных перевозок. В ответ на эту тенденцию формируются ускоренные контейнерные поезда, состоящие из вагонов-платформ с тягой пассажирскими локомотивами. Основные достоинства таких поездов заключаются в высокой маршрутной скорости (по сравнению с обычными грузовыми поездами), низкой себестоимости отправки грузов (по отношению к автомобильному транспорту и повагонным отправкам) и в своевременности доставки грузов [1, 2]. Контейнерные поезда имеют приоритет проследования на уровне пассажирских поездов, сформированный состав не подвергается расформированию и сортировке на станциях в пути следования, кроме того, контейнерные поезда следуют в соответствии со строгим графиком движения — по выделенным «жестким ниткам» [1, 2].

Специально для формирования контейнерных поездов вагоностроители разрабатывают новые вагоны-платформы с эксплуатационной скоростью 160 км/ч. В качестве примера можно привести платформу модели 13-6954 производства ОАО «Трансмаш» или опытную вагон-платформу модели 13-6704 компании «Синара — Транспортные Машины».

Кроме того, для формирования контейнерных поездов требуется грузовой электровоз с конструкционной скоростью 160 км/ч, который при необходимости может использоваться и в пассажирском движении, осуществляя в одну сторону ведение грузового состава, а в другую — пассажирского. Разработка и дальнейшая эксплуатация грузопассажирского электровоза позволят увеличить скорость грузоперевозок, сократить номенклатуру комплектующих изделий для ремонта и унифицировать технологию ремонта.

Современные грузовые магистральные локомотивы (электровозы 2ЭС6, 2ЭС7, 2ЭС10, 3ЭС8 и др., тепловозы 2ТЭ116, 2ТЭ25К, 3ТЭ35А и т.д.) рассчитаны на движение с максимальной скоростью 100–120 км/ч, что обусловлено особенностями географии и профиля пути нашей страны. Развитие и строительство новых железнодорожных линий в рамках реализации проектов международных транспортных коридоров, таких как «Север — Юг» и «Запад — Восток» [3], обеспечит не только перевозку грузов с большими скоростями движения, но и значительный прирост объемов грузоперевозок [4]. Вместе с тем повышение скорости движения грузового локомотива связано с необходимостью вводить большое количество ограничений на его конструкцию и внедрять технические решения, применяемые на пассажирских магистральных тепловозах и электровозах. Это обусловлено тем, что при увеличении скорости разрушающее воздействие на путь от неподрессоренных масс грузового локомотива возрастает.

Чтобы обеспечить высокие динамические качества разрабатываемого грузового локомотива, необходимо комплексно пересмотреть конструкцию каждого его узла. Самые кардинальные и масштабные изменения затронут экипажную часть, в том числе тяговый электропривод (ТЭП) — один из наиболее важных и нагруженных элементов экипажной части локомотива.

ТЯГОВЫЕ ПРИВОДЫ ЛОКОМОТИВОВ

По степени динамического совершенства различают три класса тяговых приводов [5, 6].

I класс — ТЭД (тяговый электродвигатель) и редуктор большей частью своей массы опираются на ось колесной пары. Привод I класса имеет наихудшие значения динамических показателей, при этом ТЭП является наиболее простым в производстве и обслуживании, а также самым дешевым. Из-за низкой защищенности тягового двигателя от вибраций, ударов и воздействия динамических моментов [6] ТЭП I класса чаще всего применяют на магистральных электровозах (ВЛ8, ВЛ11, ВЛ22, ВЛ80, 2ЭВ120, 2ЭС5К, 2ЭС6, 2ЭС7, 2ЭС10, 3ЭС8 и др.) и тепловозах (ТЭ3, ТЭ10, М62, 2ТЭ25, 2ТЭ116 и др.) с конструктивными скоростями движения до 100–120 км/ч, а также на маневровых тепловозах (ТГМ1, ТГМ4, ТЭМ2, ЧМЭ3 и т.п.).

II класс — ТЭД опирается на раму тележки, а редуктор — на ось колесной пары. При раздельном опирании ТЭД и редуктора невозможно избежать расцентровок осей ТЭД и входного вала редуктора. Ввиду возможной несоосности валов для обеспечения передачи крутящего момента в эксплуатации применяют компенсационные муфты различных конструкций. В зависимости от конструкции приводы II класса по динамическим свойствам могут приближаться к приводам I или III класса [5]. Приводы II класса используются на пассажирских электровозах со скоростями движения до 200 км/ч (электровозы серии ЧС и ЭП200), а также на грузовых и грузопассажирских электровозах фирмы ASEA, серии электровозов Vectron компании Siemens.

При скоростях движения до 400 км/ч на электропоездах используется II класс ТЭП, это обусловлено меньшей массой тягового привода, меньшей величиной передаваемого момента и, как следствие, меньшей нагрузкой на компенсирующую муф-

ту. II класс ТЭП применялся на отечественных электропоездах серии ЭР, ЭД, ЭТ, ЭС2^{В/И}, ЭВС 1/2. За рубежом этот привод широко используется на подвижном составе фирмы Stadler (Smile, Kiss, Flirt) и компании Siemens (платформа Velaro, ICE) и др.

III класс — ТЭД и редуктор опираются на раму тележки. III класс ТЭП обладает наиболее высокими значениями динамических показателей, самый дорогой в производстве, надежный. Наибольшие колеблющиеся массы в виде ТЭД и редуктора поддрессорены, чем обеспечиваются лучшие условия для их работы [6]. Опорно-осевой ТЭП широко применяется на зарубежном подвижном составе — BB1500, BB16000 (Франция), E120 (ФРГ) и др. На отечественном подвижном составе III класс тягового привода распространен в пассажирском движении, на магистральных электровозах (ВЛ84, ЭП200, ЭП20 и др.) и тепловозах (ТЭП60, ТЭП70, ТЭП80 и др.).

Как уже было отмечено, на современных грузовых локомотивах используется тяговый привод I класса, главный недостаток которого — большая величина неподрессоренной массы, из-за чего возникает множество проблем. Перечислим основные из них.

1. Высокое динамическое воздействие на верхнее строение пути. Большие нагрузки на зону контакта колеса и рельса приводят к снижению коэффициента сцепления колеса с рельсом, а также к повышенному износу рельсов и бандажей колесных пар.

2. Слабая виброзащищенность от ударов, возникающих при прохождении стыков и неровностей пути, а также повышенная вибрация. Это одни из главных причин, которые приводят к повреждению и выходу из строя основных элементов тягового привода — тягового электродвигателя и редуктора [7]. А поскольку тяговый привод является нерезервируемым узлом, его отказ чреват выходом из строя всего локомотива, что недопустимо.

3. Высокие значения динамических моментов. Динамические моменты, возникающие из-за непрямолинейности траектории движения колеса, кинематического несовершенства схемы тягового привода и т.д., становятся причиной дополнительных динамических нагрузок в приводе, обусловленных переменными ускорениями корпусов ТЭД и редуктора при эксплуатации. Это, в свою очередь, оказывает ударное воздействие на элементы тягового привода и в дальнейшем выводит его из строя.

Чтобы увеличить конструкционную скорость локомотивов, необходимо снизить неподрессоренную массу колесно-моторного блока. При этом используют тяговые приводы II и III классов, неподрессоренная масса которых соответственно на 1200 и 1800 кг ниже по сравнению с приводами I класса [8]. Для унификации конструкции с тяговым приводом I класса в качестве более дешевого варианта принят II класс тягового привода [9, 10].

Согласно результатам исследований [11, 12], использование тягового привода II класса по сравнению с приводом I класса позволяет:

- снизить величину неподрессоренной массы в 1,5–1,7 раза (на 2100–2800 кг) для коллекторных и на 30–40 % (на 1300–1600 кг) для бесколлекторных ТЭД;

повысить коэффициент сцепного веса с 0,832 до 0,860 (для экипажной части тепловоза 2ТЭ116);

устранить зависимость динамических моментов в тяговом приводе от жесткости пути, снизить коэффициент динамики привода с 1,6–1,8 (2ТЭ10Л) и 0,97 (ВЛ80^к) до 0,79–0,83 (2ТЭ116 с упругим зубчатым колесом и 2ТЭ121);

повысить коэффициент сцепления колеса с рельсом на 10–15 % (по сравнению с интегрированным тяговым приводом I класса).

С точки зрения конструкции главное отличие тяговых приводов II класса — компенсирующая муфта, которая представляет собой высоконагруженное шарнирное соединение. Конструкция муфты должна обеспечивать надежную передачу тягового момента большой величины, при этом иметь компактное исполнение и достаточные допустимые углы отклонения для компенсации несоосности валов ТЭД и редуктора [13, 14].

СУЩЕСТВУЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ МУФТ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ТЯГОВЫХ ПРИВодОВ II КЛАССА

Рассмотрим известные тяговые приводы II класса для выявления наиболее совершенных конструкций компенсационных муфт.

В отечественном локомотивостроении ТЭП II класса начали применять на пассажирских электровозах с 1960-х гг. Первым был пассажирский электровоз ЧС1, на котором использовалась муфта продольной компенсации с торсионным валом фирмы Secheron (рис. 1).

Крутящий момент передается через Т-образные фланцы (поводки). К якорю прикреплен ведущий поводок полумуфты 2, который передает крутящий момент через упругие пластины 1 по торсионному валу 4 к ведущему поводку полумуфты со стороны шестерни редуктора 5, а от него через упругие пластины крутящий момент передается на ведомый поводок полумуфты со стороны шестерни редуктора 7. Муфта фирмы Secheron не имеет подвижных соединений, требующих смазывания и устранения износа трущихся деталей, что обеспечивает ее долговечность. Осевые размеры поводков и пластин минимальны и не создают проблем при вписыва-

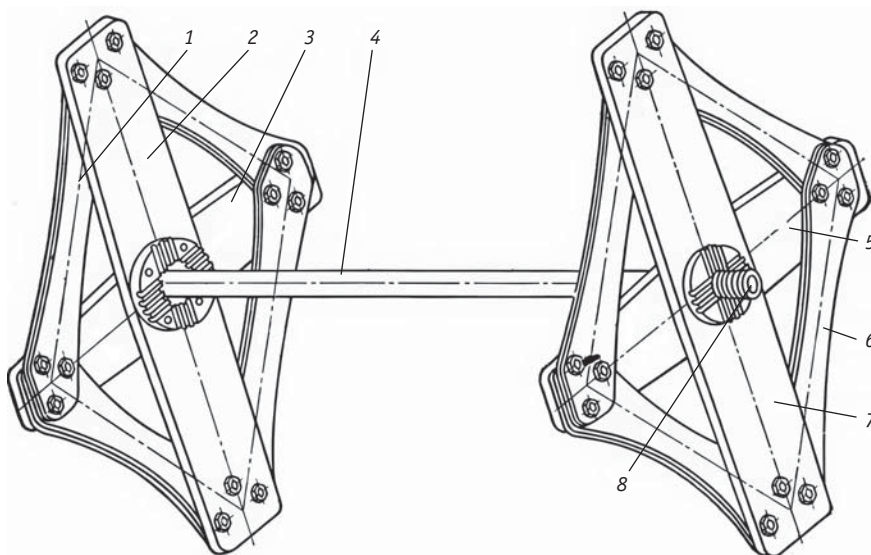


Рис. 1. Муфта продольной компенсации фирмы Secheron [5]:

1, 6 — упругие пластины; 2, 3 — ведущий и ведомый поводки полумуфты (сторона якоря ТЭД); 4 — торсионный вал; 5, 7 — ведущий и ведомый поводки полумуфты (сторона шестерни редуктора); 8 — муфта крепления торцевого шлицевого соединения

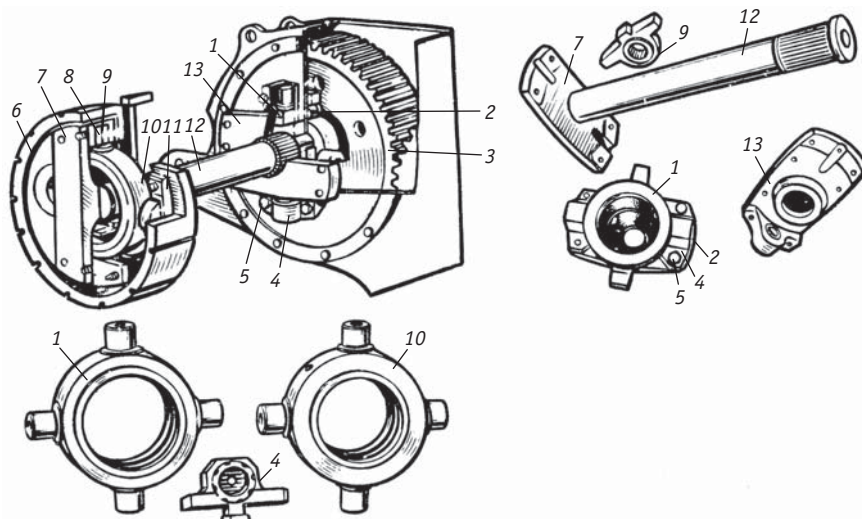


Рис. 2. Тяговая муфта фирмы Škoda [5]:

1, 8, 10 — крестовины; 2, 7, 13 — поводки; 3 — шестерня; 4, 9, 11 — подшипники; 5 — болты крепления подшипников; 6 — шлицевой барабан; 12 — торсионный вал

нии ТЭД по габаритам. Основными недостатками этой муфты являются поводки, набранные из тонких пластин и образующие статически неопределимую систему, что требует высокой точности расположения осей пластин и размеров отверстий для равномерной передачи усилий всем пластинам. Помимо этого муфта неремонтопригодна: при изломе любой из пластин поводок подлежит замене без возможности восстановления.

В связи с недостатками муфты Secheron на заводе фирмы Škoda был разработан привод, внедренный на пассажирском электровозе ЧС3. В дальнейшем, вплоть до 1980-х гг., после небольших доработок тяговые электроприводы с муфтой фирмы Škoda (рис. 2) использовались на всех поставляемых в СССР пассажирских электровозах, таких как ЧС4 (160 км/ч) и ЧС7 (160 км/ч).

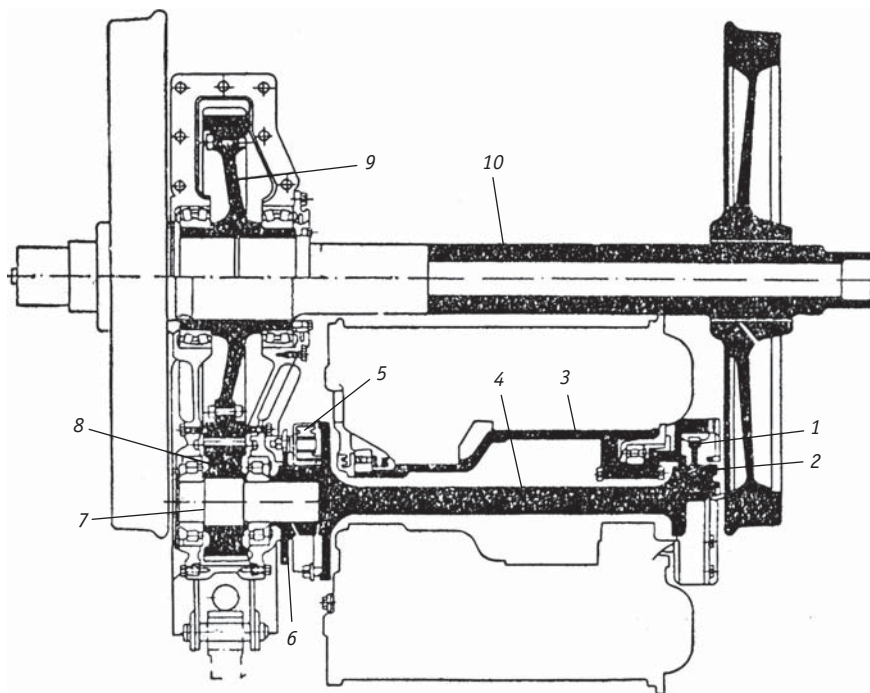


Рис. 3. Тяговый привод фирмы ASEA [15]:

1 — зубчатая муфта; 2 — зубчатая муфта торсиона; 3 — полый вал ТЭД; 4 — торсионный вал;
5, 6 — резинометаллические блоки; 7 — входной вал редуктора; 8 — шестерня;
9 — большое зубчатое колесо; 10 — колесная пара

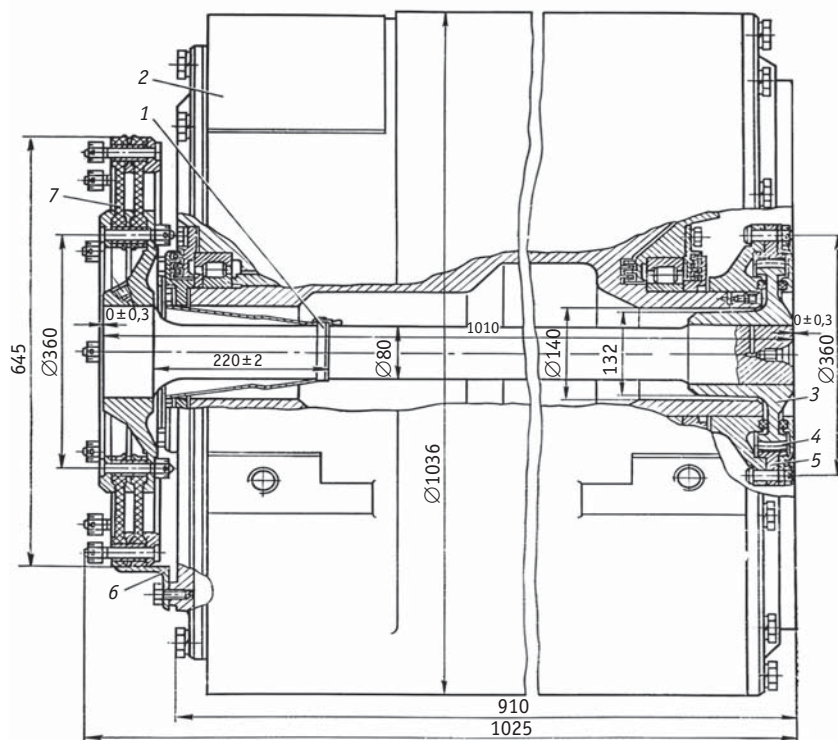


Рис. 4. Муфта тягового привода тепловоза 2ТЭ121 [6]:

1 — торсионный вал; 2 — ТЭД; 3 — колесо зубчатой муфты; 4 — зубчатая муфта;
5 — венец зубчатой муфты; 6 — монтажное крепление муфты; 7 — резинокордная диафрагма

Как видно из рис. 2, муфта продольной компенсации фирмы Škoda состоит из двух шарниров Гука, обеспечивающих относительные смещения валов якоря и вала редуктора, но не обеспечивающих осевые перемещения. Для компенсации осевых смещений служит шлицевой барабан 6 с 12 пазами, в которые входят шлицы полого якоря.

Достоинства привода фирмы Škoda — надежность, ремонтопригодность и удобство в эксплуатации. Но при этом привод конструктивно сложный: для его производства и обслуживания требуются обширная технологическая база и хорошее оборудование. Также к недостаткам привода относятся наличие пар трения, которые подвержены износу, поэтому за ними необходимо следить и смазывать при эксплуатации. Кроме того, шлицевое соединение требует высокой точности изготовления, чтобы усилия между шлицами барабана были распределены равномерно. Использование карданных шарниров позволило уменьшить длину торсионного вала по сравнению с компенсирующей муфтой фирмы Secheron (с 760 до 665 мм), что снизило крутильную податливость торсиона и, как следствие, ухудшило компенсацию динамической составляющей крутящего момента. Помимо этого для ремонта и осмотра шлицевого барабана с карданным шарниром необходима разборка ТЭД, что усложняет обслуживание тяговой муфты.

Шведская фирма ASEA для тягового привода грузопассажирских локомотивов серии Rc разработала собственный ТЭП (рис. 3).

Как видно из рис. 3, в конструкции упругой муфты используются резинометаллические блоки 5, 6 (сайлентблоки). Один фланец муфты посажен на входной вал редуктора, другой — на часть торсионного вала. Упругая втулочная муфта компенсирует только угловые перемещения, зубчатая — угловые и осевые.

К достоинствам муфты ASEA относится большая крутильная податливость по сравнению с муфтой фирмы Škoda, что обусловлено реализацией не только максимальной длины торсионного вала, но и применением сайлентблоков в конструкции упругой муфты. Кроме того, сайлентблоки не требуют смазки в экс-

плуатации, а наружное исполнение зубчатой муфты позволяет проводить ревизию без разборки ТЭД. Конструктивно компенсирующая муфта ASEA проще муфты фирмы Škoda, а использование резинометаллических блоков повышает долговечность тягового привода, так как, в отличие от игольчатых подшипников, используемых в тяговом приводе фирмы Škoda, сайлент-блоки менее подвержены разрушению от воздействия динамических нагрузок.

К недостаткам компенсирующей муфты фирмы ASEA следует отнести большие габариты. Кроме того, необходимо отлаженное производство тяжело нагруженных резинометаллических блоков, способных передавать большой крутящий момент и допускать необходимые углы отклонения. То же относится и к зубчатой муфте с бочкообразными венцами, требующими отработанной технологии производства для изготовления зубьев с высокой точностью и последующей термической обработкой. И еще нельзя не отметить явную зависимость ресурса упругой и зубчатой муфт от величины расцентровки осей ТЭД и входного вала редуктора.

В отечественном локомотивостроении привод фирмы ASEA впервые применили на экспериментальном тепловозе 2ТЭ121, но с некоторыми изменениями. В частности, резинометаллические блоки были заменены дисковой резинокордной муфтой конструкции ВНИКТИ с малыми осевыми размерами (рис. 4).

Как видно из рис. 4, тяговый момент, как и в приводе фирмы ASEA, передается через такую последовательность: якорь ТЭД — зубчатая муфта 4 — упругая муфта (в данном случае — две резинокордные диафрагмы 7). Отличие заключается только в типе упругой муфты.

Достоинства тягового привода тепловоза 2ТЭ121, как и тягового привода фирмы ASEA, — высокая крутильная податливость, надежность, простота конструкции. Вместе с тем в тяговом приводе тепловоза 2ТЭ121 были устранены недостатки привода ASEA: высоконагруженные резинометаллические блоки заменили резинокордными фланцами, что позволило увеличить допустимые осевые габариты ТЭД.

Тяговый привод тепловоза 2ТЭ121 в дальнейшем был модифицирован и использовался на электровозах ЭП1, ЭП1М (140 км/ч) и ЭП10 (160 км/ч). Отличия модифицированного тягового привода электровозов от привода 2ТЭ121 заключаются в переносе зубчатой муфты в глубь ТЭД, а также в переработке конструкции упругой резинокордной муфты. Муфта тягового привода ЭП1 и ЭП10 представлена на рис. 5.

Большая площадь трущихся поверхностей в модифицированной конструкции позволила увеличить силы трения между нажимными фланцами и резинокордными дисками в 2 раза при той же силе нажатия.

Результатом модернизации стало повышение несущей способности тяговой муфты, снижение стоимости и требований к материалу зубчатой муфты. При этом нужно подчеркнуть, что модернизация тягового привода тепловоза 2ТЭ121 не лишена и недостатков, таких как низкая ремонтопригодность (из-за необходимости разборки ТЭД для освидетельствования зубчатой муфты), меньшая крутильная податливость торсионного вала (из-за уменьшенной длины), а следовательно, худшая компенсация динамических моментов. Нельзя не отметить бо-

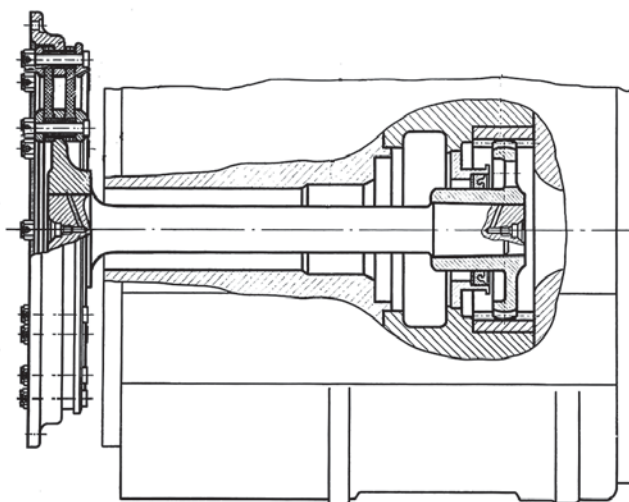


Рис. 5. Муфта тягового привода электровозов ЭП1 и ЭП10 [16]

лее строгие требования к сборке и балансировке компенсирующей муфты модернизированной конструкции, а также необходимость увеличения радиальной жесткости резинокордных элементов в связи с повышением конструкционной скорости локомотива [17].

Изменения конструкции тягового привода фирмы ASEA можно проследить на примере не только тепловоза 2ТЭ121, но и грузопассажирского электровоза ДС3 с асинхронным ТЭД мощностью 1200 кВт, тяговая муфта которого представлена на рис. 6.

При разработке этой муфты была поставлена цель унифицировать конструкцию двух зубчатых муфт. Основные достоинства муфты электровоза ДС3 — возможность реализовать более высокую нагрузочную способность по сравнению с тяговой муфтой фирмы ASEA и муфтой тепловоза 2ТЭ121, а также надежная передача крутящего момента во всех режимах работы привода без дополнительных вибраций со стороны резинокордных элементов.

Достоинства и недостатки конструкций всех рассмотренных муфт сведены в табл. 1.

Как уже было отмечено, основная цель выполненного анализа — поиск наиболее совершенных технических решений. Для грузового электровоза самыми важными параметрами являются обеспечение высокой нагрузочной способности в сочетании с высокой надежностью и удобством при обслуживании и ремонте тягового привода, минимальные осевые размеры муфты для лучшего вписывания ТЭД, а также наибольшая длина промежуточного вала компенсирующей муфты.

Анализ достоинств и недостатков конструкций компенсационных муфт (см. табл. 1) позволяет сделать следующие выводы. Муфта фирмы Secheron не подходит для ТЭП грузовых локомотивов из-за неремонтопригодности и низкой нагрузочной способности. Муфту фирмы Škoda также не рекомендуется использовать ввиду сложности конструкции, значительного влияния динамических моментов в тяговом приводе на ресурс дорогих и сложных в производстве игольчатых подшипников. Помимо этого компоновочное решение о размещении части компенсационной муфты внутри полого якоря

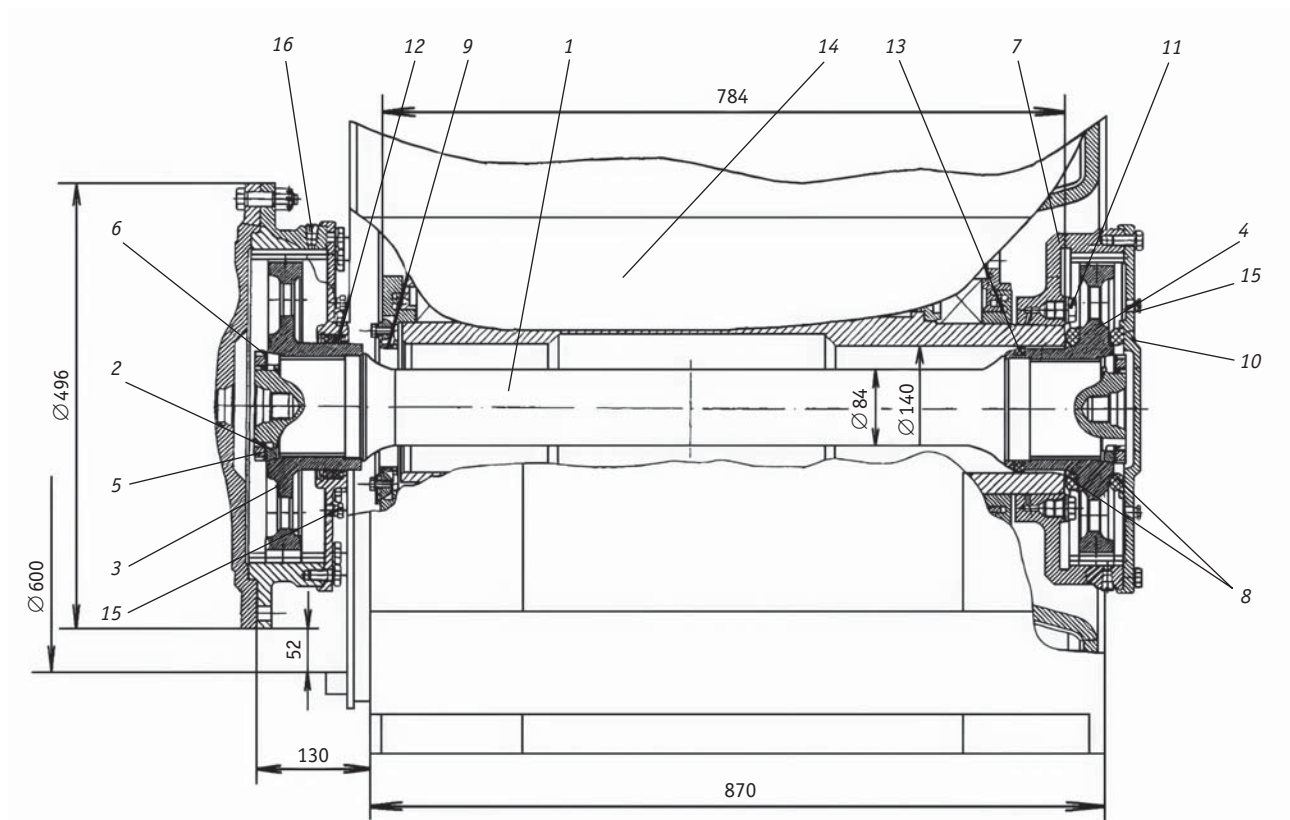


Рис. 6. Муфта электровоза ДСЗ [18]:
 1 — торсионный вал; 2 — втулка; 3, 4 — полумуфты; 5 — гайка; 6 — шайба; 7 — зубчатая муфта; 8, 9 — амортизаторы; 10 — крышка; 11, 15 — пробки; 12, 13 — манжеты; 14 — ТЭД; 16 — заглушка

Таблица 1

Сравнение конструкций муфт продольной компенсации

Наименование	Достоинства	Недостатки
Муфта Secheron	Не требует обслуживания. Долговечность. Малые осевые размеры. Максимальная длина промежуточного вала. Простота конструкции	Компенсация осевых перемещений малой амплитуды. Низкая ремонтопригодность. Низкая нагрузочная способность. Высокие требования к точности изделия
Муфта Škoda	Долговечность. Допускает большие углы отклонений и осевых перемещений	Необходимость в обслуживании. Сложность конструкции. Необходимость обширной технологической и инструментальной базы для производства карданов. Малая длина промежуточного вала. Сложность обслуживания
Муфта ASEA	Максимальная длина промежуточного вала. Удобство обслуживания и ремонта. Простота конструкции. Надежность	Большие осевые габариты. Необходимость отработанной технологии производства зубчатых муфт и сайлентблоков. Зависимость ресурса сайлентблоков от величины расцентровки осей
Муфта тепловоза 2ТЭ121	Максимальная длина промежуточного вала. Удобство обслуживания и ремонта. Простота конструкции. Надежность. Малые осевые габариты	Необходимость отработанной технологии производства зубчатых муфт и резинокордных элементов. Зависимость ресурса упругой муфты от величины расцентровки осей

Окончание табл. 1

Наименование	Достоинства	Недостатки
Муфта электровозов ЭП1, ЭП1М, ЭП10	Простота конструкции. Надежность. Малые осевые габариты муфт. Меньшие требования к материалу зубчатой муфты. Высокая нагрузочная способность	Необходимость отработанной технологии производства зубчатых муфт и резинокордных элементов. Зависимость ресурса упругой муфты от величины расцентровки осей. Малая длина промежуточного вала. Сложность обслуживания
Муфта электровоза ДСЗ	Простота конструкции. Надежность. Малые осевые габариты. Высокая нагрузочная способность. Максимальная длина промежуточного вала. Удобство обслуживания и ремонта	Необходимость отработанной технологии производства зубчатых муфт. Высокие требования к материалу зубчатых муфт. Необходимость обслуживания

ТЭД, а не за его пределами представляется наименее предпочтительным из-за трудностей обслуживания элементов муфты в эксплуатации, а также из-за уменьшения длины торсионного вала, что ухудшает компенсацию динамических моментов. Наиболее перспективными являются конструкция компенсационной муфты фирмы ASEA и ее усовершенствованные варианты. Однако, как уже было отмечено, для лучшего вписывания ТЭД требуются минимальные размеры компенсационной муфты в осевом направлении. Именно поэтому муфту ASEA нельзя рекомендовать к использованию, так как в сравнении с конструкциями муфт тепловоза 2ТЭ121 и ДСЗ она имеет большие осевые размеры.

Исходя из анализа табл. 1 наиболее перспективными для дальнейшего внедрения следует признать конструкцию муфты тягового привода электровоза ДСЗ, а также конструкцию муфты тягового привода электровозов ЭП1 и ЭП10 без переноса зубчатой муфты в глубь ТЭД (для сохранения максимальной возможной длины торсионного вала).

Сведения об авторах:

Александр Петрович Буйносов,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга»
Уральского государственного университета путей сообщения

Евгений Александрович Шишов,
аспирант кафедры «Электрическая тяга»
Уральского государственного университета путей сообщения

ВЫВОДЫ

1. Тяговые приводы I класса, широко применяемые в настоящее время, не соответствуют требованиям использования на магистральных грузовых локомотивах со скоростью движения свыше 100–120 км/ч из-за низкой защищенности тягового электродвигателя от вибраций и ударов, а также из-за большой необремененной массы колесно-моторного блока локомотива.

2. На локомотивах с максимальной скоростью свыше 140 км/ч рекомендуется применять тяговые приводы II и III класса. Для унификации конструкции с приводом I класса в качестве более дешевого варианта принят тяговый привод II класса.

3. Выполненный анализ конструкций муфт продольной компенсации тяговых приводов II класса показал, что наиболее совершенными являются муфта грузопассажирского электровоза ДСЗ, а также муфта тепловоза 2ТЭ121 с измененной конструкцией упругой части, заимствованной у электровозов ЭП1, ЭП1М, ЭП10.

Authors information:

Alexander P. Buynosov,
DSc in Engineering, Professor of Electric Traction Department,
Ural State University of Railway Transport

Evgeniy A. Shirshov,
postgraduate student of Electric Traction Department,
Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Москвичев О. В., Москвичева Е. Е., Васильев Д. В. Развитие логистики перевозки грузов контейнерными поездами: новые аспекты, требования, решения // Транспорт Урала. 2025. № 1 (84). С. 60–65. DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-60-65.
2. Панкина Р. В. О тенденциях российского контейнерного рынка // Транспорт Урала. 2023. № 2 (77). С. 86–91. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-86-91.
3. Международные транспортные коридоры как инструмент организации эффективной транспортно-логистической системы / И. А. Новиков, А. С. Трошин, В. Ю. Линник, А. А. Акулов // Транспорт Урала. 2024. № 2 (81). С. 85–91. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-85-91.

References

1. Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E., Vasilyev D. V. Development of cargo transportation logistics by container trains: new aspects, requirements, solutions. *Transport of the Urals*. 2025. No. 1 (84). Pp. 60–65. DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-60-65. (In Russian).
2. Pankina R. V. Regarding the trends of the Russian container shipping market. *Transport of the Urals*. 2023. No. 2 (77). Pp. 86–91. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-86-91. (In Russian).
3. Novikov I. A., Troshin A. S., Linnik V. Yu., Akulov A. A. International transport corridors as a tool for organizing an effective transport and logistics system. *Transport of the Urals*. 2024. No. 2 (81). Pp. 85–91. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-85-91. (In Russian).

4. Ларин О. Н., Моононхуу Ц. Перспективы использования международного транспортного коридора «Север — Юг» для перевозки российских грузов // *Транспорт Урала*. 2023. № 4 (79). С. 54–61. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-54-61.
5. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак [и др.] ; под ред. И. В. Бирюкова. Москва : Альянс, 2013. 440 с.
6. Бирюков И. В., Беляев А. И., Рыбников Е. К. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог. Москва : Транспорт, 1986. 256 с.
7. Буйносов А. П., Шарапов А. Т. Влияние износа элементов тяговой передачи на долговечность привода грузовых электровозов // *Транспорт Урала*. 2021. № 1 (68). С. 61–63. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-61-63.
8. Вахромеева Т. О. Снижение динамических нагрузок в тяговых приводах электровозов с рамным подвешиванием тяговых двигателей и карданными муфтами : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2014. 243 с.
9. Техническая инновационика. Поиск новых конструктивных решений / Д. Я. Антипин, М. И. Борзенков, В. И. Воробьев [и др.]. Орел : Изд-во ОГУ им. И. С. Тургенева, 2021. 222 с.
10. Сравнение тяговых приводов с опорно-осевым и опорно-рамным подвешиванием двигателя / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев // *Транспортное машиностроение*. 2024. № 4 (28). С. 13–25. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-4-13-25.
11. Буйносов А. П., Мишин Я. А. Повышение надежности тяговых редукторов электровозов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012. № 3. С. 85–89. ISSN 2079-5920.
12. Буйносов А. П., Шарапов А. Т. Адаптация классификаций видов изнашивания применительно к механической части тягового привода локомотивов // *Вестник УрГУПС*. 2022. № 1 (53). С. 31–39. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-1-31-39.
13. Буйносов А. П., Шарапов А. Т., Чепижко М. С. Совершенствование методики расчета качественных показателей зацепления тяговой зубчатой передачи электровоза // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2021. № 10. С. 98–101. ISSN 2079-5920.
14. Юдт Е. С., Буйносов А. П. Способ повышения надежности тяговых редукторов электровозов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2020. № 2. С. 27–30. ISSN 2079-5920.
15. История тягового привода. 3.4.2. Опорно-рамные приводы с карданным валом в полом якоре. URL: <https://izmerov.narod.ru/privod/privod230.html>.
16. Покровский С. В. Электровозы ЭП10. Технические воспоминания о проекте. Москва : Е-нот, 2025. 204 с.
17. Буйносов А. П., Юдт Е. С., Шарапов А. Т. Анализ основных причин отказов тяговых передач электровозов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2020. № 3. С. 14–17. ISSN 2079-5920.
18. Применение классификаций для поиска новых технических решений / В. И. Воробьев, С. Н. Злобин, О. В. Измеров [и др.]. Орел : Изд-во ОГУ им. И. С. Тургенева, 2022. 189 с.
4. Larin O. N., Moononhuu Ts. Prospects for using the North-South International Transport Corridor for the transportation of Russian goods. *Transport of the Urals*. 2023. No. 4 (79). Pp. 54–61. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-54-61. (In Russian).
5. Biryukov I. V., Savoskin A. N., Burchak G. P. [et al.]. Mechanical part of tractive rolling stock : edited by I. V. Biryukov. Moscow : Alliance, 2013. 440 p. (In Russian).
6. Biryukov I. V., Belyaev A. I., Rybnikov E. K. Traction transmissions of railway electric motive power. Moscow : Transport, 1986. 256 p. (In Russian).
7. Buynosov A. P., Sharapov A. T. Influence of wear of traction transmission elements on life of drives of freight electric locomotives. *Transport of the Urals*. 2021. No. 1 (68). Pp. 61–63. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-61-63. (In Russian).
8. Vakhromeeva T. O. Reduction of dynamic loads in traction drives of electric locomotives with frame suspension of traction motors and cardan couplings : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2014. 243 p. (In Russian).
9. Antipin D. Ya., Borzenkov M. I., Vorobyev V. I. [et al.]. Technical innovation. Search for new constructive solutions. Orel : Publishing House of Orel State University named after I. S. Turgenev, 2021. 222 p. (In Russian).
10. Pugachev A. A., Vorob'ev V. I., Izmerov O. V., Nikolaev E. V. Comparison of traction drives with axial support and frame support suspension of the engine. *Transport Engineering*. 2024. No. 4 (28). Pp. 13–25. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-4-13-25. (In Russian).
11. Buynosov A. P., Mishin Ya. A. Increase of reliability of traction reducers of electric locomotives. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2012. No. 3. Pp. 85–89. ISSN 2079-5920. (In Russian).
12. Bujnosov A. P., Sharapov A. T. Adaptation of wear type classifications in relation to the mechanical part of the traction drive of locomotives. *Herald of the USURT*. 2022. No. 1 (53). Pp. 31–39. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-1-31-39. (In Russian).
13. Buynosov A. P., Sharapov A. T., Chepizhko M. S. Improvement of the methodology for calculating the qualitative indicators of the traction gear transmission of the electric freight locomotive. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2021. No. 10. Pp. 98–101. ISSN 2079-5920. (In Russian).
14. Yudt E. S., Buynosov A. P. Method for increasing the reliability of electric truck traction reducers. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2020. No. 2. Pp. 27–30. ISSN 2079-5920. (In Russian).
15. The history of traction drive. 3.4.2. Support-frame drives with a cardan shaft in a hollow armature. URL: <https://izmerov.narod.ru/privod/privod230.html>. (In Russian).
16. Pokrovskiy S. V. Electric locomotives EP10. Technical memories of the project. Moscow : E-noto, 2025. 204 p. (In Russian).
17. Buynosov A. P., Yudt E. S., Sharapov A. T. Analysis of the main reasons for failures of electric truck transmissions. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2020. No. 3. Pp. 14–17. ISSN 2079-5920. (In Russian).
18. Vorobyev V. I., Zlobin S. N., Izmerov O. V. [et al.]. The use of classifications to find new technical solutions. Orel : Publishing House of Orel State University named after I. S. Turgenev, 2022. 189 p. (In Russian).

Научная статья
УДК 629.423.24

Применение метода анализа иерархий для обоснования конструкции кузова двухэтажного пассажирского вагона

Кристина Владимировна Ковалева¹, Артем Сергеевич Митраков², Василий Федорович Лапшин²

¹ООО «Уральские локомотивы», Верхняя Пышма, Россия

²Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Application of analytic hierarchy process to substantiate the body structure of a double-deck passenger car

Kristina V. Kovaleva¹, Artem S. Mitrakov², Vasilii F. Lapshin²

¹Ural Locomotives LLC, Verkhnyaya Pyshma, Russia

²Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

Статья посвящена задаче, связанной с выбором рациональной конструкции кузова двухэтажного пассажирского вагона из алюминиевых профилей при различном размещении специализированного оборудования на этапе концептуального проектирования.

Предложена методика оценки значимости технических решений, основанная на методе анализа иерархий. Рассмотрены три альтернативных конструктивных исполнения кузова вагона с позиций размещения специализированного оборудования. Для оценки достоверности принимаемого решения предложен комплекс критериев, учитывающих требования к конструкции при проектировании, а также условия технического обслуживания и ремонта в эксплуатации.

Определены перспективы дальнейшего использования метода анализа иерархий на этапе обоснования конструкции кузова двухэтажного пассажирского вагона.

Ключевые слова: двухэтажный вагон, кузов, прочность, металлоемкость, специализированное оборудование, пассажироместимость, метод анализа иерархий, критерий, матрица попарных сравнений, вектор приоритетов альтернатив

Abstract

The article is devoted to the problem of choosing a rational body structure for a double-deck passenger car made of aluminum profiles with different placement of specialized equipment at the conceptual design stage.

A methodology for assessing the significance of technical solutions based on the analytic hierarchy process is proposed. Three alternative structural designs of the car body are considered from the perspective of the placement of specialized equipment. To assess the reliability of the decision being made, a set of criteria is proposed that take into account the design requirements during design, as well as the conditions of maintenance and repair in operation.

The prospects for further use of the analytic hierarchy process at the stage of substantiation of the body structure of a double-deck passenger car are determined.

Keywords: double-deck car, body, durability, metal consumption, specialized equipment, passenger capacity, analytic hierarchy process, criteria, pairwise comparison matrix, vector of alternative priorities

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-35-41

ВВЕДЕНИЕ

Среди целевых параметров, предусмотренных Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [1], особое место занимает организация производства подвижного состава нового поколения: строительство двухэтажных вагонов; разработка новых типов и образцов подвижного состава с кузовами из алюминиевых сплавов; ввод в эксплуатацию высокоскоростных электропоездов для скоростей движения до 250 и до 350 км/ч.

Главная цель создания двухэтажных вагонов — увеличение пассажироместимости при одновременном повышении уровня комфорта пассажиров и снижении эксплуатационных расходов на одного пассажира. Проблема поиска оптимального баланса между увеличением числа посадочных мест в вагоне поезда и обеспечением комфорта пассажиров становится особенно актуальной при размещении крупногабаритного оборудования систем жизнеобеспечения вагонов [2]. Чем больше масса и габариты специализированного оборудования, тем в большей степени его размещение окажет влияние на положение центра тяжести вагона и на характеристики прочности кузова. С другой стороны, уменьшение массы вагона позволит увеличить максимальную скорость движения поезда, снизить износ, энергозатраты на тягу, а также затраты на эксплуатацию и ремонт инфраструктуры [3, 4].

На этапе концептуального проектирования перспективных модификаций железнодорожных вагонов прежде всего встает задача по рациональному выбору конструктивных решений базовых несущих компонентов кузова и размещению специализированных агрегатов. Каждое альтернативное решение обладает определенным набором преимуществ и недостатков, обусловленных совокупностью показателей технической эксплуатации, конструкционной надежности и экономической эффективности транспортного средства. В связи с этим из-за многообразия оценочных критериев выбор наиболее рационального инженерного решения нередко оказывается затруднительным.

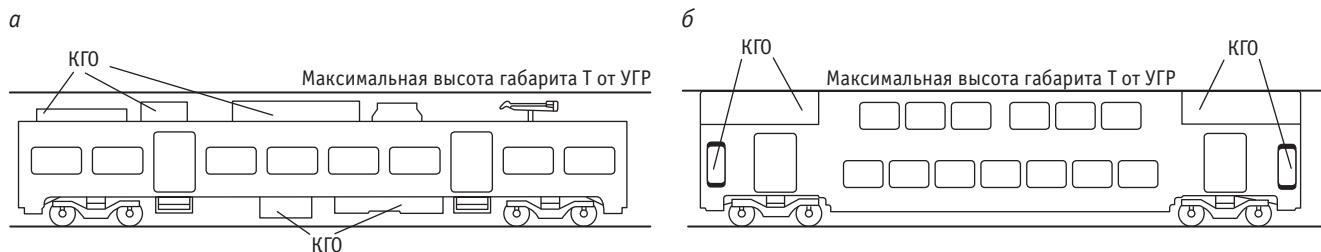


Рис. 1. Расположение крупногабаритного навесного оборудования:
а — одноэтажный вагон электропоезда ЭС2Г «Ласточка»; б — двухэтажный вагон

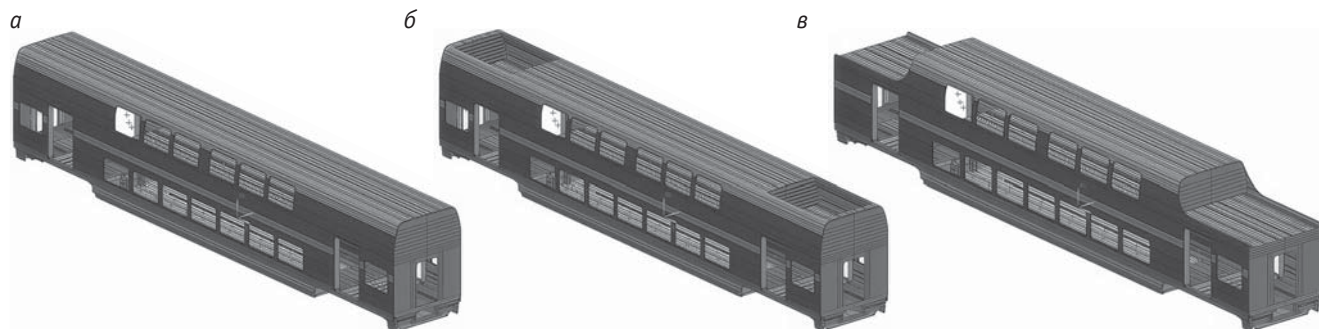


Рис. 2. Трехмерные модели кузова двухэтажного моторного вагона электропоезда:
а, б, в — соответственно первый, второй и третий варианты

Для двухэтажных вагонов характерна не только проблема, связанная с повышенной массой тары кузова, но и специфика компоновочной схемы. Чтобы обеспечить вписывание в габарит второго этажа и возможность комфортного размещения пассажиров, уровень первого этажа опущен в межтележное пространство (с учетом вписывания в габарит). В связи с этим разместить в подкузовном пространстве крупногабаритное оборудование (КГО) становится практически невозможно, и его переносят в консольные части кузова либо на уровень пола, либо на уровень крыши (рис. 1). Все это требует тщательной проработки несущей конструкции, причем размещение оборудования на уровне крыши приводит к изменению положения центра тяжести вагона, что, в свою очередь, влияет на его устойчивость.

Сложность конструкции кузова двухэтажного вагона заключается еще и в особенности пространственной формы рамы (уровень пола опущен в межтележное пространство). В сочетании со значительными изменениями площади поперечного сечения в зонах расположения дверных и оконных проемов это вызывает появление дополнительных мест концентраций механических напряжений.

Авторами статьи исследованы три варианта кузова двухэтажного пассажирского вагона, для которых определены характеристики прочности [5, 6].

В конструкции рассматриваемых кузовов используются открытые и полные прессованные алюминиевые профили (EN AW-6005F T6) [7], а также алюминиевые листы (EN AW-5083) [8]. Учтены перечисленные особенности проектирования кузовов за счет изменения конструкции консольных частей крыши. В первом варианте конструкции

(рис. 2а) консольные части крыши полностью несущие, во втором (рис. 2б) прямоугольные участки несущей конструкции крыши в консольных частях заменены ненесущими кожухами, в третьем варианте (рис. 2в) консольные части крыши полностью открыты [5].

В разработанных трехмерных моделях учтены расположение и масса дверей, окон, багажных стеллажей и полок, мест для сидения, лестниц для перемещения между этажами вагона, а также основного оборудования — климатической установки, преобразователя собственных нужд, системы подготовки воздуха, аккумуляторной батареи и др. Основное оборудование в двух первых вариантах конструкции размещено в консольных частях крыши, а в третьем варианте перенесено внутрь кузова, что потребовало убрать два оконных проема и восемь мест для сидения пассажиров.

АЛГОРИТМ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ПРИ ВЫБОРЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ДВУХЭТАЖНОГО ВАГОНА

Для принятия решений в многокритериальных задачах, задачах научно-технической экспертизы, в том числе в области вагоностроения [9–11], достаточно широкое применение получил метод анализа иерархий (МАИ) [12], который позволяет учитывать не только качественные, основанные на экспертных оценках, но и абсолютные количественные данные.

Использование МАИ [12] предполагает выполнение следующих этапов (рис. 3):

- формулирование цели/проблемы;
- формулирование критериев К и альтернатив А — построение иерархии (структурной сети задачи);

построение матриц попарных сравнений критериев К по цели и альтернатив А по критериям;

анализ полученных матриц по специальной методике [12];
определение значимости альтернатив в системе иерархии.

Значимость критериев и приоритеты отдельных альтернатив в классическом методе анализа иерархий определяются с использованием матрицы парных сравнений оценок. Для оценки важности критериев применяется дискретная шкала от 1 до 9 [11, 12].

Как было отмечено ранее, среди факторов, влияющих на выбор конструктивного исполнения кузова пассажирского вагона, особое значение имеет размещение специализированных агрегатов, определяющих в конечном счете несущую способность базовых элементов конструкции. Схема расположения специализированного оборудования в кузове также играет решающую роль при формировании технико-экономических параметров, таких как количество посадочных мест в салоне и металлоемкость (для случая изготовления элементов кузова приобретает особое значение [7, 8]).

Таким образом, в нашем случае можно выделить четыре критерия для построения иерархии МАИ:

К1 — прочность кузова (максимальное значение эквивалентных напряжений в конструкции, полученное по результатам расчетов с учетом эксплуатационных нагрузок [5, 6]);

К2 — пассажироместность;

К3 — металлоемкость кузова (масса несущей конструкции);

К4 — расположение оборудования/удобство обслуживания.

Важность, приоритетность и формулировка критериев, по которым производился выбор наиболее рационального варианта конструкции в рассматриваемой задаче, не всегда являются очевидными, в чем и заключается сложность. Поэтому в основу критериев были положены исходные данные — характеристики рассматриваемых вариантов конструкции (табл. 1).

В нашем случае из четырех критериев важнейшим является прочность кузова. Корректная оценка прочности позволяет повысить безопасность движения и создать оптимальную по металлоемкости конструкцию.

Таким образом, принятые критерии получают количественную оценку и будут иметь очевидную связь с особенностями конструкции кузова двухэтажного вагона, рассмотренными ранее [5, 6].

Единственный критерий, для которого не применялось количественное описание, — расположение оборудования/удобство обслуживания (определяется с позиций обеспечения доступа для осмотра, технического обслуживания и ремонта оборудования при эксплуатации вагона). Этот критерий оценивался на основе личного опыта, знаний авторов и предпочтений, сложившихся в ООО «Уральские локомотивы», во взаимосвязи с остальными критериями.

Альтернативами были три варианта рассмотренных конструкций кузовов двухэтажных пассажирских вагонов (см. рис. 2).

Иерархическая структура решаемой задачи представлена на рис. 4.

После иерархической постановки задачи устанавливались приоритеты критериев и оценивалась каждая из альтернатив по критериям.

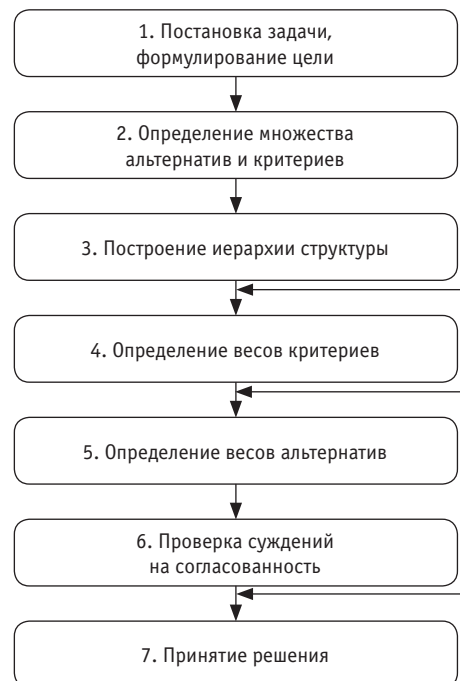


Рис. 3. Алгоритм метода анализа иерархий

Таблица 1

Основные характеристики рассматриваемых вариантов конструкции кузова

Критерий	Варианты конструкции кузова (рис. 2)		
	первый	второй	третий
Масса кузова, кг	14320	13910	13113
Масса вагона с оборудованием, экипировкой и пассажирами (100 %), кг	65600	65210	63645
Пассажироместность, чел.	100		92
Характеристика напряженного состояния конструкции, принятая с учетом уровня ее соответствия требованиям НТД, касающихся прочности, %	94,2	95,2	96,7

Уровни иерархии

Уровень 1

Цель

Уровень 2

Критерии

Уровень 3

Альтернативы

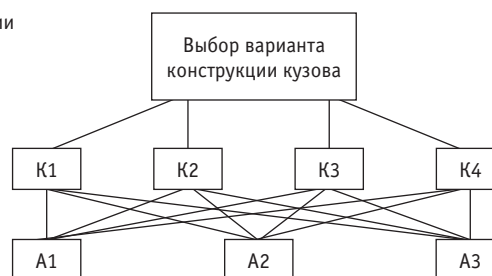


Рис. 4. Структурная сеть задачи

выбора варианта конструкции кузова вагона:

К1–К4 — критерии; А1–А3 — альтернативы (А1 — вариант 1, рис. 2а; А2 — вариант 2, рис. 2б; А3 — вариант 3, рис. 2в)

Относительная важность критериев определялась по шкале предпочтений (табл. 2) [12].

Таблица 2

Шкала предпочтений

Численная оценка	Лингвистическая оценка	Пояснения
1	Отсутствие предпочтений	Два объекта дают равный вклад в цель
3	Слабое предпочтение	Оценка незначительно в пользу одного из объектов
5	Сильное предпочтение	Оценка существенно в пользу одного из объектов
7	Очень сильное предпочтение	Один объект сильно доминирует над другим
9	Абсолютное предпочтение	Очевидна высшая степень предпочтения
2, 4, 6, 8	Промежуточные оценки	Необходим компромисс

Процедура метода Саати предусматривает составление матриц попарных сравнений: одна матрица — для критериев, k матриц — для альтернатив, где k — количество критериев, в нашем случае $k = 4$.

Составление матрицы выполнено с использованием следующей математической модели: элементы главной диагонали всегда равны единице, так как каждый критерий равен себе по важности; элементы, стоящие выше главной диагонали, рассчитываются по формуле (1), а элементы, стоящие ниже главной диагонали, — по формуле (2):

$$\begin{aligned} \text{если } p_i > p_j, \text{ то } a_{ij} &= p_i - p_j, \\ \text{если } p_i < p_j, \text{ то } a_{ij} &= \frac{1}{p_i - p_j}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{если } p_i &= p_j, \text{ то } a_{ij} = 1; \\ a_{ji} &= \frac{1}{a_{ij}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где a_{ij} — элементы матрицы попарного сравнения; p_i, p_j — приоритеты (относительный вес) критерия.

Аналогично для сравнения альтернатив были построены матрицы попарного сравнения всех вариантов по каждому критерию.

Для анализа полученных матриц использована методика [12], основанная на вычислении вектора приоритетов матриц. Для этого элементы каждого столбца матрицы делятся на сумму элементов соответствующего столбца, после чего сумма элементов каждой полученной строки новой матрицы делится на число элементов строки.

В общем случае матрицы попарных сравнений не являются согласованными [9, 11]. Поэтому логичность суждений оценивалась с помощью индекса согласованности и отношения согласованности. Индекс согласованности ($I.C.$), зависящий от количества парных сравнений, для каждой матрицы вычислялся по формуле

$$I.C. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (3)$$

где λ_{\max} — собственное значение матрицы попарного сравнения; n — размерность матрицы.

Для каждой матрицы собственное значение λ_{\max} определялось как произведение суммы элементов в столбце на относительный вес (приоритет) критерия или альтернативы.

Отношение согласованности ($O.C.$) рассчитывалось по формуле

$$O.C. = \frac{I.C.}{P.C.}, \quad (4)$$

где $P.C.$ — показатель согласованности матрицы сравнений, составленной случайным образом.

Показатели случайной согласованности $P.C.$ принимали следующие значения: для матрицы $K(n = 4)$ — 0,9; для матриц $Ai(n = 3)$ — 0,58 [13]. В качестве максимально допустимого значения рекомендуется принимать $O.C. \leq 0,10$ [11, 13].

Итоговые значения приоритетов альтернатив $A1-A3$ получаются при перемножении матрицы, составленной из векторов приоритетов матриц попарных сравнений альтернатив, с вектором приоритетов матрицы попарных сравнений критериев.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ

Результаты оценки относительной важности критериев приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценка относительной важности критериев

	Прочность кузова	Пассажировместимость	Металлоемкость кузова	Расположение оборудования/удобство обслуживания
Прочность кузова	1	2	3	5
Пассажировместимость	0,5	1	1	3
Металлоемкость кузова	0,5	1	1	3
Расположение оборудования/удобство обслуживания	0,2	0,3333	0,3333	1

На основе полученных результатов составлена матрица попарных сравнений критериев по цели:

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 \\ 0,5 & 1 & 1 & 3 \\ 0,5 & 1 & 1 & 3 \\ 0,2 & 0,3333 & 0,3333 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Таким же образом выполнена оценка относительной важности альтернатив (табл. 4–7) и составлены матрицы попарных сравнений альтернатив А1–А3 по критериям К1, К2, К3, К4.

Для автоматизации вычислительных процедур разработан макет в Excel (рис. 5), позволяющий при последующих вычислениях увеличивать количество критериев и альтернатив до 7.

В результате вычислений для матрицы критериев получен вектор приоритетов

$$P_K = \begin{Bmatrix} 0,474 \\ 0,224 \\ 0,224 \\ 0,078 \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

Векторы локальных приоритетов альтернатив по каждому критерию имеют вид

$$P_{K1} = \begin{Bmatrix} 0,411 \\ 0,328 \\ 0,261 \end{Bmatrix}, P_{K2} = \begin{Bmatrix} 0,428 \\ 0,428 \\ 0,143 \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

$$P_{K3} = \begin{Bmatrix} 0,115 \\ 0,182 \\ 0,703 \end{Bmatrix}, P_{K4} = \begin{Bmatrix} 0,199 \\ 0,199 \\ 0,601 \end{Bmatrix}.$$

В результате перемножения векторов приоритетов матриц попарных сравнений альтернатив (7) с вектором приоритетов матрицы попарных сравнений критериев (6) определен вектор приоритетов С альтернатив А1–А3 относительно цели:

$$C = \begin{Bmatrix} 0,312 \\ 0,301 \\ 0,387 \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Проверка на согласованность матриц попарных сравнений показала, что мак-

Таблица 4

Оценка относительной важности альтернатив по критерию «прочность кузова»

	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Вариант № 1	1	1	2
Вариант № 2	1	1	1
Вариант № 3	0,5	1	1

Таблица 6

Оценка относительной важности альтернатив по критерию «металлоемкость кузова»

	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Вариант № 1	1	0,5	0,2
Вариант № 2	2	1	0,2
Вариант № 3	5	5	1

Таблица 5

Оценка относительной важности альтернатив по критерию «пассажировместимость»

	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Вариант № 1	1	1	3
Вариант № 2	1	1	3
Вариант № 3	0,3333	0,3333	1

Таблица 7

Оценка относительной важности альтернатив по критерию «расположение оборудования/удобство обслуживания»

	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Вариант № 1	1	1	0,3333
Вариант № 2	1	1	0,3333
Вариант № 3	3	3	1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Ввод: матрица сравнения								
2	Наименование матрицы		Матрица критериев						
3	Размерность:	4							
4	Матрица	K1	K2	K3	K4				
5	Прочность (K1)	1	2	3	5				
6	Пассажировместимость (K2)	0,5	1	1	3				
7	Металлоемкость (K3)	0,5	1	1	3				
8	Обслуживание (K4)	0,2	0,3333	0,3333	1				
9									
10									
11									
12									
13									
14	Сумма эл. столбцов	2,2	4,3333	5,3333	12	0	0	0	
15	Вывод: нормализованная матрица								
16	Согласованность	λmax= 4,147568		I.C.= 0,049189		O.C.= 0,054655			
17		K1	K2	K3	K4				Вес
18	Прочность (K1)	0,455	0,462	0,563	0,417				0,474
19	Пассажировместимость (K2)	0,227	0,231	0,188	0,250				0,224
20	Металлоемкость (K3)	0,227	0,231	0,188	0,250				0,224
21	Обслуживание (K4)	0,091	0,077	0,062	0,083				0,078
22									
23									
24									
25									
26	Проверка								1,000

Рис. 5. Фрагмент вычислительной процедуры в Excel:
вес — коэффициент значимости (приоритет)

симальное значение отношения согласованности $O.C.$ имеет матрица сравнения критериев 0,0546. Наибольшее значение $O.C.$ для матриц сравнения альтернатив составило по критерию К1 — 0,048, что

свидетельствует о приемлемости полученных результатов.

Графическая интерпретация результатов промежуточных и итоговых вычислений представлена на рис. 6.

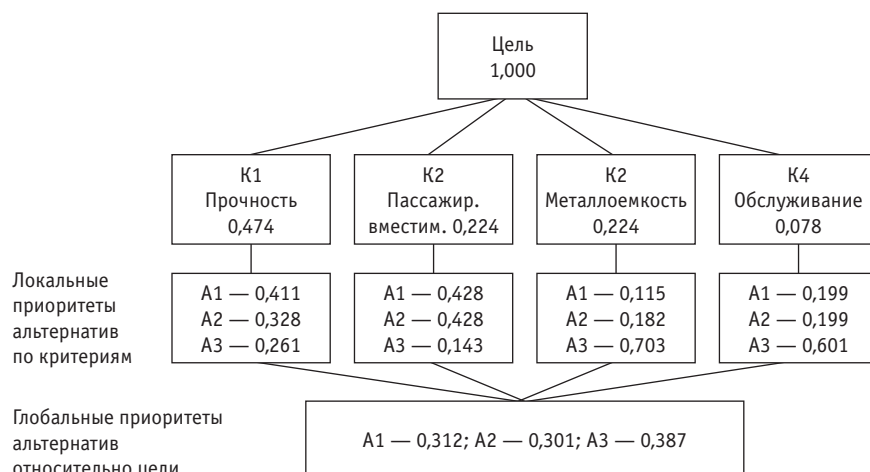


Рис. 6. Результат решения задачи обоснования конструкции кузова двухэтажного вагона

Таким образом, наиболее рациональной с точки зрения поставленных критериев является альтернатива № 3, приоритетность которой составила 38,7 %. Этой альтернативе соответствует вариант конструкции кузова № 3 (см. рис. 2в).

Следует отметить ряд моментов, которые определяют направления дальнейших исследований на этапе обоснования конструкции кузова двухэтажного пассажирского вагона из алюминиевых профилей.

1. После расчетов и выбора наиболее рационального варианта конструкции ку-

зова встает вопрос об уровне достоверности найденного результата, поскольку кроме числовых оценок вариантов (где тоже возможна неопределенность) существуют также субъективные мнения относительно значимости самих критериев и качества предлагаемых решений. В качестве инструментария может быть использовано статистическое моделирование, позволяющее «учесть влияние неопределенности оценок критериев и показателей альтернатив на достоверность выбора итогового решения, варьируя в заданных пределах эти оцен-

ки относительно экспертной оценки по определенному закону распределения случайной величины» [14].

2. Эффективность применения метода анализа иерархий кратно повышается при наличии количественного выражения критериев, это значительно упрощает процесс определения их относительной важности. Кроме того, использовать МАИ можно с гораздо большим числом критериев и альтернатив. Например, для двухэтажного вагона из алюминиевых профилей существенную роль играют такие критерии, как коэффициент устойчивости и жесткость конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты использования метода анализа иерархий для решения задачи по выбору наиболее рациональной конструкции кузова двухэтажного вагона из экструдированных алюминиевых профилей (среди трех рассмотренных вариантов) согласуются с общими выводами, приведенными в работах [5, 6]. Кроме того, полученные данные подтверждают эффективность применения МАИ для решения такого рода задач на этапе, предшествующем эскизному проектированию при разработке нового подвижного состава.

Сведения об авторах:

Кристина Владимировна Ковалева, инженер-конструктор отдела расчетов ООО «Уральские локомотивы»

Артём Сергеевич Митраков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения

Василий Федорович Лапшин, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Kristina V. Kovaleva, Design Engineer of Calculation Department, Ural Locomotives LLC

Artem S. Mitrakov, PhD in Engineering, Associate Professor of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport

Vasily F. Lapshin, DSc in Engineering, Professor of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/1010>.
2. Лебедев В. А. Обоснование технических решений конструкции двухэтажного пассажирского вагона : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2017. 178 с.
3. Алюминиевые вагоны. URL: <https://www.aluminas.ru/aluminum/article/aluminum-cars/>.

References

1. Strategy for development of railway transport in the Russian Federation until 2030 : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 17.06.2008 No. 877-r. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/1010>. (In Russian).
2. Lebedev V. A. Justification of technical solutions for the construction of a double-deck passenger car : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2017. 178 p. (In Russian).
3. Aluminum cars. URL: <https://www.aluminas.ru/aluminum/article/aluminum-cars/>. (In Russian).

4. Вагоностроители могут увеличить спрос на алюминий. Росстандарт утвердил ГОСТы, по которым будут делать железнодорожные вагоны будущего. URL: https://www.prometall.info/know-how/vagonostroiteli_mogut_uvelichit_spros_na_alyuminiy.
5. Ковалева К. В., Лапшин В. Ф., Митраков А. С. Моделирование напряженного состояния конструкции кузова двухэтажного вагона из алюминиевых профилей // Вестник УрГУПС. 2023. № 4 (60). С. 21–30. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-4-21-30.
6. Ковалева К. В., Лапшин В. Ф. Обоснование конструкции кузова двухэтажного пассажирского вагона из экструдированных алюминиевых профилей // Инновационный транспорт. 2024. № 4 (54). С. 66–70. DOI: 10.20291/2311-164X-2024-4-66-70.
7. ГОСТ 8617–2018. Профили прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2018. 20 с.
8. ГОСТ 21631–2019. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2020. 32 с.
9. Симонов В. А. Обоснование выбора технических решений в задачах проектирования подвижного состава. Брянск : Брянский институт транспортного машиностроения, 1986. 64 с.
10. Атаманчук Н. А. Выбор параметров и обоснование технических решений цистерны для светлых нефтепродуктов увеличенной вместимости : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2016. 160 с.
11. Ворон О. А. Методология развития инновационного изотермического подвижного состава в транспортной системе страны : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ростов-на-Дону, 2021. 401 с.
12. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва : Радио и связь, 1993. 314 с.
13. Метод анализа иерархий: процедура применения. URL: <http://vamocenka.ru/metod-analiza-ierarxij-procedura-primeneniya>.
14. Дюмаева И. В., Курочкин А. В. Применение метода анализа иерархий при выборе лабораторных информационных менеджмент-систем // Аналитика. 2023. Т. 13. № 6. С. 462–466. DOI: 10.22184/10.22184/2227-572x.2023.13.6.462.466.
4. Car builders can increase the demand for aluminum. Rosstandart has approved state standards for making railway cars of the future. URL: https://www.prometall.info/know-how/vagonostroiteli_mogut_uvelichit_spros_na_alyuminiy. (In Russian).
5. Kovaleva K. V., Lapshin V. F., Mitrakov A. S. Simulation of the stress state of the body structure of a double-deck wagon made of aluminum profiles. *Herald of the USURT*. 2023. No. 4 (60). Pp. 21–30. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-4-21-30. (In Russian).
6. Kovaleva K. V., Lapshin V. F. Rationale of the structure of the body of a double-deck passenger car from extruded aluminum profiles. *Innotrans*. 2024. No. 4 (54). Pp. 66–70. DOI: 10.20291/2311-164X-2024-4-66-70. (In Russian).
7. GOST 8617–2018. Pressed sections of aluminium and aluminium alloys. Specifications. Moscow : Standardinform, 2018. 20 p. (In Russian).
8. GOST 21631–2019. Sheets of aluminium and aluminium alloys. Specifications. Moscow : Standardinform, 2020. 32 p. (In Russian).
9. Simonov V. A. Justification of the choice of technical solutions in the problems of rolling stock design. Bryansk : Bryansk Institute of Transport Engineering, 1986. 64 p. (In Russian).
10. Atamanchuk N. A. Selection of parameters and justification for technical solutions of tanks for light oil products with increased capacity : PhD in Engineering Thesis. St. Petersburg, 2016. 160 p. (In Russian).
11. Voron O. A. Methodology for the development of innovative insulated rolling stock in the country's transport system : PhD in Engineering Thesis. Rostov-on-Don, 2021. 401 p. (In Russian).
12. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. Moscow : Radio and communications, 1993. 314 p. (In Russian).
13. Analytic Hierarchy Process: application procedure. URL: <http://vamocenka.ru/metod-analiza-ierarxij-procedura-primeneniya>. (In Russian).
14. Dyumaeva I. V., Kurochkin A. V. Application of the hierarchy analysis method when choosing laboratory information management systems. *Analytics*. 2023. Vol. 13. No. 6. Pp. 462–466. DOI: 10.22184/10.22184/2227-572x.2023.13.6.462.466. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.225

Формирование целевой конфигурации границ диспетчерских участков и сквозной процессной модели «Диспетчерское управление перевозочным процессом»

Алексей Сергеевич Крылов¹, Евгения Сергеевна Максимова²,
Вера Константиновна Полякова², Сергей Олегович Ждакаев²

¹Центральная дирекция управления движением — филиал ОАО «РЖД», Москва, Россия

²Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

Formation for the target configuration of boundaries of dispatcher sections and for the end-to-end process model «Dispatcher control of the transportation process»

Alexey S. Krylov¹, Evgeniya S. Maksimova², Vera K. Polyakova², Sergey O. Zhakaev²

¹Central Directorate of Traffic Management — a branch of JSC «RZD», Moscow, Russia

²Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Аннотация

Актуальность исследования, рассмотренного в статье, обусловлена необходимостью усовершенствовать на сети железных дорог систему диспетчерского управления с применением сквозных принципов, а также устранить противоречия, влияющие на загрузку и эффективность работы поездных диспетчеров.

Основная проблема заключается в наличии разнонаправленных факторов, снижающих эффективность управления. В ходе исследования проанализирована загрузка диспетчеров, проведено анкетирование сотрудников диспетчерских центров, осуществлен пересмотр конфигурации и оптимизации границ диспетчерских участков с учетом местных условий.

Также в статье рассмотрены вопросы моделирования процессов диспетчерского управления на железнодорожном транспорте с использованием методологии ARIS, в том числе построение сквозного непрерывного процесса диспетчерского управления перевозками, включающего прием смены, оперативное регулирование и подведение итогов. Особое внимание уделено детализации процессов, обеспечению их взаимосвязи и логической четкости для повышения эффективности диспетчерской работы.

Исследование имеет прикладное значение и может быть использовано при совершенствовании нормативной базы и внедрении единой процессной модели в ОАО «РЖД».

Ключевые слова: диспетчерское управление, сквозная процессная модель, границы диспетчерских участков, методология ARIS, загрузка поездного диспетчера

Abstract

The relevance of research discussed in the article is due to the need to improve the dispatcher control system on the railway network using end-to-end principles, as well as to eliminate contradictions affecting the workload and efficiency of train dispatchers.

The main problem is the presence of multidirectional factors that reduce the effectiveness of management. In the course research an analysis of dispatcher workload, a survey of dispatcher center employees, and a review of the existing configuration and optimization of dispatcher site boundaries were carried out, taking into account local conditions.

In addition, the article discusses the issues of modeling dispatch control processes in railway transport using the ARIS methodology, including building an end-to-end continuous process of dispatching transportation management, including shift reception, operational regulation and summing up. Special attention is paid to detailing the processes, ensuring their interconnection and logical clarity to improve the efficiency of dispatching work.

The research has an applied value and can be used to improve the regulatory framework and implement a unified process model at JSC «RZD».

Keywords: dispatcher management, end-to-end process model, boundaries of dispatcher sections, ARIS methodology, loading of the train dispatcher

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-42-50

Для дальнейшего развития на сети железных дорог системы диспетчерского управления с применением сквозных принципов и на основе актуальных требований [1–3] распоряжением ОАО «РЖД» от 16.05.2025 г. № 1072/р утвержден ряд основополагающих документов:

Концепция перспективного диспетчерского управления на сети железных дорог с применением сквозных принципов;

Целевая конфигурация границ диспетчерских участков;

Технико-экономическое обоснование реализации предлагаемых решений, в том числе реализации Программы модернизации региональных диспетчерских центров.

Исходя из тезиса «перспективная система диспетчерского руководства на сети железных дорог должна обеспечивать управление движением на основе сквозных принципов» авторами статьи выполнено аналитическое исследование существующих принципов организации диспетчерского управления с выделением проблемных мест.

В зависимости от причин возникновения основные противоречия действующей системы диспетчерского управления, которые влияют на загрузку и эффективность работы поездного диспетчера (ДНЦ), распределены по следующим укрупненным группам факторов:

первая группа — организация тягового обслуживания;

вторая группа — топологические и административные особенности в организации работы диспетчерского участка;

третья группа — технико-технологические особенности организации работы диспетчерского участка;

четвертая группа — техническое оснащение диспетчерских участков;

пятая группа — организация местной работы;

шестая группа — внеграфиковые противоречия в работе диспетчерского участка;

седьмая группа — прочие противоречия в работе поездного диспетчера.

Сформирован перечень из 56 факторов, которые влияют на работу поездного диспетчера. В каждую укрупненную группу противоречий входит от 4 до 14 факторов [4]. На основе перечня разработана анкета по определению степени влияния факторов, вызывающих проблемы/противоречия в работе поездного диспетчера. Проведено анкетирование сотрудников диспетчерских центров управления перевозками (ДЦУП) и Центра управления перевозками на Восточном полигоне (ЦУП ВП), имеющих опыт работы в должности поездного диспетчера. Респонденты оценивали степень влияния факторов на загрузку и эффективность работы ДНЦ по укрупненным группам факторов и по каждому в отдельности на основе пятибалльной шкалы (чем выше балл, тем больше степень влияния) [5].

По результатам анкетирования и экспертных оценок определено, что наибольшее влияние на загрузку поездного диспетчера оказывает такая укрупненная группа, как внеграфиковые противоречия: средняя оценка по сети железных дорог составляет 3,32 балла (табл. 1). Безусловное влияние этой группы на загрузку ДНЦ выделили поездные диспетчеры всех железных дорог, кроме Западно-Сибирской (степень влияния группы внеграфиковых противоречий вынесена на второе место со средней оценкой 2,92 балла). Несмотря на это, данная укрупненная группа факторов находится в оранжевой зоне абсолютно для всех подразделений сети железных

Таблица 1

Средневзвешенная оценка и распределение влияния укрупненных групп противоречий на загрузку и эффективность работы поездных диспетчеров¹

Группа противоречий	Подразделение												Итоговое место
	В целом по сети железных дорог		Московская железная дорога		Северо-Западное направление		Юго-Западное направление		Западно-Сибирская железная дорога		Восточный полигон		
	оценка	место	оценка	место	оценка	место	оценка	место	оценка	место	оценка	место	
Организация тягового обслуживания	2,87	3	2,62	4	2,96	3	3,27	2	2,48	4	2,51	2	3
Топологические и административные особенности	1,88	7	1,71	7	1,84	7	2,31	5	1,77	7	1,54	7	7
Технико-технологические особенности	2,08	6	2,13	6	2,28	6	2,13	7	1,79	6	1,7	6	6
Техническое оснащение	2,26	5	2,49	5	2,34	5	2,28	6	2	5	1,94	5	5
Организация местной работы	2,83	4	2,74	3	2,91	4	3,01	3	2,71	3	2,48	3	4
Внеграфиковые	3,32	1	3,1	1	3,44	1	3,4	1	2,92	2	3,43	1	1
Прочие	2,88	2	2,99	2	3,11	2	2,58	4	2,96	1	2,44	4	2

¹Степень влияния противоречия на работу поездного диспетчера приводится в баллах от 0 до 5, при этом красная зона соответствует 3,75–5 баллам, оранжевая зона — 2,5–3,74 баллам, желтая зона 1,25–2,49 баллам, зеленая зона 0–1,24 баллам.

дорог и требует наибольшего внимания. Для Северо-Западного направления, Восточного полигона и Юго-Западного направления оценки влияния этой укрупненной группы факторов практически идентичны (3,44; 3,43 и 3,4 балла соответственно) и являются наивысшими среди всех групп факторов и всех подразделений.

Практически одинаковая степень влияния выявлена для групп, связанных с прочими факторами (эргономичностью рабочего места, достаточной и своевременной информированностью, необходимостью принятия оперативных решений в короткие сроки, вмешательством в работу руководителей, в том числе других подразделений), организацией тягового обслуживания и организацией местной работы на участках.

Группа прочих факторов занимает второе место по степени влияния на загрузку и эффективность работы ДНЦ по сети железных дорог (2,88 балла), кроме Юго-Западного направления (2,58 балла) и Восточного полигона (2,44 балла), где у нее четвертое место. По оценкам респондентов Западно-Сибирской железной дороги эта группа факторов занимает первое место (2,96 балла).

Следующая группа, оказывающая влияние на загрузку и эффективность работы ДНЦ, — факторы, связанные с организацией тягового обслуживания (2,87 балла). Несмотря на то что для Московской (2,62 балла) и Западно-Сибирской (2,48 балла) железных дорог эта группа находится на четвертом месте, в общем по сети железных дорог она занимает третье место. На Юго-Западном направлении по сравнению с остальными полигонами данная группа противоречий имеет наивысшую оценку влияния (3,27 балла) и является второй по значимости, отражающейся на работе ДНЦ. Также она является второй по значимости для Восточного полигона (2,51 балла) и третьей (2,96 балла) для Северо-Западного направления.

Группа факторов, связанных с организацией местной работы на участках (2,83 балла), практически по всем полигонам занимает третье место. Для Северо-Западного направления эта группа имеет оценку 2,91 балла, совпадающую с общесетевой, а по значимости находится на четвертом месте. Самое большое влияние на загрузку поездных диспетчеров данная группа оказывает на Юго-Западном направлении (3,01 балла).

Остальные группы факторов, связанные с техническим оснащением диспетчерских участков (2,26 балла), технико-технологическими особенностями организации работы участка (2,08 балла), топологическими и административными противоречиями в работе участков (1,88 балла) для всех подразделений и сети железных дорог в целом находятся в желтой зоне и соответствуют пятому, шестому и seventhому месту соответственно по степени влияния на загрузку и эффективность работы ДНЦ. На Юго-Западном направлении степень влияния этих групп отличается от остальных подразделений: топологические и административные противоречия в работе участков занимают пятое место (2,31 балла), техническое оснащение диспетчерских участков — шестое (2,28 балла), технико-технологические особенности организации работы участка — седьмое место (2,13 балла).

Согласно экспертной оценке, вне зависимости от укрупненной группы наибольшее влияние на работу поездного диспет-

чера оказывают 33 фактора, находящихся в красной и оранжевой зонах. Первое место по степени влияния занимает фактор, связанный с недостатком тяговых ресурсов, что говорит о необходимости закрепления за подразделениями Дирекции тяги — филиала ОАО «РЖД» (ЦТ) показателей, характеризующих содержание локомотивов в эксплуатируемом парке, а также соблюдение нормативов оборота на тяговой территории между плановыми видами ремонта и технического обслуживания. Помимо этого необходимо регламентировать показателями процесс качества организации и предоставления «окон» в границах полигонов для определения качества исполнения Директивного плана-графика, оценки адресности и сроков исполнения «окон», запланированных месячным планом, и пр.

Наибольшую долю факторов, находящихся в красной и оранжевой зонах, составляют факторы укрупненной группы «Внеграфиковые противоречия в работе участка» (40 % от общего числа факторов красной и оранжевой зон). Наиболее значимые факторы по каждой укрупненной группе представлены в табл. 2 (пронумерованы в порядке убывания значимости каждой из укрупненных групп по результатам обследования).

Следует отметить, что противоречивая система диспетчерского управления, отсутствие унифицированных требований и единых принципов конфигурации самих диспетчерских участков приводят к достаточно разнонаправленной работе поездных диспетчеров [6].

В рамках аналитического исследования выполнена оценка загрузки ДНЦ по всем диспетчерским участкам сети железных дорог на расчетные сроки 2025 г. и 2030 г. В целом по сети число диспетчерских участков с загрузкой ДНЦ более 1,0 по сравнению с 2023 г. увеличится на 24 участка в 2025 г. и на 36 участков в 2030 г.; при этом с недопустимой загрузкой более 1,2 — на 28 участков в 2025 г. и на 50 участков в 2030 г. Количество участков с низкой загрузкой ДНЦ (менее 0,6) снизится по сравнению с 2023 г. на восемь в 2025 г. и на одиннадцать в 2030 г.

Механическое изменение границ диспетчерских участков в целях снижения загрузки ДНЦ до нормативных значений приведет к значительному увеличению штата и в связи с уменьшением размера зон управления ограничит возможности диспетчерского руководства [7].

В качестве приоритетных направлений рассмотрено формирование границ диспетчерских участков и районов управления по технологическим принципам с сокращением потерь информации и затрат времени на согласование оперативных решений. При этом для приведения фактической загрузки диспетчерских участков к допустимому уровню действующая конфигурация диспетчерских участков и районов управления проанализирована на наличие проблемных мест. В условиях, когда конфигурация районов управления и центров организации работы железнодорожных станций синхронизирована в приоритетном порядке под границы управления территориальных заместителей начальников железных дорог (НЗТер), складывается несколько противоречивая ситуация: у одного и того же поездного диспетчера, по сути, два оперативных руководителя, что полностью не исключает возможность возникновения

Таблица 2

Наиболее значимые факторы по укрупненным группам

№ п/п	Фактор	Общесетевая средневзвешенная оценка степени влияния (по 5-балльной шкале)
1. Внеграфиковые противоречия в работе участка		
1.1	Невыдержка времени хода поезда	3,91
1.2	Отказы технических средств по вине любых подразделений	3,84
1.3	Организация временной остановки или подъема грузовых поездов	3,71
1.4	Проведение «окон» большой длительности	3,70
1.5	«Борьба» диспетчеров за показатели (организация скрещения и обгона при вводе поездов в график)	3,50
1.6	Превышение установленных размеров движения (кроме хозяйственных)	3,42
2. Прочие противоречия		
2.1	Необходимость принятия оперативных решений в сжатые сроки	3,54
2.2	Вмешательство в эксплуатационную работу руководителей, в том числе смежных подразделений, в случае возникновения нестандартных ситуаций	2,90
2.3	Отсутствие полной своевременной информации об оперативной обстановке	2,69
3. Организация тягового обслуживания		
3.1	Неприем/невывоз поездов на крупных станциях по причине отсутствия локомотивов (несвоевременная выдача локомотива/дефицит парка)	4,12
3.2	Неприем/невывоз поездов на крупных станциях по причине недостаточного контингента локомотивных бригад	3,50
3.3	Отцепки локомотивов от транзитных поездов по причине превышения критического пробега между Т0/ТР	3,14
4. Организация местной работы		
4.1	Нехватка локомотивов для обеспечения местной работы	3,19
4.2	Дефицит/отсутствие в штате сотрудников, необходимых для организации местной работы (по всем подразделениям)	3,17
4.3	Пропуск транзитного поездопотока в приоритете над местной работой	3,01
5. Противоречия в техническом оснащении участков, входящих в ДУ		
5.1	Отсутствие на станциях приемо-отправочных путей достаточной длины для пропуска, скрещения и обгона с участием длиннооставных/тяжеловесных поездов	3,74
5.2	Размещение смежных подразделений на значительном удалении в случае необходимости устранения отказа технических средств (ПЧ, ЭЧ, ШЧ и др.)	2,77
5.3	Стыкование на кругу участков с разными лимитирующими элементами по пропускной способности	2,17
6. Техничко-технологические особенности организации работы участка		
6.1	Наличие на участке станций для отстоя вагонов	2,71
6.2	Формирование на поездообразующих станциях поездов, пропуск которых по диспетчерскому участку затруднен	2,65
6.3	Наличие на участке станций перелома массы или длины поездов	2,37
7. Топологические и административные особенности		
7.1	Примыкание к узлу участка другого диспетчерского круга	3,09
7.2	Неприем поездов соседней дорогой по технологическим причинам	2,61
7.3	Затруднения в согласовании подхода и организации передачи по стыковым пунктам с другими дорогами грузовых поездов и порожних составов	2,57

конфликта целей [8, 9]. На основе выполненного авторами анализа с учетом местных условий был осуществлен пересмотр существующей конфигурации и оптимизации границ диспетчерских участков.

Совершенствование процесса диспетчерского управления движением поездов учитывает изменения, произошедшие за последние несколько лет. Исходя из изучения действующих нормативных документов (в первую очередь положений Инструкции по оперативному планированию поездной и грузовой работы в ОАО «РЖД», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 09.07.2024 г. № 1676/р), детального анализа технологических процессов на рабочих местах, опыта сотрудников региональных диспетчерских центров, практической специфики выполняемых операций, систематизации информации и сформированных на ее основе выводов выполняется оценка трудоемкости решаемых задач, выявляются разрывы и противоречия, подлежащие устранению в системе диспетчерского управления, с использованием ИТ-продуктов. По результатам экспертной оценки формируется перечень мероприятий, нацеленных на повышение качества принимаемых управленческих решений и снижение влияния человеческого фактора.

Одна из основных функций поездного диспетчера — принятие оперативных решений о времени прибытия, отправления и проследования поездов с учетом информации об их параметрах, графике движения и состоянии инфраструктуры на основе данных информационных систем и докладов исполнителей. Эта деятельность осуществляется в рамках контроля исполнения сменно-суточного и текущего планов поездной и грузовой работы с учетом достижения показателей эффективности [10].

Для обеспечения эффективного диспетчерского управления перевозочным процессом определены 238 функций, которые выполняют работники диспетчерского персонала Оперативного управления (ЦУП) Центральной дирекции управления движением, центров управления тяговыми ресурсами (ЦУТР), ЦУП ВП и ДЦУП. Эти функции можно разделить на следующие виды:

- выполняемые один раз в суточный период;
- выполняемые один раз в смену;
- выполняемые несколько раз в смену;
- выполняемые постоянно в течение смены;
- выполняемые по необходимости (в каждом отдельном случае).

Часть функций выполняется в определенно обозначенное время, для другой части функций выделены периоды, в течение которых они должны быть выполнены.

Отметим, что работники центрального уровня выполняют 92 функции, 74 функции возложены на полигонный уровень, 71 функция — на региональный. При этом большинство оперативных функций, которые выполняются по мере необходимости, возложены на региональный уровень управления. Функции, которые выполняются с периодичностью 1 раз в сутки или смену либо которые выполняются в рамках определенного временного периода, относятся к центральному и полигонному уровню (табл. 3).

Наиболее загруженными в течение смены являются время приема дежурства, время в районе 14:00 и 18:00 (для дневной смены), а также период подготовки сдачи и непосредственной сдачи смены.

Из практики известно, что основные трудности в диспетчерском руководстве возникают в моменты отклонения поездов от графика движения. В таких случаях требуется быстро выбрать оптимальное решение о пропуске поездов по участку. При этом поездному диспетчеру приходится решать многовариантные задачи.

Для детализации процессов диспетчерского управления, определения узких мест и для возможности дальнейшего масштабирования решений используется такой инструмент, как процессное моделирование, которое сейчас внедряется повсеместно, в том числе на железнодорожном транспорте. В ОАО «РЖД» применяется методология ARIS, которая использует графические и аналитические инструменты для создания целостной картины процессов.

Основные элементы моделирования — типовые диаграммы, которые не только позволяют подробно описать реализуемые процессы, но и учитывают альтернативные сценарии, риски и ключевые показатели. Одними из главных требований, предъявляемых к разработке процессов при моделировании, являются понятность и четкая логика. Они должны быть взаимозависимы со смежными процессами и не противоречить им. Оптимизация системы диспетчерского управления должна гибко адаптироваться к эффективному решению поставленных задач.

Сложность визуализации функций, выполняемых дежурно-диспетчерским аппаратом, заключается в их многообразии и взаимозавязке с большим количеством смежных процессов. Причем эти функции иногда выполняются диспетчерами одновременно, а иногда в разное время. Набор функций может отличаться в зависимости от особенностей инфраструктуры или от сложившейся оперативной обстановки. На основе Инструкции по оперативному планированию поездной и грузо-

Таблица 3

Количество выполняемых функций по уровням управления

Уровень управления	Количество выполняемых функций					
	1 раз в сутки	1 раз в смену	2–4 раза в смену	при необходимости	постоянно	реже чем 1 раз в сутки
Центральный	8	37	15	18	13	1
Полигонный	9	30	15	8	12	–
Региональный	4	26	5	26	11	–

вой работы в ОАО «РЖД», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 09.07.2024 г. № 1676/р, требований к проекту Положения о диспетчерском управлении движением поездов в ОАО «РЖД», которое было в последующем утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 26.05.2025 г. № 1140/р, а также анализа других действующих нормативных документов определены необходимые изменения для процессных моделей в состоянии «как есть», что позволило дать описание протекающих процессов в состоянии «как должно быть».

Разработанная бизнес-модель «Диспетчерское управление процессом перевозок» представлена в виде диаграммы добавленной стоимости типа VAD, описывающей верхний уровень происходящих процессов. Границами процесса приняты начало и конец смены дежурно-диспетчерского персонала.

На вход поступают результаты оперативного планирования поездной и грузовой работы: сменно-суточные планы поездной и грузовой работы соответствующих уровней управления, результаты текущего планирования, а также оперативные приказы дежурно-диспетчерского персонала и руководства, данные о текущей эксплуатационной обстановке. Выходами процесса являются итоги работы за смену, поездное положение на участках и направлениях, распоряжения, указания, приказы, направленные на выполнение оперативных производственных задач. Эти данные представляются в виде докладов и справочно-аналитических материалов, составляемых работниками дежурно-диспетчерского персонала.

Сквозной процесс диспетчерского управления в виде диаграммы типа VAD включает в себя:

- прием смены дежурно-диспетчерским аппаратом;
- диспетчерское управление процессом перевозок;
- подведение итогов за смену.

Каждый из перечисленных процессов, в свою очередь, представлен как модель выбора процессов (диаграмма формата PSD). Такой подход позволил учесть разные алгоритмы выполнения действий в зависимости от факторов, влияющих на процесс. Диаграммы выбора процессов детализированы на укрупненные событийные цепочки процессов (модели EPC III уровня). На данном уровне описания процесса использованы логические операторы, позволяющие учитывать ветвление протекания процессов.

Процессы нижнего уровня, представляющие собой последовательность взаимоувязанных действий, которые направлены на достижение заданного результата, визуализированы с помощью моделей типа EPC IV уровня. Каждый описанный таким образом процесс начинался и заканчивался с указания связанного процесса и его продукта, который передавался из предыдущего процесса или в последующий процесс. Этим обеспечивалась увязка с другими сквозными процессами.

При разработке процессов, входящих в модель «Прием смены дежурно-диспетчерским аппаратом», учитывались сценарии процесса по уровням управления. Так были определены сценарии, зависящие от того, на каком уровне управления приходит прием смены: центральном, полигонном, региональном, линейном. Выделены основные составляющие каждого сценария:

ознакомление со сменно-суточным планом поездной работы; ознакомление со сменно-суточным планом грузовой работы (на полигонном уровне отсутствует);

формирование корректирующих указаний на предстоящую смену.

В сценарии регионального уровня отдельно выделен процесс формирования указаний поездным диспетчером, что обусловлено особенностями работы поездных диспетчеров и используемых ими ресурсов.

В течение смены дежурно-диспетчерский персонал выполняет функции по обеспечению регулирования перевозочным процессом, которые следует разделять на следующие группы (рис. 1):

- диспетчерское регулирование поездной работы;
- диспетчерское регулирование грузовой работы;
- предоставление «окон» на инфраструктуре;
- управление минимизацией последствий аварийных и нестандартных ситуаций;

организация подъема временно отставленных и временной задержки груженных поездов.

В свою очередь, каждый процесс представленных сценариев может оказаться следствием предыдущего и корректироваться в ходе выполнения. Важными признаками процессов, которые входят в эти группы, являются непрерывность и возможность одновременного выполнения в зависимости от эксплуатационной обстановки и поставленных задач. В модели это учитывается через сценарии.

Каждый сценарий выделенных групп процессов можно разделить на этапы цикла управления, такие как анализ, принятие решений (регулирование) и контроль.

Этап анализа включает в себя оценку существующей эксплуатационной обстановки и заданного плана, определение приоритетности задач. В случае возникновения отклонений информация передается ответственным лицам, уполномоченным принимать решения по обозначенным вопросам.

Регулирование заключается в формировании оперативных приказов и указаний, которые являются основным инструментом работы дежурно-диспетчерского персонала.

При реализации этапа контроля определяются параметры, на основании которых в дальнейшем выполняется анализ и принимаются решения.

Представленный подход позволяет исключить дублирование и получить наиболее широкий охват функций, выполняемых дежурно-диспетчерским персоналом на всех уровнях управления. При этом многообразие сценариев делает данный подход к описанию процессов универсальным, а функциональная специализация диспетчерских центров [6] учитывается при выборе того или иного сценария.

Финальный этап сквозного процесса — подведение итогов за смену. Так же, как и при описании модели «Прием смены дежурно-диспетчерским аппаратом», сценарии подведения итогов зависят от рассматриваемого уровня диспетчерского управления. В модели каждый сценарий разделен на две составляющие:

- подготовка доклада по итогам смены;
- доклад по итогам смены.



Рис. 1. Диспетчерское управление процессом перевозок (диаграмма выбора процесса)

Подготовка доклада включает в себя формирование справочно-аналитических материалов и данных, предназначенных для работников следующей смены и руководителей, принимающих управленческие решения. Информация, необходимая для выполнения этих функций, зависит от круга ведения вопросов конкретного представителя дежурно-диспетчерского персонала.

Процесс «Подведение итогов за смену», как и «Прием смены дежурно-диспетчерским аппаратом», тесно связан с оперативным планированием поездной и грузовой работы. Продукты данной модели используются для начала нового цикла сквозного процесса «Диспетчерское управление процессом перевозок».

Сведения об авторах:

Алексей Сергеевич Крылов,

кандидат технических наук, заместитель начальника службы перспективной организации движения и моделирования перевозочного процесса Центральной дирекции управления движением — филиала ОАО «РЖД»

Евгения Сергеевна Максимова,

кандидат технических наук, доцент, директор Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (МИИТ)

Вера Константиновна Полякова,

старший преподаватель, заместитель директора Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (МИИТ)

Сергей Олегович Ждакаев,

старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ)

Рассмотренный комплекс задач в представленном формате выполнен впервые, в целом имеет прикладной характер за счет возможности дальнейшего использования в рамках производственной деятельности ОАО «РЖД». На основе утвержденной целевой конфигурации границ диспетчерских участков Центральной дирекцией управления движением совместно с первыми заместителями железных дорог ОАО «РЖД» организована работа по формированию и утверждению детальных планов мероприятий по переходу в результирующее состояние на каждой железной дороге. Процессные модели используются при формировании Единой процессной модели холдинга «РЖД» и в рамках совершенствования нормативных документов по управлению перевозками на железнодорожном транспорте.

Authors information:

Alexey S. Krylov,

PhD in Engineering, Deputy Head of Advanced Traffic Management and Transportation Process Modeling Service, Central Directorate of Traffic Management — a branch of JSC «RZD»

Evgeniya S. Maksimova,

PhD in Engineering, Associate Professor, Director of Institute of Management and Digital Technologies, Russian University of Transport (MIIT)

Vera K. Polyakova,

Senior Lecturer, Deputy Director of Institute of Management and Digital Technologies, Russian University of Transport (MIIT)

Sergey O. Zhdekaev,

Senior Lecturer of Operational Work and Safety in Transport Department, Russian University of Transport (MIIT)

Литература

1. Бородин А. Ф., Зобнин В. Л., Крылов А. С. Развитие принципов диспетчерского управления перевозочным процессом // Тихомировские чтения: наука и современная практика технологии перевозочного процесса : материалы Международной научно-практической конференции, Гомель, 20–21 октября 2022 г. Гомель : Изд-во БелГУТ, 2023. С. 35–39.
2. Крылов А. С. Постановка задачи на разработку концепции перспективного диспетчерского управления на сети железных дорог с применением сквозных принципов // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сборник трудов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 20–21 октября 2021 г. Москва : Изд-во РУТ, 2022. С. 242–258.
3. Крылов А. С. Концепция перспективного диспетчерского управления на сети железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2021. № 9. С. 39–45. ISSN 0044-4448.
4. Бородин А. Ф., Максимова Е. С. Развитие диспетчерского управления на сети железных дорог // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки : труды юбилейной международной научно-практической конференции, Москва, 19 июня 2024 г. Курск : Университетская книга, 2024. С. 83–89.
5. Максимова Е. С., Шмаль В. Н. Развитие теории управления рисками // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 2. С. 39–46. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-39-46.

References

1. Borodin A. F., Zobnin V. L., Krylov A. S. Development of the principles of dispatching control of the transportation process. *Tikhomirov Readings: science and modern practice of transportation process technology* : proceedings of the International scientific and practical conference, Gomel, October 20–21, 2022. Gomel : Publishing House of BelSUT, 2023. Pp. 35–39. (In Russian).
2. Krylov A. S. Setting the task of developing the concept of advanced dispatching control on the railway network using end-to-end principles. *Innovative technologies in railway transport* : proceedings of scientific and practical conference with international participation, Moscow, October 20–21, 2021. Moscow : Publishing House of RUT, 2022. Pp. 242–258. (In Russian).
3. Krylov A. S. The concept of advanced dispatching control on the railway network. *Railway Transport*. 2021. No. 9. Pp. 39–45. ISSN 0044-4448. (In Russian).
4. Borodin A. F., Maksimova E. S. Development of dispatch management on the railway network. *Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov — the founder of transport science* : proceedings of the Jubilee International scientific and practical conference, Moscow, June 19, 2024. Kursk : University Book, 2024. Pp. 83–89. (In Russian).
5. Maksimova E. S., Shmal V. N. Development of risk management theory. *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2022. Vol. 16. No. 2. Pp. 39–46. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-39-46. (In Russian).

6. Бородин А. Ф., Шиндеров Р. В., Строченков Р. Г. Использование ресурсов железнодорожной сети: результативность планирования и управления // Транспорт Урала. 2024. № 3 (82). С. 3–10. DOI : 10.20291/1815-9400-2024-3-3-10.
7. Эффективные параметры оперативного планирования и диспетчерского управления поездной работой / А. Ф. Бородин, Т. А. Громова., Е. А. Алексеvнин, Р. Т. Мерзликин // Железнодорожный транспорт. 2023. № 9. С. 10–18. ISSN 0044-4448.
8. Типовая технология управления перевозками на объединенных полигонах / В. Л. Зобнин, В. В. Панин, Е. С. Прокофьева, Д. В. Рубцов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 11. С. 7–14. ISSN 0044-4448.
9. Панин В. В., Прокофьева Е. С., Рубцов Д. В. Оперативное управление эксплуатационной работой на полигонном уровне // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. 2017. № 2. С. 57–64. ISSN 2304-9642.
10. Прокофьева Е. С., Шмаль В. Н. Анализ культуры безопасности диспетчерских центров управления перевозками // Проблемы безопасности на транспорте : материалы X международной научно-практической конференции, Гомель, 26–27 ноября 2020 г. Гомель : Изд-во БелГУТ, 2020. Ч. 3. С. 55–56.
6. Borodin A. F., Shinderov R. V., Strochenkov R. G. Use of railway network resources: productivity of planning and operation. *Transport of the Urals*. 2024. No. 3 (82). Pp. 3–10. DOI : 10.20291/1815-9400-2024-3-3-10. (In Russian).
7. Borodin A. F., Gromova T. A., Aleksevnnin E. A., Merzlikin R. T. Effective parameters of operational planning and dispatching control of train operation. *Railway Transport*. 2023. No. 9. Pp. 10–18. ISSN 0044-4448. (In Russian).
8. Zobnin V. L., Panin V. V., Prokofieva E. S., Rubtsov D. V. Typical transportation management technology at combined polygons. *Railway Transport*. 2016. No. 11. Pp. 7–14. ISSN 0044-4448. (In Russian).
9. Panin V. V., Prokofieva E. S., Rubtsov D. V. Operational management of operational work at the polygon level. *Bulletin of Joint Scientific Council of JSC Russian Railways*. 2017. No. 2. Pp. 57–64. ISSN 2304-9642. (In Russian).
10. Prokofieva E. S., Shmal V. N. Analysis of the safety culture of dispatch centers for transportation management. *Transport security problems : proceedings of the 10th International scientific and practical conference, Gomel, November 26–27, 2020*. Gomel : Publishing House of BelSUT, 2020. Part 3. Pp. 55–56. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.03

Автоматизированный метод выбора приоритетности пропуска грузовых поездов через станции участка железной дороги

Елена Николаевна Тимухина¹, Николай Андреевич Тушин¹, Кирилл Максимович Тимухин¹, Максим Маратович Аманов¹¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Automated method for selecting the priority of passing freight trains through stations of a railway section

Elena N. Timukhina¹, Nikolay A. Tushin¹, Kirill M. Timukhin¹, Maxim M. Amanov¹¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

Статья посвящена проблеме отставления грузовых поездов от движения на железнодорожных станциях. Предложены инструмент управления вагонопотоками и рациональная методика «подъема» грузовых поездов, основанная на методе анализа иерархий. Изучен эффект от разработанного порядка выбора поезда для «подъема» с минимизацией эксплуатационных затрат и ускорением сроков доставки грузов. Предложена интеграция разработанного программного продукта в существующую автоматизированную систему оперативного управления перевозками, позволяющая автоматизировать процесс управления отставленными поездами, минимизировать задержки и оптимизировать работу диспетчерского аппарата.

Ключевые слова: отставление от движения, «подъем» грузовых поездов, ускорение вагонопотоков, сроки доставки, автоматизированные системы, метод иерархий

Abstract

The article discusses the problem of delayed freight trains. It proposes a tool for managing wagon flows and a rational methodology for «lifting» freight trains based on an analytic hierarchy process. The article examines the impact of the developed procedure for selecting a train for «lifting» in order to minimize operating costs and accelerate the delivery of cargo. The article also proposes the integration of the developed software product into the existing automated operational transportation management system, which allows for the automation of delayed train management, minimizing delays, and optimizing the work of dispatch personnel.

Keywords: train detention, «lifting» freight train, acceleration of car traffic, delivery times, automated systems, analytic hierarchy process

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-51-55

ВВЕДЕНИЕ

Проблема отставления грузовых поездов от движения — одна из наиболее актуальных в эксплуатационной работе железных дорог. Массовые задержки приводят к снижению участковой скорости, увеличению сроков доставки грузов и, как следствие, к росту экономических потерь [1]. Основные причины — технические ограничения инфраструктуры, нехватка локомотивов, несогласованность работы служб и внешние факторы [2].

Для минимизации негативных последствий отставления грузовых поездов от движения необходимы современные инструменты управления вагонопотоками и рациональная методика «подъема»¹ грузовых поездов, основанные на автоматизированных системах принятия решений [3, 4].

МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ «ПОДЪЕМА» ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

Для ускорения продвижения вагонопотоков необходимо определить порядок выбора поезда для «подъема» с минимизацией эксплуатационных затрат и ускорением сроков доставки грузов.

При большом количестве отставленных от движения поездов возникает проблема выбора поезда для «подъема», поэтому необходимо определить критерии, удовлетворяющие условиям «подъема»:

время до истечения срока доставки, которое устанавливает срочность обработки поезда;

эксплуатационные затраты, включающие расходы на простои, перепробеги локомотивов и маневровую работу;

резерв пропускной способности станции, который оценивает возможность приема поезда без нарушения графика движения [5].

Из-за неоднозначности и несовместимости значения критериев в исследовании предлагается использовать метод анализа иерархий (МАИ), который позволяет перейти к единой шкале измерения различных критериев и определить приоритетность «подъема» отставленных грузовых поездов.

¹«Подъем» грузового поезда — технологическая операция по возобновлению движения состава, временно отставленного от следования.

В МАИ иерархические структуры служат инструментом для моделирования сложных процессов. Математическая модель основана на построении матриц попарных сравнений и расчете весовых коэффициентов каждого критерия [5].

Для каждого отдельного критерия проводится сравнение значений по каждой альтернативе (отставленному от движения грузовому поезду). Элемент матрицы сравнения альтернатив по критерию показывает, во сколько раз значение критерия i -го отставленного поезда (A_i) превосходит значение этого же критерия j -го отставленного поезда (A_j) и удовлетворяет условию $a_{ij} \geq 0$ [6].

В результате получается единичная матрица размерностью $1 \times n$, где n — количество альтернатив.

Далее вычисляется компонент собственного вектора как среднее геометрическое элементов строки, и осуществляется нормализация результатов для получения нормализованного вектора приоритетов (НВП).

На следующей стадии МАИ выполняется процедура синтеза приоритетов, направленная на комплексную оценку результатов расчетов (умножение матрицы попарных сравнений критериев на матрицу нормализованного вектора приоритетов). На этом этапе локальные приоритеты, полученные из матриц парных сравнений, объединяются, и определяется их совокупное влияние на элементы вышестоящего уровня иерархической структуры [6].

В результате получается матрица-столбец с итоговыми весами альтернатив. В качестве приоритетного для «подъема» выбирается поезд с минимальным итоговым весом.

СОЗДАНИЕ И ИНТЕГРАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА В СУЩЕСТВУЮЩИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

С целью автоматизации расчета приоритетности отставленных от движения грузовых поездов и повышения качества работы диспетчерского аппарата предложен программный продукт, позволяющий принимать решение о «подъеме» отставленных поездов.

При выборе информационной базы для программного продукта были проанализированы Автоматизированная система оперативного управления перевозками (АСОУП) и Интегрированная система управления поездной работой (ИСУПР) (табл. 1). Сравнение двух систем показало, что АСОУП отвечает за оперативное управление перевозками, контролируя текущее движение поездов, вагонов и локомотивов, тогда как ИСУПР ориентирована на стратегическое планирование работы железнодорожных полигонов и прогнозирование вагонопотоков. Помимо этого, в отличие от АСОУП [7], которая фиксирует эксплуатационные данные в реальном времени, ИСУПР анализирует ситуацию комплексно, оценивая загрузку станций, пропускную способность участков и риски задержек. Кроме того, в ИСУПР есть модуль для работы с временно отставленными от движения поездами на полигоне дороги, который при выборе поезда для «подъема» использует данные о несоблюдении сроков доставки грузов [8].

Таким образом, для автоматизации расчета приоритетности «подъема» грузовых поездов и учета всех критериев к внедрению предлагается программный продукт в ИСУПР.

Таблица 1

Анализ автоматизированных систем

№ п/п	Функциональные возможности	АСОУП	ИСУПР
1	Оперативное управление движением поездов	+	+
2	Мониторинг дислокации вагонов и локомотивов	+	+
3	Электронный документооборот (натурные листы, отчетность)	+	–
4	Прогнозное моделирование движения поездов	–	+
5	Планирование работы станций и участков	–	+
6	Контроль погрузки и выгрузки вагонов	+	–
7	Анализ эксплуатационной работы железнодорожных полигонов	–	+
8	Управление отставленными от движения поездами	–	+
9	Автоматизированное планирование передачи поездов через междорожные стыки	–	+
10	Контроль выполнения плана формирования поездов	+	–
11	Управление локомотивным парком и бригадами	+	–
12	Анализ и предотвращение рисков задержек поездов	–	+

Разработанная программа предназначена для расчета приоритетности «подъема» грузовых поездов на основе МАИ. После введенных данных об отставленных поездах вычисляются время доставки, эксплуатационные затраты и резерв пропускной способности станции.

Принцип работы программы

Программный продукт написан на языке C# (объектно-ориентированный язык программирования общего назначения в редакторе Windows Forms), который позволяет пользователю вводить данные об отставленных от движения поездах [9].

Программа использует МАИ для расчета приоритетности поездов. Этот метод позволяет сравнивать различные критерии и альтернативы (поезда) на основе их весовых коэффициентов.

При помощи введенных данных программа рассчитывает приоритетность каждого поезда, используя весовые коэффициенты для каждого критерия. Результаты отображаются в таблице, и пользователь может видеть, какой поезд имеет наибольший приоритет для «подъема».

Основные этапы работы программы

Ввод данных вручную. Пользователь вводит информацию о поездах через графический интерфейс (рис. 1) в специализированные поля (табл. 2).

Ввод данных автоматически. Программный продукт может через элемент DataGridView получать данные из любой информационной системы, включая ИСУПР. Это позволяет извлекать актуальные данные о поездах, их текущем положении, времени

прибытия, сроках доставки, состоянии инфраструктуры и других параметрах, необходимых для расчета приоритетности «подъема» поездов [10].

Расчет итоговой приоритетности. Программа рассчитывает итоговый вес для каждого поезда, выводит результаты расчета в столбец PriorityScore (рис. 2) в элементе DataGridView и, сравнив полученные значения для каждого поезда, выявляет приоритетный поезд с минимальным итоговым весом:

$$W_{\text{итог}A_j} = \sum A \cdot A^* \rightarrow \min,$$

где A — матрица сравнений отставленных поездов по каждому критерию; A^* — матрица нормализованных векторов приоритетов.

В итоге предлагается алгоритм работы программного продукта для определения приоритетности продвижения грузовых поездов, отставленных от движения, с целью увеличения участковой скорости, ускорения продвижения вагонопотоков и уменьшения сроков доставки грузов (рис. 3).

Рис. 1. Интерфейс программного продукта

Таблица 2

Параметры данных об отставленных от движения грузовых поездах

Наименование поля для ввода информации	Наименование столбца в элементе DataGridView (таблица результатов)	Описание
Станция отставления	Station	Полное (или сокращенное) название станции дислокации отставленного от движения грузового поезда
Номер поезда	Number	
Дата прибытия	ArrivalDate	Дата и время (указывается автоматически) прибытия поезда на станцию
Дата доставки	DeliveryDate	Дата доставки груза, указанная в транспортной железнодорожной накладной
Время маневровых операций	ManeuverTime	Суммарное количество локомотиво-часов, затраченных на маневровые операции с отставленным поездом
Пробег локомотива	ReserveDistance	Пробег поездного локомотива резервом из-под отставленного поезда и под него
Дополнительный пробег	ExtraDistance	Дополнительный пробег поезда от маршрута согласно плану формирования поездов
Занятые пути	OccupiedTracks	Количество занятых приемо-отправочных путей на станции отставления
Свободные пути	FreeTracks	Количество свободных приемо-отправочных путей на станции отставления

Рис. 2. Отображение результатов расчета

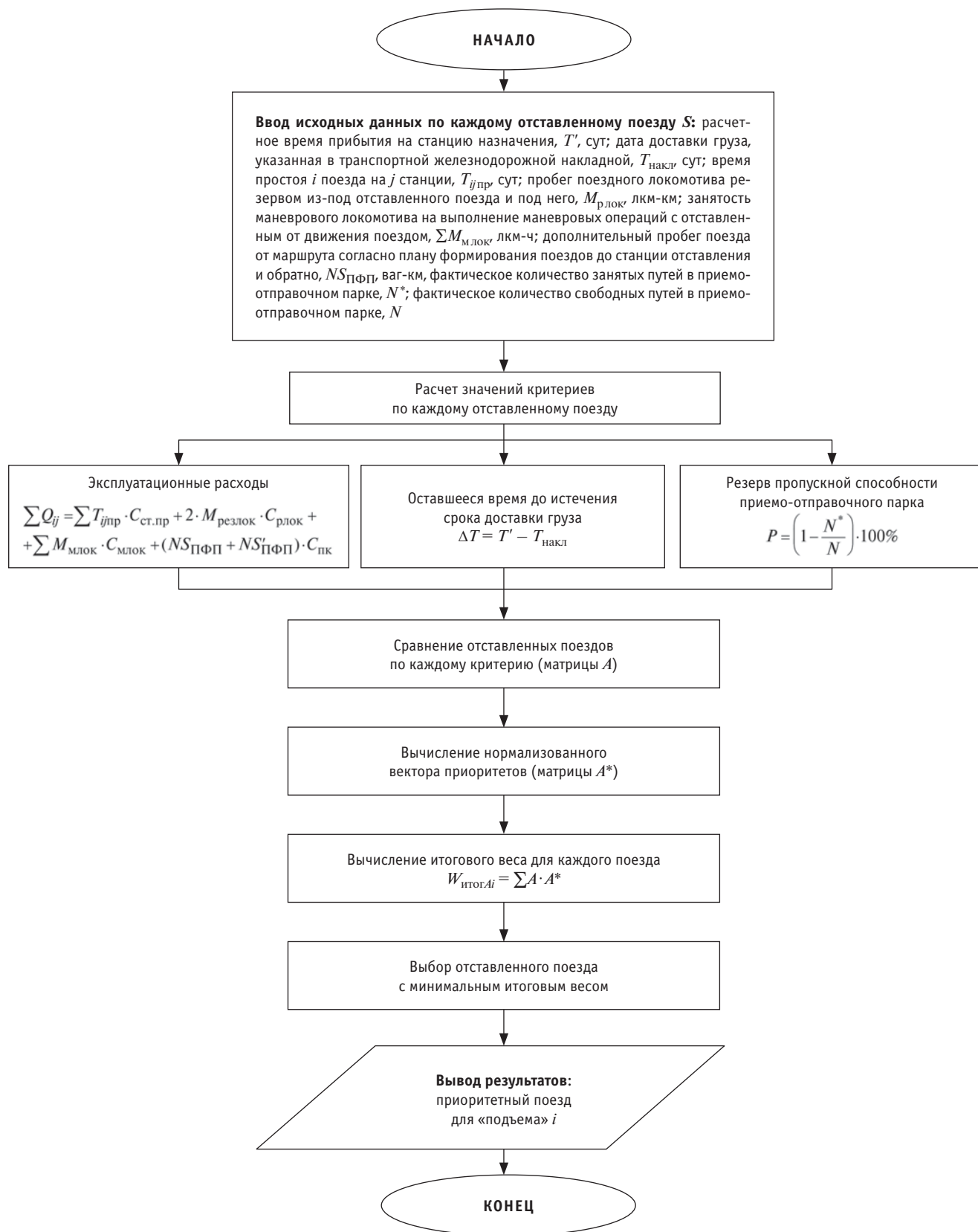


Рис. 3. Алгоритм работы программного продукта

ВЫВОДЫ

Для решения проблемы задержек поездов в пути следования разработана автоматизированная система выбора приоритетности «подъема» грузовых поездов, основанная на методе анализа иерархий. Интеграция разработанного программного продукта в систему ИСУПР позволяет автоматизировать процесс управления отставленными поездами, минимизировать задержки и оптимизировать работу диспетчерского аппарата.

Сведения об авторах:

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

Николай Андреевич Тушин,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой»
Уральского государственного университета путей сообщения

Кирилл Максимович Тимухин,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа»
Уральского государственного университета путей сообщения

Максим Маратович Аманов,
аспирант Уральского государственного университета путей сообщения

Предложенный программный продукт не только решает актуальную проблему отставления от движения грузовых поездов, но и способствует повышению общей эффективности железнодорожных перевозок, снижению затрат и соблюдению сроков доставки грузов.

Authors information:

Elena N. Timukhina,
DSc in Engineering, Professor,
Head of Operations Management Department,
Ural State University of Railway Transport

Nikolay A. Tushin,
DSc in Engineering,
Professor of Operations Management Department,
Ural State University of Railway Transport

Kirill M. Timukhin,
PhD in Engineering, Associate Professor of Stations,
Junctions and Freight Work Department,
Ural State University of Railway Transport

Maxim M. Amanov,
postgraduate student, Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Комовкина Н. С., Половинко Л. А., Попадюк А. Ю. Обоснование строительства дополнительных путей на станциях для отстоя на них избытка порожних вагонов или отставленных от движения составов поездов // Известия ПГУПС. 2019. Т. 16. № 3. С. 419–426. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-419-426.
2. Новиков П. О. Разработка временного отставления от движения и подъема грузовых поездов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2015. 133 с.
3. Об утверждении классификатора причин задержек грузов и порожних вагонов : распоряжение ОАО «РЖД» от 26.06.2017 г. № 1192р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/555611634>.
4. Тимухина Е. Н., Кашеева Н. В., Аманов М. М. Анализ причин отставления от движения грузовых поездов на полигоне Свердловской железной дороги // Инновационный транспорт. 2023. № 1 (47). С. 82–84. DOI: 10.20291/2311-164X-2023-1-82-84.
5. Стуликов Е. А. Метод анализа иерархий в определении оптимального поставщика балластного щебня для строительства высокоскоростной магистрали Москва — Казань // Экономика и социум. 2017. № 5 (36). С. 1059–1068. ISSN 2225-1545.
6. Тимухина Е. Н., Аманов М. М. Метод анализа иерархий при определении «подъема» грузовых поездов // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 2 (110). С. 97–101. ISSN 1997-0722.
7. Москат Н. А. Методы повышения эффективности автоматизированной системы оперативного управления на железнодорожном транспорте // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1. ISSN 2073-8633.
8. Интегрированная система управления поездной работой на объединенном полигоне железных дорог 2016 (ИСУПР). URL: <http://www.transsys.ru/content/products/web/isupr.php>.
9. Евдокимов П. В. C# в примерах. Санкт-Петербург : Наука и техника, 2019. 320 с.
10. Шень А. Программирование: теоремы и задачи. Москва, 2017. 320 с.

References

1. Komovkina N. S., Polovinko L. A., Popadyuk A. Yu. Justification of auxiliary staging tracks construction at stations for empty cars or train sets dismissed from operation. *Proceedings of Petersburg State Transport University*. 2019. Vol. 16. Issue 3. Pp. 419–426. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-419-426. (In Russian).
2. Novikov P. O. Development of temporary suspension from movement and lifting of freight trains : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2015. 133 p. (In Russian).
3. On approval of the classifier of reasons for delays in cargo and empty cars : the Order of JSC «RZD» dated 26.06.2017 No. 1192r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/555611634>. (In Russian).
4. Timukhina E. N., Kashcheeva N. V., Amanov M. M. Analysis of the reasons for disengagement of freight trains at the testing ground of the Sverdlovsk railway. *Innotrans*. 2023. No. 1 (47). Pp. 82–84. DOI: 10.20291/2311-164X-2023-1-82-84. (In Russian).
5. Stulikov E. A. Analytic Hierarchy Process in determining the optimal supplier of ballast crushed stone for the construction of the Moscow — Kazan high-speed railway. *Economy and society*. 2017. No. 5 (36). Pp. 1059–1068. ISSN 2225-1545. (In Russian).
6. Timukhina E. N., Amanov M. M. Analytic Hierarchy Process in determining the «rise» of freight trains. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2025. No. 2 (110). Pp. 97–101. ISSN 1997-0722. (In Russian).
7. Moskat N. A. Methods for increasing the efficiency of an automated system of operational control in railway transport. *Engineering Journal of Don*. 2018. No. 1. ISSN 2073-8633. (In Russian).
8. Integrated train operation management system at the united railway polygon 2016. URL: <http://www.transsys.ru/content/products/web/isupr.php>. (In Russian).
9. Evdokimov P. V. C# in the examples. St. Petersburg : Science and Technology, 2019. 320 p. (In Russian).
10. Shen A. Programming: theorems and tasks. Moscow, 2017. 320 p. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.224

Выбор технологии обслуживания железнодорожных туристических маршрутов подвижным составом

Дмитрий Иванович Хомич¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

Justification of the choice of technology for servicing tourist trains with rolling stock

Dmitriy I. Khomich¹

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Аннотация

Активное развитие железнодорожных туристических перевозок в России требует распределения различных типов подвижного состава по маршрутной сети для оптимальной загрузки и подвижного состава, и ремонтных предприятий. В статье проанализирован отечественный и зарубежный опыт, определены наиболее характерные способы обслуживания маршрутной сети туристических поездов с учетом технических и технологических особенностей. Актуальность исследования заключается в необходимости решения задачи, связанной с рассредоточением мест дислокации подвижного состава и обслуживаемых им маршрутов туристических поездов.

Ключевые слова: туристический поезд, подвижной состав, маршрутная сеть, плановые виды ремонта, резервный пробег, брендированный подвижной состав, продолжительность маршрута, депо приписки, пункты оборота

Abstract

The active development of railway tourist transportation in Russia requires the distribution of various types of rolling stock along the route network for optimal loading of both rolling stock and repair facilities. The article analyzes domestic and foreign experience, identifies the most typical ways of servicing the route network of tourist trains, taking into account technical and technological features. The relevance of the study lies in the need to solve the problem of dispersing the locations of rolling stock and the routes of tourist trains served by them.

Keywords: tourist train, rolling stock, route network, planned types of repairs, reserve mileage, branded rolling stock, route duration, depot locations, turnover points

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-56-61

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время железнодорожный туризм показывает устойчивую тенденцию к росту и привлечению все большего числа пассажиров, о чем свидетельствует динамика развития маршрутной сети в разных странах мира [1–4]. Железнодорожные и туристические компании находят новые возможности использования существующей железнодорожной инфраструктуры и предлагают новые сервисы для туристов, в том числе с изменением глубины продаж по различным направлениям, что позволяет заблаговременно и наиболее рационально распределять парк подвижного состава.

Что касается России, то в нашей стране при широком участии транспортных компаний была разработана и утверждена Концепция целевой программы «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2019–2025 годы)» [5]. Активное расширение маршрутной сети железнодорожных туристических поездов в России началось в июне 2019 г. с запуска ежедневного туристического поезда «Рускеальский экспресс», который за первые 6 месяцев перевез свыше 30 тыс. пассажиров по маршруту Сортавала — Горный парк «Рускеала» и в настоящее время является единственным ежедневным туристическим поездом с вагонами локомотивной тяги [6].

Для маршрутной сети туристических поездов в России необходимы классификация и формирование единых технических и технологических требований с учетом возможности обслуживания, ремонта, экипажировки и использования как брендированного, так и других типов подвижного состава на различных маршрутах [7, 8].

Для обеспечения единых стандартов обслуживания туристических поездов по маршрутной сети ОАО «РЖД» разработан и утвержден Порядок организации туристских перевозок в холдинге «РЖД» [9]. Дальнейшая систематизация требований к туристическим поездкам различных перевозчиков нашла отражение в Федеральном законе от 28.02.2025 г. № 26-ФЗ [10].

Обширная маршрутная сеть, с одной стороны, и дефицит подвижного состава туристических поездов, с другой стороны, требуют оптимизации времени его обслуживания и возможной унификации его работы¹. Для этого необходимо определить схожие способы обслужива-

¹Здесь под работой любых типов подвижного состава понимается выполнение рейсов по маршруту туристического пассажирского поезда.



Рис. 1. Распределение способов обслуживания туристических поездов с использованием моторвагонного подвижного состава:
— страны мира; — Россия

живания маршрутной сети и возможности эксплуатации на них как моторвагонного подвижного состава (МВПС), так и поездов с вагонами локомотивной тяги [11, 12].

Анализ работы подвижного состава туристических поездов, учитывающий такие параметры, как удаленность начала и конца маршрута поезда от депо приписки подвижного состава, возможность обслуживания подвижного состава на других производственных площадках вне депо приписки, продолжительность выполняемых рейсов, периодичность проведения плановых видов ТО и ремонта, позволил выделить ряд наиболее схожих вариантов обслуживания не только в России, но и за рубежом. Было изучено 195 маршрутов туристических поездов в 32 странах мира, из них выбраны 34 маршрута, обслуживаемых парком моторвагонного подвижного состава (МВПС), и 137 маршрутов с вагонами локомотивной тяги. Остальные маршруты ввиду их уникальности не анализировались.

ОБСЛУЖИВАНИЕ ТУРИСТИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ПАРКОМ МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В настоящее время наиболее распространены четыре варианта обслуживания туристических поездов с использованием МВПС (рис. 1):

- обслуживание маршрутов из депо приписки;
- передислокация (засылка) к новому месту работы;
- передислокация (засылка) к новому месту формирования туристических поездов;
- комбинированный способ.

Рассмотрим эти способы подробнее.

Обслуживание маршрутов из депо приписки (рис. 2). Этот способ позволяет обслуживать сразу несколько маршрутов с распределенной сетью, начало которой находится на станции или в железнодорожном узле, где размещается депо приписки подвижного состава. Состав поезда выполняет несколько рейсов по возможным маршрутам туристических поездов в границах участков обращения с последующим возвращением в основное депо для проведения ТОиР. Данный способ нашел наибольшее распространение при обслуживании туристических поездов практически во всех странах мира и в ряде

регионов нашей страны. В качестве примера можно привести электропоезда «Лахта» и «Приморье», туристические поезда «Морозко», «Простоквашино», электропоезда «Ласточка», выполняющие рейсы по маршрутам Санкт-Петербург — Псков, Санкт-Петербург — Хелюля, Псков — Великий Новгород — Петрозаводск, и др.

Передислокация (засылка) к новому месту работы (рис. 3). Этот способ предусматривает передислокацию МВПС на новое место работы, в том числе за пределами железной

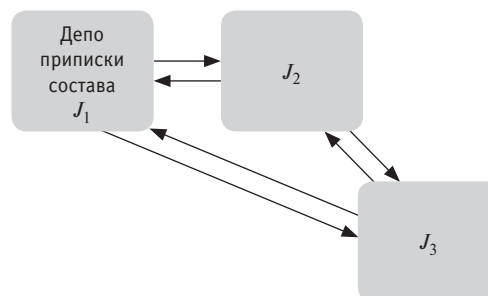


Рис. 2. Схема обслуживания маршрутов из депо приписки:
 J_1, J_2, J_3 — возможные начальные, промежуточные и конечные пункты маршрутной сети (стрелками показаны направления обслуживания маршрута туристического поезда)

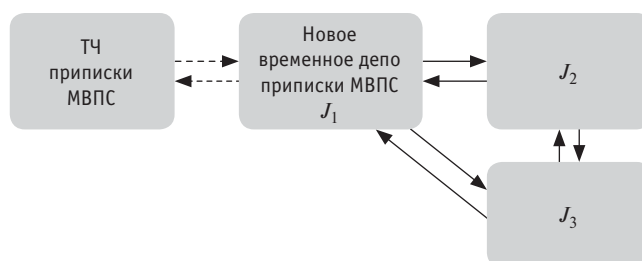


Рис. 3. Передислокация к новому месту работы:
 J_1, J_2, J_3 — возможные начальные, промежуточные и конечные пункты маршрутной сети (прямыми стрелками показаны направления обслуживания маршрута туристического поезда, пунктирными — порожний пробег МВПС)

дороги, где подвижной состав выполняет несколько рейсов с туристическими поездами, а плановое техническое обслуживание производится на новой площадке (временное депо эксплуатации). Способ нашел применение для некоторых туристических поездов, которые выполняют разовые, сезонные или тематические туры на значительном удалении от депо приписки. В качестве примера можно привести туристические поезда Японии, Италии, Перу, в России такой способ используется в Республике Карелия для ряда участков обращения рельсовых автобусов, туристического поезда «Переславский экспресс» и др.

Передислокация (засылка) к новому месту работы для выполнения рейсов туристических поездов (рис. 4). Рассматриваемый способ может носить как разовый, так и системный характер. Это связано с тем, что обслуживаемый участок расположен на определенном удалении от депо приписки, соответственно требуется передислокация из базового депо к месту начала туристического маршрута. В настоящее время в России такой способ применяется лишь на нескольких маршрутах (например, Слюдянка — Порт Байкал, Холмск — Чертов мост, Сортавала — Гимольская), а за рубежом он нашел более широкое применение, в том числе с использованием специализированных типов МВПС в таких странах, как Япония, Франция, Ангола, Перу, Италия.

Комбинированный способ включает в себя два схожих варианта. Первый вариант — расположение точек притяжения может находиться внутри участков обращения МВПС, что позволяет обслуживать сразу несколько маршрутов одним составом с учетом возможности проведения плановых видов технического обслуживания в отдаленных пунктах. Этот способ исключает порожний пробег состава. Второй вариант предусматривает возвращение МВПС засылкой в депо приписки после выполнения предусмотренного объема туристических перевозок. Варианты обслуживания туристических поездов комбинированным способом представлены на рис. 5. В России оба варианта применяются на новых туристических поездах («В Плёс», Кемерово — Барзас, «Грушинский экспресс» и др.). За рубежом комбинированный способ обслуживания распространен в Японии, Китае, Чили, Перу и в странах Европы.



Рис. 4. Передислокация (засылка) к новому месту формирования туристических поездов:
 J_1, J_2 — возможные начальные, промежуточные и конечные пункты маршрутной сети (прямыми стрелками показаны направления обслуживания маршрута туристического поезда, пунктирными — порожний пробег МВПС)

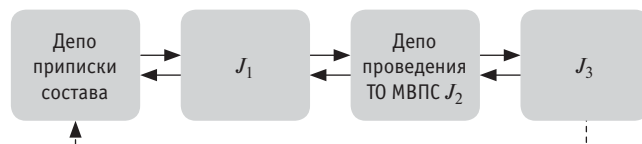


Рис. 5. Комбинированный способ:
 J_1, J_2, J_3 — возможные начальные, промежуточные и конечные пункты маршрутной сети (прямыми стрелками показаны направления обслуживания маршрута туристического поезда, пунктирными — порожний пробег МВПС)

Как видно из представленного обзора, в России для дальнейшей унификации обслуживания туристических поездов моторвагонным подвижным составом можно выделить три способа, которые используются больше всего: кольцевой, передислокация (засылка) к новому месту работы и комбинированный. Предложенные способы будут соответствовать не только технологии обслуживания маршрутной сети, но и требованиям Положения о планово-предупредительном ремонте моторвагонного подвижного состава открытого акционерного общества «Российские железные дороги» [13].

ОБСЛУЖИВАНИЕ ТУРИСТИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ПОЕЗДАМИ С ЛОКОМОТИВНОЙ ТЯГОЙ

В настоящее время в России и за рубежом при обслуживании маршрутной сети туристических поездов вагонами локомотивной тяги наиболее распространенными вариантами являются (рис. 6):

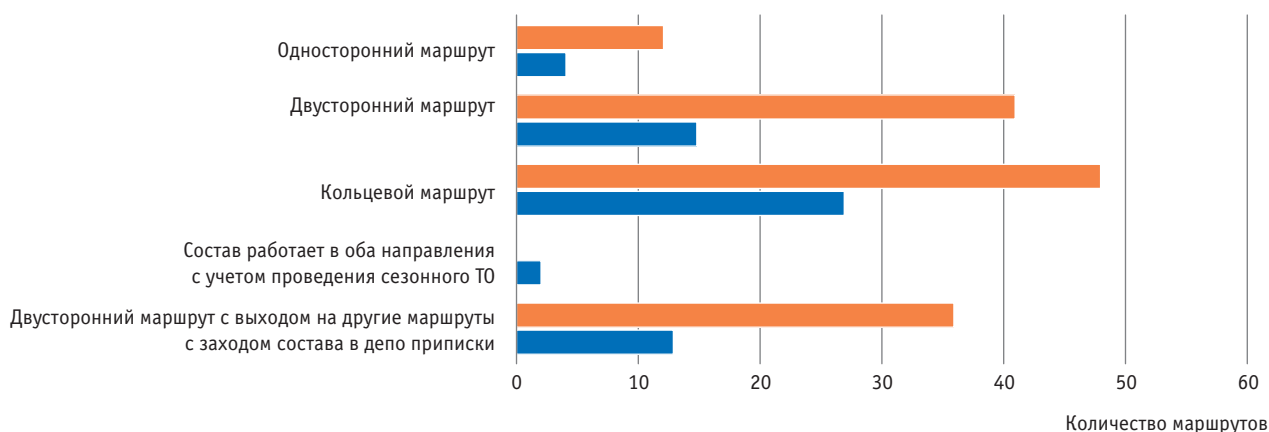


Рис. 6. Распределение способов обслуживания маршрутной сети туристических поездов с использованием вагонов локомотивной тяги:
— страны мира; — Россия

односторонний маршрут;
двусторонний маршрут;
кольцевой маршрут;
состав работает в оба направления с учетом проведения сезонного ТО;

двусторонний маршрут с выходом на другие маршруты и с заходом состава в депо приписки.

Односторонний маршрут (рис. 7) предусматривает формирование туристического поезда, следующего в одном направлении для выполнения разовой перевозки с последующим возвращением обратно засылкой в базовое депо приписки. Основой выбора этого способа обслуживания являются чартерные перевозки или индивидуальные туристические маршруты. Недостаток заключается в порожнем пробеге состава, равном протяженности маршрута, что существенно повышает стоимость перевозки и сокращает полезное время работы подвижного состава. В России этот способ используется для индивидуальных перевозок как отдельными туристическими поездами, так и в составе регулярных пассажирских поездов, а в ряде стран маршрут нашел довольно широкое применение.

Двусторонний маршрут (рис. 8) является наиболее распространенным для обслуживания туристических поездов с вагонами локомотивной тяги и работает в оба направления, в том числе со сменой групп туристов. Составы таких поездов приписаны к точке зарождения маршрута. Достоинство двустороннего маршрута заключается в отсутствии порожнего пробега. Этот способ нашел широкое применение во многих странах мира: за рубежом он используется практически на всех известных туристических поездах, таких как Belmond Andean Explorer, Al Andalus, Belmond British Pullman, Victoria Express, Great Southern, Orient Express и др., в России — на поездах «Золотой Орел», «Байкальская сказка», «Рускеальский экспресс», «Уральский экспресс» и др.

Кольцевой маршрут (рис. 9) — самый распространенный способ организации туристических перевозок, при котором начало и конец маршрута находятся в одной точке. Как правило, депо приписки состава размещается в точке зарождения маршрута. При таком способе обслуживания порожний пробег исключен. Кольцевой маршрут характерен для круизных поездов как в мире, так и в России. Среди отечественных поездов выходного дня можно выделить следующие: «Цветущая степь», «В Сибирь», «Жемчужина Кавказа», «Серебряный маршрут», «В Карелию на Поезде Деда Мороза» и многие другие.

Состав работает в оба направления с учетом проведения сезонного ТО (рис. 10). Работа подвижного состава осуществляется между основным депо и туристическим центром, однако для выполнения плановых сезонных ТО необходимо отправлять состав в другое депо для проведения сезонного технического обслуживания (весна/осень). В России такой способ обслуживания характерен только для брендированных поездов, используемых в специальных проектах для подготовки к летнему сезону туристических перевозок или для выхода на новогодний маршрут (например, «Поезд Победы», «Святой Пантелеймон», «Поезд Деда Мороза» и др.).

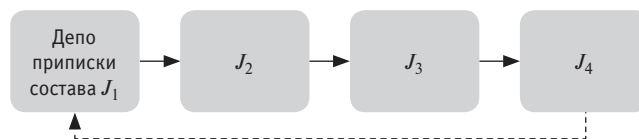


Рис. 7. Схема одностороннего маршрута:

J_1, J_2, J_3, J_4 — возможные начальные, промежуточные и конечные пункты туристических поездов (прямыми стрелками показаны направления обслуживания маршрута туристического поезда, пунктирными — порожний пробег)

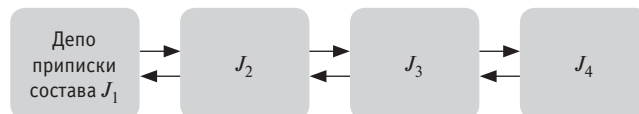


Рис. 8. Схема двустороннего маршрута:

J_1, J_2, J_3, J_4 — возможные начальные, промежуточные и конечные пункты туристических поездов (прямыми стрелками показаны направления обслуживания маршрута туристического поезда)

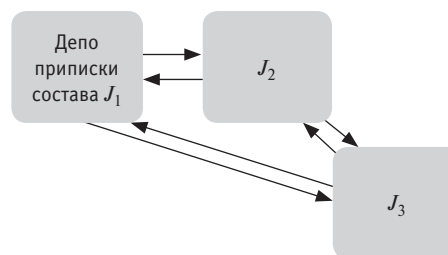


Рис. 9. Схема кольцевого маршрута:

J_1, J_2, J_3 — возможные начальные, промежуточные и конечные пункты туристических поездов (прямыми стрелками показаны направления обслуживания маршрута туристического поезда)

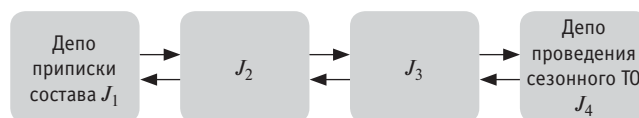


Рис. 10. Схема работы состава в оба направления с учетом проведения сезонного ТО:

J_1, J_2, J_3 — возможные начальные, промежуточные и конечные пункты туристических поездов (прямыми стрелками показаны направления обслуживания маршрута туристического поезда)

Двусторонний маршрут с выходом на другие маршруты и заходом состава в депо приписки (рис. 11). Способ наиболее характерен для унифицированных составов туристических поездов, которые могут быть использованы на ряде маршрутов. Как правило, этот подвижной состав небрендированный, он имеет конфигурацию, которая подходит для выполнения большого числа рейсов по маршрутной сети из одного крупного центра. Способ нашел широкое применение на железных дорогах Европы и России. Подвижной состав обслуживает большую маршрутную сеть, которая не требует привлечения брендированного подвижного состава, возможно лишь изменение внутренних интерьеров вагона под стиль туристического маршрута. К поездам, которые обслуживаются таким способом, можно отнести «Волжский вояж», «Сказы Поволжья», «В долину лотосов» и др.

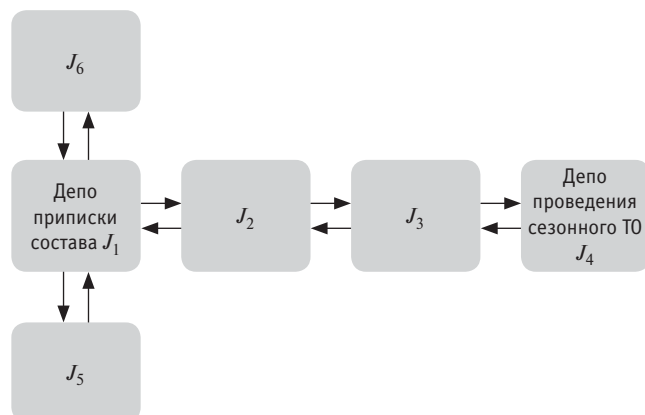


Рис. 11. Схема работы двустороннего маршрута с выходом на другие маршруты и заходом состава в депо приписки:
 J_1 – J_6 — возможные начальные, промежуточные и конечные пункты туристических поездов (прямыми стрелками показаны направления обслуживания маршрута туристического поезда)

Сведения об авторе:

Дмитрий Иванович Хомич,

старший преподаватель кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

Дальнейшая унификация работы парка подвижного состава и распределение равномерной загрузки вагонных депо по маршрутам следования туристических поездов с вагонами локомотивной тяги могут быть достигнуты за счет объединения односторонних и двусторонних маршрутов в одну группу и за счет одного базового депо приписки (см. рис. 7 и 8). Остальные способы унификации не подлежат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ обслуживания маршрутной сети туристических поездов в России и в других странах позволил определить наиболее схожие способы эксплуатации и ремонта парка подвижного состава, а также технологию работы моторвагонных и вагонных депо. В дальнейшем это позволит эффективно использовать имеющиеся ресурсы с учетом технических и технологических ограничений при обслуживании составов туристических поездов. Кроме того, следует отметить, что подобная классификация способов обслуживания подвижного состава представлена впервые.

Author's information:

Dmitriy I. Khomich,

Senior Lecturer of Railway Stations and Junctions Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Литература

1. Dang L., von Arx W. How Can Rail Use for Leisure and Tourism Be Promoted? Using Leisure and Mobility Orientations to Segment Swiss Railway Customers // *Sustainability*. 2021. 13. 5813. DOI: 10.3390/su13115813.
2. Rajani F., Boluk K. A. A Critical Commentary on the SDGs and the Role of Tourism // *Tourism and Hospitality*. 2022. Vol. 3. Issue 4. Pp. 855–860. DOI: 10.3390/tourhosp3040053.
3. Wu C., Zhang N., Xu L. Travelers on the Railway: An Economic Growth Model of the Effects of Railway Transportation Infrastructure on Consumption and Sustainable Economic Growth // *Sustainability*. 2021. 13. 6863. DOI: 10.3390/su13126863.
4. Peira G., Lo Giudice A., Miraglia S. Railway and Tourism: A Systematic Literature Review // *Tourism and Hospitality*. 2022. Vol. 3. Issue 1. Pp. 69–79. DOI: 10.3390/tourhosp3010005.
5. Концепция федеральной целевой программы «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2019–2025 годы)»: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 05.05.2018 г. № 872-р. URL : <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71842336/?ysclid=mf59pn448m763588960>.
6. Пегов Д. В. Пассажирский комплекс холдинга: события, факты, перспективы // *Железнодорожный транспорт*. 2020. № 2. С. 17–21. ISSN 0044-4448.
7. Коваленко Н. А., Шорохова Л. С. Особенности организации туристических маршрутов как одного из методов повышения эффективности использования подвижного состава // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2023. Т. 26. № 3. С. 66–77. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-66-77.

References

1. Dang L., von Arx W. How Can Rail Use for Leisure and Tourism Be Promoted? Using Leisure and Mobility Orientations to Segment Swiss Railway Customers. *Sustainability*. 2021. 13. 5813. DOI: 10.3390/su13115813.
2. Rajani F., Boluk K. A. A Critical Commentary on the SDGs and the Role of Tourism. *Tourism and Hospitality*. 2022. Vol. 3. Issue 4. Pp. 855–860. DOI: 10.3390/tourhosp3040053.
3. Wu C., Zhang N., Xu L. Travelers on the Railway: An Economic Growth Model of the Effects of Railway Transportation Infrastructure on Consumption and Sustainable Economic Growth. *Sustainability*. 2021. 13. 6863. DOI: 10.3390/su13126863.
4. Peira G., Lo Giudice A., Miraglia S. Railway and Tourism: A Systematic Literature Review. *Tourism and Hospitality*. 2022. Vol. 3. Issue 1. Pp. 69–79. DOI: 10.3390/tourhosp3010005.
5. The concept of the federal target program «Development of Domestic and Inbound Tourism in the Russian Federation (2019–2025)»: approved by the Order of the Government of the Russian Federation 05.05.2018 No. 872-r. URL : <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71842336/?ysclid=mf59pn448m763588960>. (In Russian).
6. Pegov D. V. Passenger complex of the holding: events, facts, prospects. *Railway Transport*. 2020. No. 2. Pp. 17–21. ISSN 0044-4448. (In Russian).
7. Kovalenko N. A., Shorokhova L. S. The features of organizing tourist routes as one of the methods to increase the efficiency of rolling stock usage. *Civil Aviation High Technologies*. 2023. Vol. 26. No. 3. Pp. 66–77. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-66-77. (In Russian).

8. Хомич Д. И., Костенко В. В. Технические и технологические требования при организации запуска туристических поездов // Образование — Наука — Производство : материалы VIII Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, Чита, 22 ноября 2024 г. Чита : ЗаБИЖТ, 2024. С. 506–511.
9. Порядок организации туристических перевозок в холдинге «РЖД» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.08.2023 г. № 2105/р. Екатеринбург : УралЮрИздат, 2024. 56 с.
10. О внесении изменений в статью 3–1 Федерального закона «Об основах туристской деятельности в Российской Федерации» и статьи 2 и 3 Федерального закона «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» : Федеральный закон от 28.02.2025 г. № 26-ФЗ. URL: <http://pravo.gov.ru>.
11. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрику вагонов) № 808-2022 ПКБ ЦВ : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников СНГ 08.12.2022 г. (в ред. от 10.06.2024 г.). URL: <https://base.garant.ru/407616662/?ysclid=mf59t4j9vk634274509>.
12. Шинкарук А. С. Совершенствование системы ремонта и технического обслуживания пассажирских вагонов дальнего сообщения // Транспортное машиностроение. 2024. № 5 (29). С. 62–69. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-5-62-69.
13. Об утверждении Положения о планово-предупредительном ремонте моторвагонного подвижного состава открытого акционерного общества «Российские железные дороги» : распоряжение ОАО «РЖД» от 15.01.2024 г. № 60/р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1305815680?ysclid=mf59um1f9f382522996>.
8. Khomich D. I., Kostenko V. V. Technical and technological requirements for organizing the launch of tourist trains. *Education – Science – Production* : proceedings of the 8th All-Russian (with international participant) scientific and practical conference, Chita, November 22, 2024. Chita : Trans-Baikal Institute of Railway Transport, 2024. Pp. 506–511. (In Russian).
9. The order of organization of tourist transportation in the Russian Railways Holding : approved by the Order of JSC «RZD» 18.08.2023 No. 2105/r. Ekaterinburg : UralYurIzdat, 2024. 56 p. (In Russian).
10. On amendments to Article 3-1 of the Federal Law «On the Fundamentals of Tourist Activity in the Russian Federation» and Articles 2 and 3 of the Federal Law «Charter of Railway Transport of the Russian Federation» : Federal Law from 28.02.2025 No. 26-FZ. URL: <http://pravo.gov.ru>. (In Russian).
11. Instruction on maintenance of cars in operation (instruction to the inspector of cars) No. 808-2022 PKB TsV : approved by the Council on Railway Transport of the Commonwealth of Independent States 08.12.2022 (in edition from 10.06.2024). URL: <https://base.garant.ru/407616662/?ysclid=mf59t4j9vk634274509>. (In Russian).
12. Shinkaruk A. S. Improvement of the repair system and maintenance of long-distance passenger cars. *Transport Engineering*. 2024. No. 5 (29). Pp. 62–69. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-5-62-69. (In Russian).
13. On approval of the Regulations on scheduled preventive maintenance of motor-car rolling stock of JSC «Russian Railways» : the Order of JSC «RZD» from 15.01.2024 No. 60/r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1305815680?ysclid=mf59um1f9f382522996>. (In Russian).

Научная статья
УДК 656.259.12

Проблема одноканальности классификаторов состояний рельсовых линий и способы ее решения

Анна Евгеньевна Тарасова¹

¹Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

The single-channel problem of rail line state classifiers and approaches to its solution

Anna Evgenyevna Tarasova¹

¹Volga State Transport University, Samara, Russia

Аннотация

Рассмотрены принципы построения классификаторов состояния рельсовых линий магистральных железных дорог. Проанализированы причины появления «ложной» свободности и «ложной» занятости, снижающих достоверность распознавания поезда на участке контроля и точность фиксации исправности рельсовых линий. Обоснована необходимость применения принципа распределенной инвариантности — пространственной многоканальности, позволяющего компенсировать внешние возмущения и добиться инвариантности. Разработаны математические модели и структурная схема формирования компенсационного канала с учетом условий абсолютной инвариантности Щипанова — Лузина. Предложено использовать виртуальные компенсационные каналы, для того чтобы исключить влияние изменения проводимости изоляции и повысить точность контроля за исправностью рельсовых линий.

Ключевые слова: рельсовая линия, классификатор состояний, рельсовая цепь, безопасность движения, параметрические возмущения, ложная свободность, ложная занятость, пространственная многоканальность, инвариантность

Abstract

The principles of constructing state classifiers for mainline railway track circuits are considered. The causes of «false» clear and «false» occupancy conditions, which reduce the reliability of train detection and rail integrity monitoring, are analyzed. The necessity of applying the principle of distributed invariance — spatial multichanneling, which enables compensation of external disturbances and ensures invariance, is substantiated. Mathematical models and a structural scheme for forming a compensation channel based on the Shchipanov — Luzin absolute invariance conditions have been developed. The use of virtual compensation channels is proposed to eliminate the influence of insulation conductivity variations and to improve the accuracy of rail integrity monitoring.

Keywords: rail line, state classifier, track circuit, traffic safety, parametric disturbances, «false» clear, «false» occupancy, spatial multichanneling, invariance

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-62-65

Классификаторы состояний (КС) рельсовых линий (РЛ) магистральных железных дорог выполняют ответственную функцию, регулируя движение поездов при безусловном обеспечении его безопасности. Согласно классификации иерархии систем и устройств ЖАТ, КС относятся к напольным устройствам СЦБ [1, 2]. Понятие «классификатор» более широкое, чем рельсовые цепи (РЦ), которые являются первичными датчиками состояний рельсовых линий. Несмотря на широкое распространение рельсовых цепей (более 270 тыс. шт.), они имеют существенный недостаток — одноканальность [3]. На рис. 1 представлены наиболее распространенные структурные схемы рельсовых цепей в соответствии с расположением источника и приемников.

Если обозначить выходную функцию $F_{РЦ}$ (см. рис. 1а), то ее смысловая значимость заключается в выполнении следующего логического условия: $F_{РЦ} = 1$ — движение поездов разрешено, $F_{РЦ} = 0$ — движение поездов запрещено.

Функция $F_{РЦ}$ зависит от двух аргументов $F_{РЦ} = f(x_1, x_2)$, где x_1 — контроль свободности участка ($x_1 = 1$ — участок рельсовой линии свободен, $x_1 = 0$ — участок занят); x_2 — контроль неисправности рельсовой линии ($x_2 = 1$ — рельсовые линии исправны, $x_2 = 0$ — рельсовые линии неисправны/излом рельса).

Следовательно, полный набор значений и функций $F_{РЦ}$ (по состоянию) можно представить в табличном виде (табл. 1).

Таблица 1

Соответствие значений и функций $F_{РЦ}$

Номер состояния	x_1	x_2	$F_{РЦ}$
1	1	1	1
2	0	1	0
3	1	0	0
4	0	0	0

Из табл. 1 следует, что движение поезда разрешается, если $x_1 = 1$ (участок свободен) и $x_2 = 1$ (рельсовая линия исправна), при этом $F_{РЦ} = 1$.

Согласно табл. 1, функция $F_{РЦ}$ представляет собой конъюнкцию [4], и соответственно при двух аргументах рельсовая цепь имеет четыре состояния, однако в настоящее время рассматривают лишь три состояния, так как движение запрещается, если путь или занят, или неисправен. Система контроля рельсовой линии, реализованная в виде электрической рельсовой цепи, не позволяет отдельно определять три состояния — свободу, занятость пути или излом рельса.

Вместе с основным сигналом на выходную функцию $F_{РЦ}$ воздействуют помехи или параметрические возмущения, поскольку рельсовая цепь — открытая система, а значит, не имеет внешней защиты от помех и климатических факторов, приводящих к изменению междурельсовой проводимости изоляции. Схема замещения рельсовой линии при внешних воздействиях представлена на рис. 2.

Параметрические возмущения $Z(t)$, действуя на тракт передачи сигнала, как правило, снижают амплитуду сигнала, т.е. приводят к его затуханию, а помехи $\xi(t)$ совпадают по физической природе с полезным сигналом $u_i(t)$ и, следовательно, либо складываются с полезным сигналом, либо вычитаются: $F_i = u_i(t) + \xi(t)$ или $F_j = u_j(t) - \xi(t)$. Первый вид воздействий имеет параметрический, а второй — мультипликативный характер.

В первом случае из-за затухания сигнала вследствие воздействия $Z(t)$ амплитуда сигнала может оказаться недостаточной для срабатывания приемника, и соответственно появляется «ложная» занятость. Во втором случае из-за сложения сигнала и помехи может включиться приемник при занятом поездом участке пути, т.е. появляется «ложная» свобода, либо из-за вычитания помехи из основного сигнала также появляется «ложная» занятость. «Ложная» свобода и «ложная» занятость приводят к ошибкам классификации состояний и нарушению безопасности технологического процесса движения поездов.

Чтобы обеспечить инвариантность классификатора к воздействию возмущений, достоверно распознавать поезд на участке контроля и фиксировать исправность рельсовых линий, необходимо совершенствовать принципы и алгоритмы классификации. При этом наи-

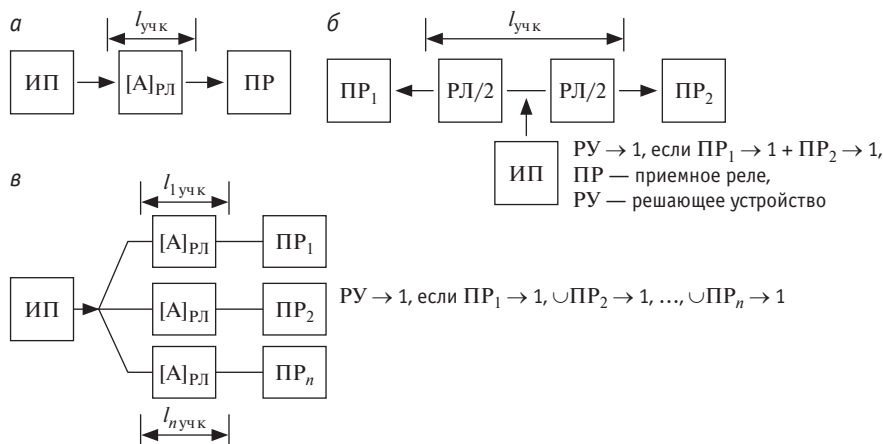


Рис. 1. Обобщенная структурная схема рельсовых цепей:

а — РЦ с одним источником сигнала опроса рельсовой линии (РЛ) и с одним приемником (ПР); б — РЦ с одним источником питания (ИП) и с двумя приемниками; в — РЦ с одним источником питания и с тремя приемниками (ПР₁, ПР₂, ПР₃); РУ — решающее устройство;

$[A]_{РЛ}$ — матрица n -полюсника РЛ; $l_{учк}$ — длина участка контроля;

$l_{1учк}$ — длина первого участка контроля; $l_{nучк}$ — длина n -го участка контроля

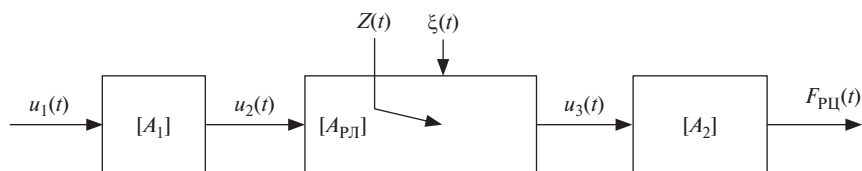


Рис. 2. Трехкомпонентная структурная схема рельсовой цепи:

$[A_1]$, $[A_{РЛ}]$, $[A_2]$ — матрицы коэффициентов многополюсных схем замещения тракта передачи сигнала ($[A_1]$ и $[A_2]$ — компоненты схем замещения аппаратуры согласования и защиты в начале и в конце рельсовой линии соответственно, $[A_{РЛ}]$ — многополюсник рельсовой линии);

$u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ — промежуточные переменные значения сигналов опроса рельсовой линии;

$Z(t)$ — параметрические возмущения, приводящие к изменению первичных параметров рельсовой линии; $\xi(t)$ — помехи, воздействующие на рельсовые линии

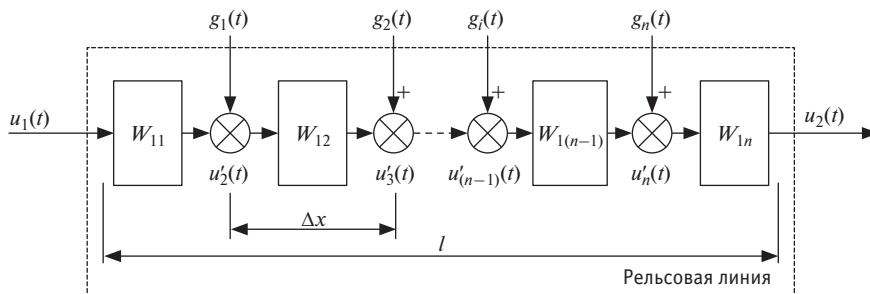


Рис. 3. Каскадно-распределенная схема замещения рельсовой линии:

$u_1(t)$ — сигнал на входе РЛ; $g_i(t)$ — координатные возмущения; $u'_2(t)$ — сигнал на выходе второго каскада, состоящий из $u'_2(t) = u_1(t) + g_1(t)$, $u'_3(t)$, ..., и т.д.; $u_2(t)$ — сигнал на выходе рельсовой

линии (на входе классификатора), $u_2(t) = u_1(t) + \sum_{i=1}^n g_i(t)$

более эффективным способом является использование принципа распределенной инвариантности (в литературе также встречается термин «пространственная многоканальность»).

Для решения задачи реализации условий пространственной (распределен-

ной) инвариантности рельсовая линия с протяженными параметрами $r_0 dx$, $L_0 dx$, $C_0 dx$ и $g_0 dx$ представляется в виде дискретно-распределительной схемы с координатными возмущениями $g_i(t)$ и передаточными функциями W_{1i} замещающими рельсовую линию длиной Δx (рис. 3).

Система дифференциальных уравнений, описывающих координатные возмущения $g_i(t)$, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} a_{11}(D)u_1 + a_{12}(D)u_2' + \dots + a_{1,n-1}(D)u_{n-1}' + a_{1n}(D)u_n' &= g_1(t), \\ a_{21}(D)u_1 + a_{22}(D)u_2' + \dots + a_{2,n-1}(D)u_{n-1}' + a_{2n}(D)u_n' &= g_2(t), \\ \dots &\dots \\ a_{i1}(D)u_1 + a_{i2}(D)u_2' + \dots + a_{i,n-1}(D)u_{n-1}' + a_{in}(D)u_n' &= g_i(t), \\ \dots &\dots \\ a_{n1}(D)u_1 + a_{n2}(D)u_2' + \dots + a_{n,n-1}(D)u_{n-1}' + a_{nn}(D)u_n' &= g_n(t), \end{aligned} \right\} (1)$$

где $a_{ij}(D) = m_{ij}D^2 + n_{ij}D + k_{ij}$; $i, j = 1, \dots, n$; $D = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования [4].

Как видно из системы, каждое уравнение описывает траекторию влияния i -го возмущения $g_i(t)$ на i -й координате.

Известно [5–7], что для достижения инвариантности j -го возмущения на i -й координате необходимо и достаточно равенство минора определителя системы (1), соответствующего элементу A_{ij} матрицы (2):

$$A_{ij} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1,n-1} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2,n-1} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{i,n-1} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{n,n-1} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} \equiv 0. \quad (2)$$

Условие (2) является критерием абсолютной инвариантности Щипанова — Лузина [5–7].

Применительно к классификаторам состояний РЛ реализация условия абсолютной инвариантности предполагает следующее. Для достижения инвариантности выходного сигнала $u_2(t)$ относительно внешнего возмущения $g_i(t)$ необходимо и достаточно, чтобы $W_i(t)$ между точкой приложения воздействия $g_i(t)$ и выходным сигналом $u_2(t)$ (см. рис. 3) равнялось нулю при ограничении, что все остальные возмущения или отсутствуют, или имеют нулевые начальные условия.

Необходимый признак реализации инвариантности формулируется в следующем виде: инвариантность достижима и реализуема, если в схеме между точкой воздействия возмущения $g_i(t)$ и трактом основного сигнала $u_1(t)$ имеется не менее двух каналов передачи возмущающего воздействия [8–10].

Рассмотрим реализацию принципа многоканальности применительно к классификаторам состояний рельсовых линий. Рельсовая линия, будучи чувствительным элементом датчика первичной информации классификатора, имеет распределенную структуру протяженностью 1,5–2,0 км, и на всем протяжении на нее воздействуют параметрические и мультипликативные возмущения. Для компенсации этих возмущений, согласно принципу пространственной многоканальности, необходимо формировать n компенсационных каналов. Описание этих каналов дифференциальными уравнениями приводит к форми-

рованию системы уравнений, представляющих компенсационные каналы относительно выходных переменных u_2 :

$$\begin{cases} u_2^1 = F_1(u_1, g_1, g_2, \dots, g_n), \\ u_2^2 = F_2(u_1, g_1, g_2, \dots, g_n), \\ \dots \\ u_2^n = F_n(u_1, g_1, g_2, \dots, g_n), \end{cases} \quad (3)$$

Из (3) следует, что уравнение состояний выходного напряжения

$$u_2 = F_0(u_2^1, u_2^2, \dots, u_2^n),$$

где g_1, g_2, \dots, g_n — возмущения, воздействующие на звенья чувствительного элемента датчика РЛ; $u_2^1, u_2^2, \dots, u_2^n$ — значения напряжений каждого канала, зависящие от его параметров и внешних воздействий, количество которых равно n .

Система управлений (3) позволяет формировать структурную схему классификатора РЛ, функционирующего в условиях воздействия n возмущений. Рассмотрим такую структуру при воздействии одного возмущающего параметра — проводимости изоляции. Для этого, согласно условию Щипанова — Лузина, необходим один дополнительный канал компенсации (рис. 4).

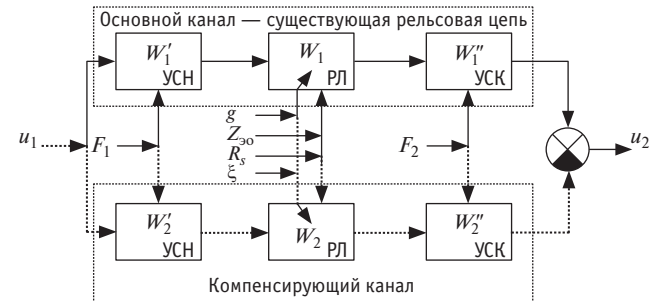


Рис. 4. Структурная схема формирования компенсационного канала:

R_S — поездной шунт; $Z_{ЭО}$ — обрыв рельсовой линии; W_1', W_1, W_1'' — передаточные функции по напряжению основного канала, W_2', W_2, W_2'' — то же компенсационного (виртуального) канала; u_2 — выходной сигнал классификатора

Условием абсолютной инвариантности выходного сигнала u_2 к возмущающему воздействию является равенство нулю W_1, W_2 по отношению к возмущению g , т.е.

$$W_1 \cdot W_1'' - W_2 \cdot W_2'' = 0, \text{ или } W_1 \cdot W_1'' \equiv W_2 \cdot W_2''. \quad (4)$$

Таким образом, если организовать виртуальный частотный канал компенсации возмущений с использованием существующего основного канала — рельсовой цепи, то реализация тождества (4) не вызовет затруднений, и воздействие изменения проводимости изоляции на тракт передачи информации легко компенсируется.

Сведения об авторе:**Анна Евгеньевна Тарасова,**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Приволжского государственного университета путей сообщения

Author's information:**Anna E. Tarasova,**

PhD in Engineering, Associate Professor of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport Department, Volga State Transport University

Литература

1. Тарасов Е. М., Тарасова А. Е. Рельсовые цепи с обучаемыми классификаторами состояний. Самара : Изд-во СамГУПС, 2024. 127 с.
2. Тарасова А. Е. Исследование потенциальных возможностей классификаторов состояний рельсовых линий // Наука и образование транспорту. 2018. № 1. С. 223–226.
3. Обеспечение инвариантности к возмущающим воздействиям в рельсовых линиях / Е. М. Тарасов, Д. В. Железнов, Н. Н. Васин, А. Е. Тарасова // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29. № 2. С. 152–168. DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902.152-168.
4. Принципы инвариантности в измерительной технике / Б. Н. Петров, В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. Москва : Наука, 1976. 243 с.
5. Тарарыкин С. В. Структурно-параметрический синтез инвариантно-робастных систем управления. Иваново : Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2014. 120 с.
6. Азизов А. М. Одноканальный принцип инвариантности в динамике измерительных систем. Санкт-Петербург : Научное издание, 2019. 194 с.
7. Петров Б. Н., Кухтенко А. И. Теория проектирования инвариантных систем // Современные методы проектирования систем автоматического управления. Москва : Машиностроение, 1967. С. 97–118.
8. Сазонов В. В. Принципы инвариантности в преобразовательной технике. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 168 с.
9. Тарасова А. Е. Принципы построения классификатора состояний рельсовых линий, инвариантного к изменению сопротивления рельсовых линий // Вестник СамГУПС. 2020. № 2 (48). С. 82–88. ISSN 2079-6099.
10. Бронников А. М. Внешняя и параметрическая инвариантность выхода адаптивной системы с идентификатором и эталонной моделью // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. Т. 6. № 2. С. 15–23. ISSN 2070-0814.

References

1. Tarasov E. M., Tarasova A. E. Rail circuits with trainable state classifiers. Samara : Publishing House of Samara State Transport University, 2024. 127 p. (In Russian).
2. Tarasova A. E. Investigation of the potential capabilities of rail line state classifiers. *Science and Education for Transport*. 2018. No. 1. Pp. 223–226. (In Russian).
3. Tarasov E. M., Zheleznov D. V., Vasin N. N., Tarasova A. E. Providing Invariance to Disturbing Effects in Rail Lines. *Engineering Technologies and Systems*. 2019. Vol. 29. No. 2. Pp. 152–168. DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902.152-168. (In Russian).
4. Petrov B. N., Viktorov V. A., Lunkin B. V., Sovlukov A. S. Principles of invariance in measuring technology. Moscow : Science, 1976. 243 p. (In Russian).
5. Tararykin S. V. Structural-parametric synthesis of invariant-robust control systems. Ivanovo : Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, 2014. 120 p. (In Russian).
6. Azizov A. M. Single-channel invariance principle in the dynamics of measuring systems. St. Petersburg : High-tech Technologies, 2019. 194 p. (In Russian).
7. Petrov B. N., Kukhtenko A. I. Theory of designing invariant systems. *Modern methods of designing automatic control systems*. Moscow : Machinery, 1967. Pp. 97–118. (In Russian).
8. Sazonov V. V. Principles of invariance in converter technology. Moscow : Energoatomizdat, 1990. 168 p. (In Russian).
9. Tarasova A. E. Principles of constructing a classifier of rail line states that is invariant to changes in the resistance of rail lines. *Vestnik SamGUPS*. 2020. No. 2 (48). Pp. 82–88. ISSN 2079-6099. (In Russian).
10. Bronnikov A. M. External and parametric invariance of the output of an adaptive system with the identifier and reference model. *Information-measuring and Control Systems*. 2008. Vol. 6. No. 2. Pp. 15–23. ISSN 2070-0814. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.073:519.171

Пространственно-временная оптимизация транспортно-логистических процессов промышленных предприятий

Павел Николаевич Мишкuroв¹

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

Spatial-temporal optimization of industrial enterprises transport and logistics processes

Pavel N. Mishkurov¹

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Аннотация

Предложена математическая модель пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий, основанная на формировании пространственно-временного графа с последующей многокритериальной динамической оптимизацией, а также на использовании специализированного графа маршрутизации. Показана возможность повышения эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий на основе оценки траектории пространственно-временного графа и формирования оптимальных последовательностей параллельных технологических операций в различные моменты времени в зависимости от сложившейся эксплуатационной обстановки. Использование разработанной математической модели позволит повысить точность учета пространственно-временных зависимостей транспортно-логистических процессов промышленных предприятий при формировании оптимальных вариантов развития эксплуатационной обстановки в режиме реального времени.

Ключевые слова: транспортно-логистический процесс, промышленное предприятие, пространственно-временная оптимизация, пространственно-временной граф, граф маршрутизации, многокритериальный анализ, динамическая оптимизация

Abstract

A mathematical model of industrial enterprises transport and logistics processes spatio-temporal optimization is proposed, based on the formation of a spatio-temporal graph with subsequent multi-criteria dynamic optimization, as well as on the use of a specialized routing graph. The possibility of increasing the efficiency of industrial enterprises transport and logistics processes is shown based on the assessment of the spatio-temporal graph trajectory and the formation of parallel technological operations optimal sequences at different points in time depending on the current operational situation. The use of the developed mathematical model will improve the accuracy of accounting for spatio-temporal dependencies of industrial enterprises transport and logistics processes when forming optimal options for the development of the operational situation in real time.

Keywords: transport and logistics process, industrial enterprises, spatio-temporal optimization, spatio-temporal graph, routing graph, multi-criteria analysis, dynamic optimization

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-66-73

ВВЕДЕНИЕ

Повышение требований промышленных предприятий к своевременности транспортного обслуживания структурных подразделений и стремление к сокращению транспортно-складских затрат за счет уменьшения размера транспортной партии, наряду с необходимостью соблюдения интересов собственников подвижного состава и руководства транспорта общего пользования, приводит к усложнению структуры грузопотоков и технологии их переработки. Это становится причиной структурного и технологического усложнения транспортно-логистических процессов, а также повышения требований к их эффективности.

Один из основных факторов, которые ограничивают повышение эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий в условиях их структурного и технологического усложнения, — недостаточный уровень согласованности элементов транспортно-логистических систем в режиме реального времени. Кроме того, каждый оперативный руководитель элемента транспортно-логистической системы промышленного предприятия по-разному оценивает интенсивность и силу воздействия на транспортно-логистические процессы факторов внешней и внутренней среды. Принятие неоптимальных решений по оперативному регулированию транспортно-логистических процессов приводит к потерям промышленных предприятий по причине простоев технологических агрегатов, увеличения сверхнормативного времени оборота подвижного состава и транспортно-складских затрат [1]. Значимость принятия в оперативном режиме оптимальных решений по регулированию транспортно-логистических процессов усиливается по мере структурного и технологического усложнения последних [2, 3]. Необходимость реализации системного подхода и оценки множества стохастических факторов при выработке таких решений в режиме реального времени привела к активному поиску способов повышения адаптивности использования методов прогнозирования, оптимизации и анализа транспортно-логистических процессов [4–6].

С другой стороны, совершенствование информационных технологий [7], интенсивное распространение концепций «Ин-

дустрия 4.0» [8] и интернета вещей [9] сформировали предпосылки получения больших объемов динамических достоверных данных о параметрах транспортных систем [10] и использования этих данных для поддержки принятия управленческих решений в режиме реального времени [11]. Размер задач управления увеличивается в результате использования больших объемов оперативных данных [12]. Результаты анализа научной литературы позволили выделить пять групп методов оптимизации, прогнозирования и анализа состояния транспортных систем: методы математического программирования, имитационного моделирования, эвристические методы, аналитические модели и комбинированные (гибридные) методы.

В области математического программирования существует множество одноцелевых и многоцелевых методов решения задач оптимизации, которые нашли широкое применение при оптимизации параметров транспортных потоков [13]. Пространственные и временные зависимости в этих методах учитываются по-разному. Отдельная группа представлена методами теории управления и динамического программирования [14]. Методы динамического программирования учитывают сложные пространственные и временные зависимости. Динамическая оптимизация параметров транспортных потоков на основе использования больших объемов пространственно-временных данных, зарегистрированных в режиме реального времени, приводит к увеличению размера задачи оптимизации. Одним из направлений решения задач большой размерности, в которых нужно учитывать несколько критериев, являются аналитические модели [15]. Например, совершенствуются методы многокритериального анализа для принятия управленческих решений [16]. Точность учета частых взаимодействий и изменений состояния объектов управления — основной фактор, ограничивающий использование этих методов при оперативном регулировании транспортно-логистических процессов. Недостаточная адаптивность методов математического программирования и аналитических моделей к использованию больших объемов данных реального времени ограничивает точность их результатов и является барьером повышения эффективности транспортно-логистических процессов.

Эвристические методы и методы искусственного интеллекта выделены в отдельную группу: они используются для решения задач большой размерности в течение заданного времени и с необходимой точностью [17]. Развитие подходов к повышению точности и оперативности мониторинга местоположения отдельных элементов грузопотоков, совершенствование технологий искусственного интеллекта на основе разработки новых адаптированных алгоритмов и способов формирования нейронных сетей служат основными направлениями при решении задач оптимизации параметров транспортно-логистических процессов в режиме реального времени [18].

Имитационное моделирование является альтернативным методом получения прогнозов по развитию эксплуатационной обстановки в транспортных системах [19] и применяется в основном для обоснования проектных решений или для принятия решений на стратегическом уровне управления [20]. Основные ограничения использования этого метода — сложность детального описания реальных систем, значительные за-

траты времени на построение и проверку адекватности модели [13]. Актуальность проблемы недостаточной адекватности и большой трудоемкости создания детализированных имитационных моделей в настоящее время снижается в результате интенсивного развития инструментов визуального построения таких моделей с использованием проблемно-ориентированных библиотек стандартных объектов моделирования.

Метаэвристические стратегии, помимо перечисленных точных методов, также используются для выбора оптимального решения на основе прогнозных сценариев [21]. В результате усложнения топологии пространства и последовательностей возможных решений, а также структуры оптимизируемой системы вычислительная эффективность метаэвристических алгоритмов снижается [22].

Тенденция исследований в области оптимального прогнозирования транспортно-логистических процессов — обособление эффективности комбинирования перечисленных методов. Результатом таких исследований являются, например, комбинирование методов одноцелевой или многоцелевой оптимизации и имитационного моделирования, гибридные многокритериальные модели, гибридные нейронные сети и структуры их глубокого обучения [23].

Отдельную группу составляют методы теории графов. Теория графов — интенсивно развивающийся раздел математики, который используется для решения различного круга прикладных задач, в том числе выделенными методами оптимизации, прогнозирования и анализа транспортно-логистических процессов [24]. Методы теории графов позволяют формировать сети взаимодействия объектов управления, сложные топологии пространства и множества возможных решений на основе формализации пространственных или временных данных в виде графов и их последующей оптимизации [23].

В транспортно-логистических системах структура топологии пространства динамически зависит как от параметров грузопотоков [25], так и от отдельных элементов этих потоков. Использование традиционных методов описания пространства сложной топологии с помощью графов имеет ограничения. Это связано с двумя основными факторами — особенностями топологии переработки грузопотоков и изменчивостью параметров транспортно-технологических процессов. Сложная и специфическая топология переработки грузопотоков на промышленных предприятиях требует использования дополнительных ограничений в процессе решения задач оптимизации на графах [26]. Альтернативное решение — создание специализированных пространственных графов путем различных преобразований исходных графов [27]. Проблема повышения точности прогнозирования транспортно-логистических процессов на основе разработки методов оптимизации структуры графов до недавнего времени рассматривалась в дискретной постановке. Результатом такого подхода стала многомерная структура графов, используемых для описания сложных транспортно-логистических систем [28].

Большинство известных алгоритмов прогнозирования транспортно-логистических процессов основаны на эвристических и метаэвристических методах [29]. Эти алгоритмы характеризуются недостаточной точностью прогнозирования состояния сложных динамических транспортно-логистических процессов [29].

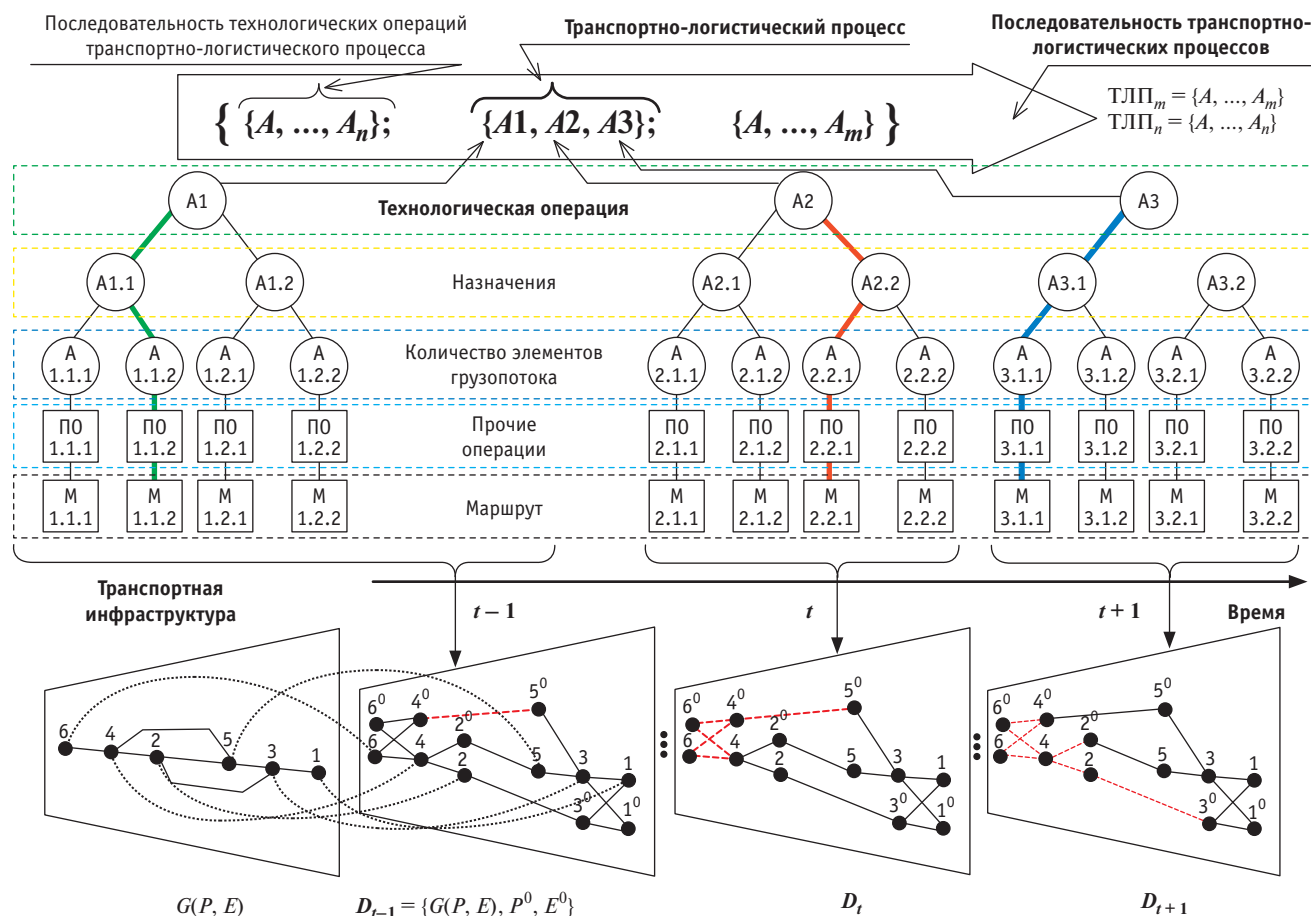


Рис. 1. Схема пространственно-временных зависимостей транспортно-логистических процессов промышленного предприятия

Использование комбинированных пространственно-временных графов потенциально позволяет создавать более точные и вычислительно эффективные методы описания и прогнозирования транспортно-логистических процессов [24, 30].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Управляющий элемент транспортно-логистической системы обеспечивает согласование транспортно-логистических процессов на основе реализации ключевых функций управления. Управленческие решения, реализация которых предполагает использование инфраструктуры, формирование заявок и графиков транспортного обслуживания структурных подразделений, изменение структуры грузопотоков, ресурсное обеспечение, соблюдение требований участников транспортно-логистических процессов, являются способом воздействия на такие процессы. К основным задачам управляющего элемента относятся оценка представленных индикаторов эксплуатационной обстановки и формирование по ее результатам решений, нацеленных на прогнозирование транспортно-логистических процессов в режиме реального времени.

Многовариантность отдельного транспортно-логистического процесса, а также их последовательности является объективной причиной сокращения оптимизируемого пространства. Вариант отдельного транспортно-логистического процесса зависит от последовательности технологических операций, их порядка и продолжительности (например, маневровый полурейс, закрепление или снятие закрепления вагонов), от количества элементов и их местоположения в структуре грузопотока, от маршрута и определяется по результатам оптимизации на специализированном графе [27]. Выбор варианта последовательности транспортно-логистических процессов сопровождается сложными пространственно-временными зависимостями, а также различными изменениями занятости инфраструктуры, времени начала и окончания выполнения транспортно-логистических процессов, качества транспортного обслуживания, количества элементов грузопотоков (рис. 1).

Для комплексного учета представленных пространственно-временных зависимостей при формировании вариантов последовательностей транспортно-логистических процессов предлагается использовать пространственно-временной граф. Вершинами графа отображается занятость элементов инфраструктуры при выполнении технологических операций транспортно-логистических процессов в различ-

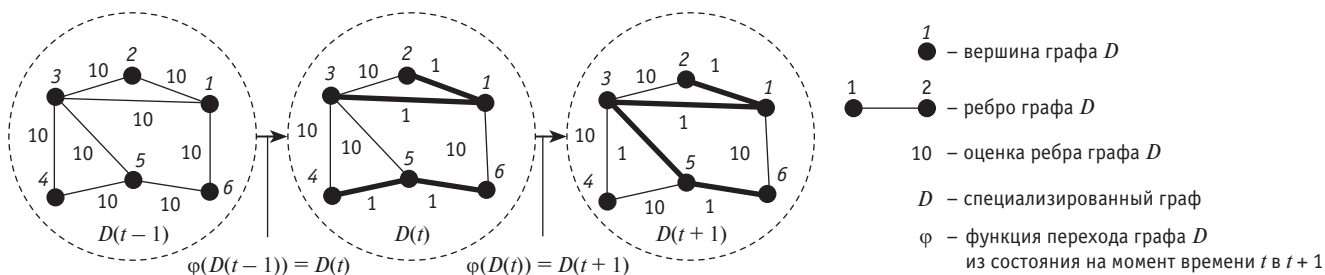
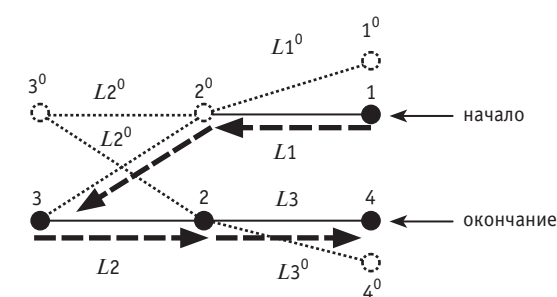


Рис. 2. Схема перехода между состояниями специализированного графа



$R1 = \{1; 2^0; 3; 2; 4\}$ — реальный маршрут

$$L_{1,4} = L1 + 2 * L2 + L3$$

$R2 = R1 = \{1; 2^0; 3; 2; 4\}$ — оптимальный маршрут №1

$$L_{1,4} = L1 + 2 * L2 + L3$$

$R3 = \{1; 2^0; 3^0\}$ — оптимальный маршрут №2, $L_{1,4} = L1 + L2$

$R4 = \{1; 2^0; 3; 2; 4^0\}$ — оптимальный маршрут №3, $L_{1,4} = L1 + 2 * L2 + L3$

Данные оптимальных маршрутов

P_i	$P_{\lambda i}$	$L_{\lambda i}, i$
1^0	0	0
1	0	0
2	3	$L1 + 2 * L2$
2^0	1	$L1$
3	2^0	$L1 + L2$
3^0	2^0	$L1 + L2$
4	2	$L1 + 2 * L2 + L3$
4^0	2	$L1 + 2 * L2 + L3$

Данные графа

P_i	P_j	L_{ij}
1	2^0	$L1$
2^0	1	$L1$
1^0	2^0	$L1$
2^0	1^0	$L1$
3^0	2^0	$L2$
2^0	3^0	$L2$
2^0	3	$L2$
3	2^0	$L2$
3^0	2	$L2$
2	3^0	$L2$
3	2	$L2$
2	3	$L2$
2	4^0	$L3$
4^0	2	$L3$
2	4	$L3$
4	2	$L3$

Рис. 3. Двухвершинный граф с раздельными биективными вершинами и ребрами

ные моменты времени, ребрами — переходы от одного момента времени к другому. Формализация сценариев изменения эксплуатационной обстановки в различные моменты времени в виде пространственно-временного графа позволяет определить траекторию регулирования транспортно-логистических процессов на основе использования методов оптимизации на графах.

Решение задачи пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий заключается в сокращении оптимизируемого пространства путем представления его в виде пространственно-временного графа. Пространственно-временной граф STG описывает последовательность неориентированных, не имеющих петель специализированных графов D . $STG = \{D_{nm}(t), \Phi\}$ есть пространственно-временной граф, где $D_{nm}(t)$ — множество структур графа D в различные моменты времени t ; n — количество вариантов структуры графа D на момент времени t ; m — количество уровней состояния графа D в периоде планирования $[0, T]$. $\Phi = \{\Phi_m^n\}$ — множество переходов между состояниями графа D от момента времени t в момент времени $t + 1$. Переход между состояниями графа осуществляется графовыми операциями $\phi(D(t)) = D(t + 1)$ (рис. 2).

Основная идея специализированного графа D заключается в построении неориентированного, не имеющего петель двухвершинного графа со множеством биективных отображений (дубликатов) вершин и ребер [27]. Пусть $D(G(P, L), P^0, L^0)$ — неориентированный и не имеющий петель двухвершинный граф с раздельными биективными отображениями вершин и ребер графа $G = \{P, L\}$, где $P = \{p_i | i = 1, \dots, h\}$ — множество вершин графа G (h — количество вершин); $P^0 = \{p_i^0 | i = 1, \dots, h^0\}$ — множество биективных отображений вершин графа G (количество биективных вершин $h^0 = h$); $L = \{l_{ij} | i, j\}$ — множество ребер графа G (l_{ij} — ребро, ограниченное вершинами p_i и p_j); $L^0 = \{l_{ij}^0 | i, j\}$ — множество биективных отображений ребер l_{ij} графа G (l_{ij}^0 — ребро графа D , ограниченное вершинами p_i^0 и p_j^0 или p_i^0 и p_j^0).

Разработанный специализированный граф D позволяет находить кратчайшие пути с дополнительным ограничением на углы между ребрами при использовании любых известных методов без необходимости выполнения промежуточных преобразований в процессе оптимизации [27]. Применительно к технологии работы железнодорожного транспорта предлагаемый граф помогает рассчитывать оптимальные маневровые маршруты, состоящие из нескольких полурейсов (рис. 3).

Последовательность изменения состояния графа D в различные моменты времени называется траекторией пространственно-временного графа STG и задана отображением $S = \{\varphi(D(0)), \varphi(D(t-1)), \varphi(D(t)), \varphi(D(t+1))\}$ (рис. 4). Функция перехода φ определяет занятость элементов транспортной инфраструктуры отдельными технологическими операциями транспортно-логистических процессов в различные моменты времени t . Траектория пространственно-временного графа STG определяется на основе многокритериальной динамической оптимизации пространственно-временного графа.

Задача многокритериальной динамической оптимизации транспортно-логистических процессов формулируется следующим образом. Пусть $STG = \{D_{nm}(t), \Phi\}$ есть пространственно-временной граф. Отображения $d_{ij}(t)$ и $d_i(t)$ называются резервом пропускной способности каждого ребра l_{ij} и перерабатывающей способностью каждой вершины p_i на момент времени t , $d_{ij}(t), d_i(t) \in R^+$, т.е. определены на множестве действительных неотрицательных чисел. Тогда $D = \{G(P, L), P^0, L^0\}$ есть транспортная сеть. Отображение $f_{ij}(t)$ называется грузопотоком в ребре l_{ij} графа $D_{nm}(t)$ из начальной вершины p_i в конечную вершину p_j и в ребре l_{ij}^0 из начальной вершины p_i^0 в конечную вершину p_j или p_j^0 . $F_{ij} = \{f_{ij}(t) | i = [1, h], j = [1, h]\}$ есть множество элементов грузопотока, где $f_{ij}(t)$ — количество элементов грузопотока на момент времени t , определенных на множестве действительных неотрицательных чисел $f_{ij}(t) \in R^+$.

Пусть количество элементов грузопотока f_{ij} и моменты времени начала и окончания их движения имеют случайный разброс, тогда количество элементов будет равно $f_{ij}(t \pm \Delta t) \pm \lambda_i(t \pm \Delta t)$, где λ_i и Δt — случайные величины. Если выполняется одно из условий $\lambda_i > 0$, $\Delta t > 0$, наблюдаются несвоевременное транспортное обслуживание производства, отклонение плановых показателей взаимодействия с собственниками подвижного состава и транспортом общего пользования, а также нерациональное использование транспортной инфраструктуры необщего пользования, усложнение переработки элементов грузопотока.

В задаче многокритериальной динамической оптимизации транспортно-логистических процессов требуется найти вариант траектории S пространственно-временного графа STG при оптимальной структуре грузопотоков с учетом интересов производства, собственников подвижного состава, транспорта общего пользования и владельцев инфраструктуры. Целевая функция этой задачи имеет вид

$$S = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \varphi_{nm} \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\varphi_{nm} = k_{\Pi} \cdot J_{\Pi} + k_C \cdot J_C + k_{\text{ТОП}} \cdot J_{\text{ТОП}} + k_{\text{ТНП}} \cdot J_{\text{ТНП}}, \quad (2)$$

где N — количество вариантов структуры графа D на момент времени t ; M — количество уровней состояния графа D в периоде планирования $[0, T]$; $k_{\Pi}, k_C, k_{\text{ТОП}}, k_{\text{ТНП}}$ — коэффициенты значимости (приоритетности) групп критериев эффективности транспортно-логистических процессов; $J_{\Pi}, J_C, J_{\text{ТОП}}, J_{\text{ТНП}}$ — интегральные критерии эффективности соот-

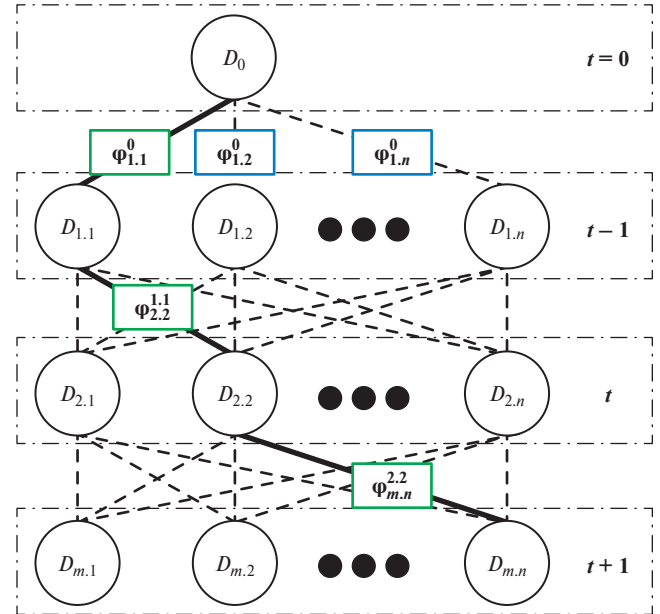


Рис. 4. Схема пространственно-временного графа:

S — траектория пространственно-временного графа $S = \{\varphi_{1,1}^0, \varphi_{2,2}^{1,1}, \varphi_{m,n}^{2,2}\}$; n — количество вариантов структуры графа D на момент времени t ; m — количество уровней состояния графа D в периоде планирования $[0, T]$; φ — функция перехода между состояниями графа D с момента времени t в момент времени $t+1$

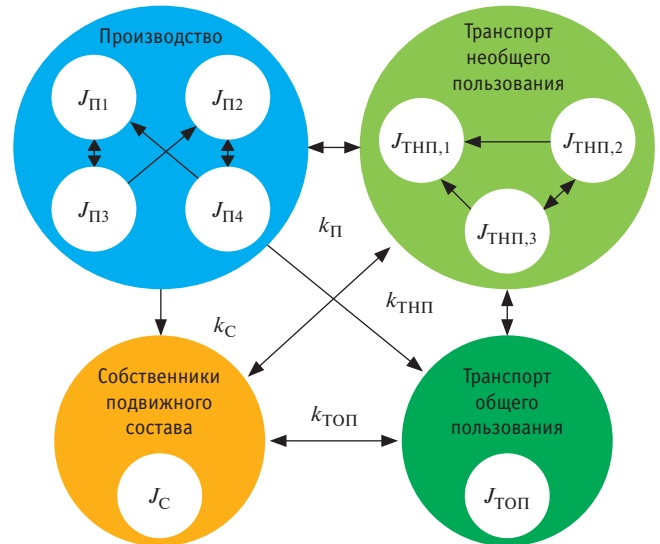


Рис. 5. Схема групповой оценки критериев эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий

ветственно производства, собственников подвижного состава, транспорта общего пользования, собственников инфраструктуры (рис. 5).

Для определения коэффициентов значимости критериев эффективности транспортно-логистических процессов применяются МСДМ-методы [16]. В работе [31] обоснована необходимость использования групповых методов многокритери-

ального анализа при оценке критериев эффективности функционирования элементов транспортно-логистических систем.

На целевую функцию (1) накладываются следующие ограничения: уравнение динамики изменения массы грузопотока $f_{ij}(t+1) = f_{ij}(t) + y_i(t+1) - y_i(t)$; начальное и конечное условия задачи $f_{ij}(0) = 0$; $y_i(0) = 0$; условия неотрицательности переменных $f_{ij}(t) \geq 0$, $i \neq j$, $y_i(t) \geq 0$; ограничения на наличие резервов пропускной способности $0 \leq f_{ij}(t) \leq d_{ij}(t)$, $0 \leq f_{ij}(t) \leq d_i(t)$.

Результатом решения предложенной математической модели пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов является последовательность параллельных технологических операций в зависимости от сложившейся эксплуатационной обстановки на основе оценки траектории пространственно-временного графа STG . Последовательность параллельных технологических операций транспортно-логистических процессов в различные моменты времени отображается как список $\{\{TO(t-1)\}, \{TO(t)\}, \{TO(t+1)\}\}$. Отдельная технологическая операция записывается как $(TO; f_{ij}; (l_{ij}, \dots, l_{ij}^0) \in D; t)$ и обозначает технологическую операцию (ТО), которая сопровождается занятостью ребер l графа D в момент времени t грузопотоком f_{ij} . В свою очередь, отдельный транспортно-логистический процесс (ТЛП) отображается как последовательность технологических операций $ТЛП = \{TO_1, \dots, TO_k\}$, где k — количество технологических операций в различные моменты времени.

Например, транспортно-логистический процесс по формированию вагонов на грузовой внутризаводской железнодорожной станции характеризуется последовательностью маневровых и прочих операций. Каждый транспортно-логистический процесс имеет время своего начала и завершения, что позволяет отслеживать траекторию STG . Переходы

ф определяют траекторию STG в виде последовательности занятых ребер графа D , оценки которых меняются в зависимости от технологических операций параллельных транспортно-логистических процессов. Это позволяет учитывать пространственно-временные зависимости между транспортно-логистическими процессами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена математическая модель пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий, основанная на формировании пространственно-временного графа с последующей многокритериальной динамической оптимизацией, а также на использовании специализированного графа маршрутизации. Теоретически показана возможность повышения эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий на основе оценки траектории пространственно-временного графа и формирования оптимальных последовательностей параллельных технологических операций в различные моменты времени в зависимости от сложившейся эксплуатационной обстановки. Разработанную математическую модель пространственно-временной оптимизации предлагается использовать для оперативной оценки эксплуатационной обстановки с последующим согласованным оптимальным прогнозированием транспортно-логистических процессов промышленных предприятий в режиме реального времени. Дальнейшим направлением развития пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов станет исследование методов сокращения оптимизируемого пространства на основе формирования пространственно-временных нейронных сетей.

Сведения об авторе:

Павел Николаевич Мишкuroв,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова

Author's information:

Pavel N. Mishkurov,

PhD in Engineering, Associate Professor of Logistics and Transport Systems Management Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University

Литература

1. Багинова В. В., Рахмангулов А. Н., Мишкuroв П. Н. Методика оценки организационной структуры оперативного управления вагонопотоками на путях необщего пользования // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 2. С. 19–22. ISSN 0236-1914.
2. Рахмангулов А. Н., Корнилов С. Н., Кольга А. Д. Обеспечение своевременности грузовых перевозок в транспортно-технологических системах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. Т. 45. № 1. С. 115–121. ISSN 1995-2732.
3. Проблематика функционирования транспортных узлов в России и за рубежом / Е. Н. Тимухина, Н. В. Кашеева, Н. Е. Окулов, В. В. Лесных // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 3 (93). С. 65–72. ISSN 1997-0722.
4. Козлов П. А. Оптимизация развития транспортных узлов и полигонов на основе имитационного моделирования // Бюл-

References

1. Baginova V. V., Rakhmangulov A. N., Mishkurov P. N. Technique of assessing the organizational structure of on-line traffic control on the railways belonging to industrial enterprises. *Transport: science, equipment, management*. 2012. No. 2. Pp. 19–22. ISSN 0236-1914. (In Russian).
2. Rakhmangulov A. N., Kornilov S. N., Kolga A. D. Ensuring the timeliness of freight transportation in transport and technological systems. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2014. Vol. 45. No. 1. Pp. 115–121. ISSN 1995-2732. (In Russian).
3. Timukhina E. N., Kashcheeva N. V., Okulov N. E., Lesnykh V. V. Problems of functioning of transport hubs in Russia and abroad. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2022. No. 3 (93). Pp. 65–72. ISSN 1997-0722. (In Russian).
4. Kozlov P. A. Development optimization of transport hubs and polygons based on simulation modeling. *Bulletin of the Aca-*

летень ученого совета АО «ИЭРТ». 2023. № 8-2. С. 30–40. ISSN 2500-3283.

5. Сирина Н. Ф., Сисин В. А., Сисина О. А. Реализация оптимизационно-прогностической имитационной модели процесса реагирования организационной структуры железнодорожного транспорта на акты незаконного вмешательства и иные чрезвычайные ситуации // Вестник УрГУПС. 2022. № 4 (56). С. 83–93. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-4-83-93.
6. Бородин А. Ф., Шиндеров Р. В., Строченков Р. Г. Использование ресурсов железнодорожной сети: результативность планирования и управления // Транспорт Урала. 2024. № 3 (82). С. 3–10. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-3-3-10.
7. Rakhmangulov A., Stądkowski A., Osintsev N. Design of an ITS for Industrial Enterprises // *Intelligent Transportation Systems — Problems and Perspectives*. Cham : Springer International Publishing, 2016. Pp. 161–215. DOI: 10.1007/978-3-319-19150-8_6.
8. Industry 4.0 Technologies Applied to the Rail Transportation Industry: A Systematic Review / C. Laiton-Bonadiez, J. W. Branch-Bedoya, J. Zapata-Cortes [et al.] // *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 7. P. 2491. DOI: 10.3390/s22072491.
9. An Overview of Current Challenges and Emerging Technologies to Facilitate Increased Energy Efficiency, Safety, and Sustainability of Railway Transport / Z. Kljaić, D. Pavković, M. Cipek [et al.] // *Future Internet*. 2023. Vol. 15. No. 11. P. 347. DOI: 10.3390/fi15110347.
10. Spatio-temporal Graph Neural Networks for Predictive Learning in Urban Computing: A Survey / G. Jin, Y. Liang, Y. Fang [et al.] // *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2023. Vol. 36. No. 10. Pp. 5388–5408. DOI: 10.48550/arXiv.2303.14483.
11. Рахмангулов А. Н., Копылова О. А. Обзор методов и алгоритмов Big Data для решения задач прогнозирования параметров транспортных потоков и проектирования транспортно-логистических систем // Недропользование и транспортные системы. 2024. Т. 14. № 2. С. 4–13. DOI: 10.18503/SMTS-2024-14-2-4-13.
12. Anda C., Erath A., Fourie P. J. Transport Modelling in the Age of Big Data // *International Journal of Urban Sciences*. 2017. Vol. 21. Pp. 19–42. DOI: 10.1080/12265934.2017.1281150.
13. Van Nes R., De Jong G. Transport models // *Advances in Transport Policy and Planning*. 2020. Vol. 6. Pp. 101–128. DOI: 10.1016/bs.atpp.2020.08.001.
14. Jain S. K., Singh V. P. Chapter 5 — Systems Analysis Techniques // *Water Resources Systems Planning and Management*. Amsterdam : Elsevier, 2024. Pp. 279–348. DOI: 10.1016/B978-0-12-821349-0.00004-6.
15. Analytical Model for Information Flow Management in Intelligent Transport Systems / A. Terentyev, A. Marusin, S. Evtyukov [et al.] // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. No. 15. P. 3371. DOI: 10.3390/math11153371.
16. Осинцев Н. А. Многокритериальные методы принятия решений в «зеленой» логистике // Мир транспорта. 2021. № 5 (96). С. 105–114. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.
17. Ali M. Discrete Choice Models and Artificial Intelligence Techniques for Predicting the Determinants of Transport Mode Choice — A Systematic Review // *Computers, Materials & Continua*. 2024. Vol. 81. No. 2. Pp. 2161–2194. DOI: 10.32604/cmc.2024.058888.
18. Интеллектуализация управления мультиагентным взаимодействием при организации грузовых перевозок в припортовых транспортных системах / О. Н. Числов, Э. А. Мамаев, М. В. Колесников [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки.

demic Board of IEDT JSC. 2023. No. 8-2. Pp. 30–40. ISSN 2500-3283. (In Russian).

5. Sirina N. F., Sisin V. A., Sisina O. A. Implementation of optimization-predictive simulation model of response of the railway transport organizational structure to acts of unlawful interference and other emergency situations. *Herald of the USURT*. 2022. No. 4 (56). Pp. 83–93. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-4-83-93. (In Russian).
6. Borodin A. F., Shinderov R. V., Strochenkov R. G. Use of railway network resources: productivity of planning and operation. *Transport of the Urals*. 2024. No. 3 (82). Pp. 3–10. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-3-3-10. (In Russian).
7. Rakhmangulov A., Stądkowski A., Osintsev N. Design of an ITS for Industrial Enterprises. *Intelligent Transportation Systems — Problems and Perspectives*. Cham : Springer International Publishing, 2016. Pp. 161–215. DOI: 10.1007/978-3-319-19150-8_6.
8. Laiton-Bonadiez C., Branch-Bedoya J. W., Zapata-Cortes J. [et al.]. Industry 4.0 Technologies Applied to the Rail Transportation Industry: A Systematic Review. *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 7. P. 2491. DOI: 10.3390/s22072491.
9. Kljaić Z., Pavković D., Cipek M. [et al.]. An Overview of Current Challenges and Emerging Technologies to Facilitate Increased Energy Efficiency, Safety, and Sustainability of Railway Transport. *Future Internet*. 2023. Vol. 15. No. 11. P. 347. DOI: 10.3390/fi15110347.
10. Jin G., Liang Y., Fang Y. [et al.]. Spatio-temporal Graph Neural Networks for Predictive Learning in Urban Computing: A Survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2023. Vol. 36. No. 10. Pp. 5388–5408. DOI: 10.48550/arXiv.2303.14483.
11. Rakhmangulov A. N., Kopylova O. A. Overview of Big Data Methods and Algorithms for Solving Problems of Forecasting Traffic Flow Parameters and Designing Transportation and Logistics Systems. *Subsurface Management and Transportation Systems*. 2024. Vol. 14. No. 2. Pp. 4–13. DOI: 10.18503/SMTS-2024-14-2-4-13. (In Russian).
12. Anda C., Erath A., Fourie P. J. Transport Modelling in the Age of Big Data. *International Journal of Urban Sciences*. 2017. Vol. 21. Pp. 19–42. DOI: 10.1080/12265934.2017.1281150.
13. Van Nes R., De Jong G. Transport models. *Advances in Transport Policy and Planning*. 2020. Vol. 6. Pp. 101–128. DOI: 10.1016/bs.atpp.2020.08.001.
14. Jain S. K., Singh V. P. Chapter 5 — Systems Analysis Techniques. *Water Resources Systems Planning and Management*. Amsterdam : Elsevier, 2024. Pp. 279–348. DOI: 10.1016/B978-0-12-821349-0.00004-6.
15. Terentyev A., Marusin A., Evtyukov S. [et al.]. Analytical Model for Information Flow Management in Intelligent Transport Systems. *Mathematics*. 2023. Vol. 11. No. 15. P. 3371. DOI: 10.3390/math11153371.
16. Osintsev N. A. Multi-criteria decision-making methods in green logistics. *World of Transport and Transportation*. 2021. No. 5 (96). Pp. 105–114. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13. (In Russian).
17. Ali M. Discrete Choice Models and Artificial Intelligence Techniques for Predicting the Determinants of Transport Mode Choice — A Systematic Review. *Computers, Materials & Continua*. 2024. Vol. 81. No. 2. Pp. 2161–2194. DOI: 10.32604/cmc.2024.058888.
18. Chislov O. N., Mamaev E. A., Kolesnikov M. V. [et al.]. Intellectualization of multi-agent interaction control during the freight traffic organization in portside transport system. *Izvestiya*

2021. № 7 (224). С. 119–129. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-7-119-129.
19. Pouryousef H., Lautala P., White T. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe // *Journal of Modern Transportation*. 2015. 23 (1). Pp. 30–42. DOI: 10.1007/s40534-015-0069-z.
 20. Хашев А. И., Мамаев Э. А., Гуда А. Н. Комбинированное имитационно-аналитическое моделирование в транспортно-логистических системах // *Вестник РГУПС*. 2022. № 1 (85). С. 117–125. DOI: 10.46973/0201-727X_2022_1_117.
 21. Bueno-Ferrer Á., De Pablo Valenciano J., De Burgos Jiménez J. Unveiling the Potential of Metaheuristics in Transportation: A Path Towards Efficiency, Optimization, and Intelligent Management // *Infrastructures*. 2025. No. 1 (10). P. 4. DOI: 10.3390/infrastructures10010004.
 22. Colombaroni C., Fusco G., Isaenko N. Meta-Heuristic Aggregate Calibration of Transport Models Exploiting Data Collected in Mobility // *Case Studies on Transport Policy*. 2023. No. 13. P. 101039. DOI: 10.1016/j.cstp.2023.101039.
 23. Cheramangalath U., Nasre R., Srikant Y. N. Distributed Graph Analytics: Programming, Languages, and Their Compilation. Cham : Springer International Publishing, 2020. 207 p.
 24. Zhao S., Xing S., Mao G. An Attention and Wavelet Based Spatial-Temporal Graph Neural Network for Traffic Flow and Speed Prediction // *Mathematics*. 2022. Vol. 10. No. 19. P. 3507. DOI: 10.3390/math10193507.
 25. Dynamic Optimization of Railcar Traffic Volumes at Railway Nodes / A. Rakhmangulov, A. Stadkowski, N. Osintsev [et al.] // *Rail Transport — Systems Approach*. Cham : Springer International Publishing, 2017. Pp. 405–456. DOI: 10.1007/978-3-319-51502-1_10.
 26. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкuroв, Д. В. Александрин // *Вестник УрГУПС*. 2022. № 3 (55). С. 43–59. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59.
 27. Мишкuroв П. Н., Рахмангулов А. Н., Фридрихсон О. В. Методика формирования транспортной сети железнодорожной станции // *Вестник УрГУПС*. 2021. № 3 (51). С. 50–64. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-3-50-64.
 28. Rakhmangulov A., Osintsev N., Mishkurov P. Spatio-Temporal Graphs in Transportation: Challenges, Optimization, and Prospects // *Systems*. 2025. Vol. 13. No. 4. P. 263. DOI: 10.3390/systems13040263.
 29. Murrar S., Alhaj F. M., Qutqut M. Machine Learning Algorithms for Transportation Mode Prediction: A Comparative Analysis // *Informatica*. 2024. Vol. 48. No. 6. Pp. 117–130. DOI: 10.31449/inf.v48i6.5234.
 30. Cui J.-X., Yao J., Zhao B.-Y. Review on short-term traffic flow prediction methods based on deep learning // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2024. Vol. 24. No. 2. Pp. 50–64. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.02.003.
 31. Концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкuroв [и др.] // *Вестник РГУПС*. 2024. № 1 (93). С. 90–104. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_1_90.
 - SFedU. Engineering Sciences*. 2021. No. 7 (224). Pp. 119–129. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-7-119-129. (In Russian).
 19. Pouryousef H., Lautala P., White T. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*. 2015. 23 (1). Pp. 30–42. DOI: 10.1007/s40534-015-0069-z.
 20. Khashev A. I., Mamaev E. A., Guda A. N. The combined simulation and analytical modeling in transport and logistics systems. *Vestnik RGUPS*. 2022. No. 1 (85). Pp. 117–125. DOI: 10.46973/0201-727X_2022_1_117. (In Russian).
 21. Bueno-Ferrer Á., De Pablo Valenciano J., De Burgos Jiménez J. Unveiling the Potential of Metaheuristics in Transportation: A Path Towards Efficiency, Optimization, and Intelligent Management. *Infrastructures*. 2025. No. 1 (10). P. 4. DOI: 10.3390/infrastructures10010004.
 22. Colombaroni C., Fusco G., Isaenko N. Meta-Heuristic Aggregate Calibration of Transport Models Exploiting Data Collected in Mobility. *Case Studies on Transport Policy*. 2023. No. 13. P. 101039. DOI: 10.1016/j.cstp.2023.101039.
 23. Cheramangalath U., Nasre R., Srikant Y. N. Distributed Graph Analytics: Programming, Languages, and Their Compilation. Cham : Springer International Publishing, 2020. 207 p.
 24. Zhao S., Xing S., Mao G. An Attention and Wavelet Based Spatial-Temporal Graph Neural Network for Traffic Flow and Speed Prediction. *Mathematics*. 2022. Vol. 10. No. 19. P. 3507. DOI: 10.3390/math10193507.
 25. Rakhmangulov A., Stadkowski A., Osintsev N. [et al.]. Dynamic Optimization of Railcar Traffic Volumes at Railway Nodes. *Rail Transport — Systems Approach*. Cham : Springer International Publishing, 2017. Pp. 405–456. DOI: 10.1007/978-3-319-51502-1_10.
 26. Rakhmangulov A. N., Kornilov S. N., Mishkurov P. N., Alexandrin D. V. Simulation models in digital twins of railway junctions. *Herald of the USURT*. 2022. No. 3 (55). Pp. 43–59. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59. (In Russian).
 27. Mishkurov P. N., Rakhmangulov A. N., Friedrichson O. V. Methodology of forming the transport network of a railway station. *Herald of the USURT*. 2021. No. 3 (51). Pp. 50–64. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-3-50-64. (In Russian).
 28. Rakhmangulov A., Osintsev N., Mishkurov P. Spatio-Temporal Graphs in Transportation: Challenges, Optimization, and Prospects. *Systems*. 2025. Vol. 13. No. 4. P. 263. DOI: 10.3390/systems13040263.
 29. Murrar S., Alhaj F. M., Qutqut M. Machine Learning Algorithms for Transportation Mode Prediction: A Comparative Analysis. *Informatica*. 2024. Vol. 48. No. 6. Pp. 117–130. DOI: 10.31449/inf.v48i6.5234.
 30. Cui J.-X., Yao J., Zhao B.-Y. Review on short-term traffic flow prediction methods based on deep learning. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2024. Vol. 24. No. 2. Pp. 50–64. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.02.003.
 31. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N., Mishkurov P. N. [et al.]. The concept of hybrid multicriteria model of sustainable supply chain. *Vestnik RGUPS*. 2024. No. 1 (93). Pp. 90–104. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_1_90. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.132

Моделирование перехода процесса перевозок пассажиров автомобильным транспортом к работе в условиях брутто-контракта

Николай Николаевич Якунин¹, Кристина Алексеевна Паршакова¹,
Виталий Валерьевич Котов¹, Евгений Викторович Фёклин²

¹Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

²АО «Межгородтранс», Саратов, Россия

Modeling of the process of passenger transportation by road transport to work under a gross contract

Nikolay N. Yakunin¹, Kristina A. Parshakova¹, Vitaliy V. Kotov¹, Evgeniy V. Fyoklin²

¹Orenburg State University, Orenburg, Russia

²Mezhhgorodtrans JSC, Saratov, Russia

Аннотация

Городские пассажирские автомобильные перевозки претерпевают большие изменения. Государство, как основной бенефициар реформирования, стремится определить взаимоотношения в данной области так, чтобы предоставляемые услуги соответствовали высоким требованиям к качеству и безопасности. В настоящее время существует несколько моделей организации городских пассажирских автомобильных перевозок. Наиболее прогрессивной является модель с использованием брутто-контракта. Однако его основные теоретические и методологические положения требуют дополнительного осмысления, разработки вариантов перехода к такому взаимодействию субъектов автотранспортной деятельности. Цель исследования, представленного в статье, состоит в повышении эффективности городских пассажирских автомобильных перевозок на основе определения оптимального вида брутто-контракта при взаимодействии транспортных властей и перевозчиков. Исследование основано на общенаучных методах анализа и синтеза, системного анализа, а также на положениях теории транспортных процессов и систем. Используются современные общенаучные программные продукты, открытые информационные ресурсы о городских пассажирских автомобильных перевозках в регионах Российской Федерации. Основным научным результатом можно считать установление четырех возможных видов брутто-контрактов: для маршрутов, осуществляющих перевозки по всей маршрутной улично-дорожной сети; для нескольких маршрутов; для одного маршрута; для различных периодов суток по отдельно взятому маршруту. Создана модель перехода городского пассажирского автомобильного транспорта для работы в условиях брутто-контракта, направленная на соблюдение стандарта качества перевозок и уменьшение компенсационных выплат перевозчику из муниципального бюджета. Согласно модели, выбор вида брутто-контракта определяется результатом проектирования технологии и организации процесса перевозок, оценкой экономических показателей процесса перевозок, а также точностью.

Ключевые слова: городские пассажирские автомобильные перевозки, брутто-контракт, организатор перевозок, перевозчик

Abstract

Urban passenger car transportation is undergoing major changes. The State, as the main beneficiary of the reform, seeks to define relationships in this area so that the services provided meet high quality and safety requirements. Currently, there are several models for the organization of urban passenger automobile transportation, the most progressive of which is the model using a gross contract, its main theoretical and methodological provisions require additional understanding, the development of models for the transition to such interaction of subjects of motor transport activity. The purpose of this work is to improve the efficiency of urban passenger car transportation by determining the optimal type of gross contract between transport authorities and carriers. The work uses general scientific methods of analysis and synthesis, system analysis, as well as the principles of the theory of transport processes and systems. It also uses modern general scientific software products and open information resources about urban passenger car transportation in the regions of the Russian Federation. The main scientific result of the study is the identification of four possible types of gross contracts: for routes that operate throughout the entire street network; for multiple routes; for a single route; and for different periods of the day on a single route. A model has been developed for the transition of urban passenger motor transport to work under a gross contract, aimed at meeting the quality standards for transportation and reducing compensation payments to the carrier from the municipal budget. According to the model, the choice of the type of gross contract is determined by the result of designing the technology and organization of the transportation process, the assessment of the economic indicators of the transportation process, and the accuracy.

Keywords: urban passenger car transportation, gross contract, transportation organizer, carrier

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-74-80

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные пассажирские перевозки имеют большое значение для различных сфер народного хозяйства и общества. Это обусловлено высокой мобильностью, доступной стоимостью и приемлемой эффективностью в сравнении с альтернативными видами транспорта. Автомобильная транспортная система представляет собой неотъемлемый компонент экономики Российской Федерации и других стран, что находит подтверждение в трудах многих исследователей [1–4].

В Российской Федерации используются три основные модели организации городских пассажирских автомобильных перевозок: модель 1990-х годов, модель нетто-контракта и модель брутто-контракта. Для двух первых моделей [5] характерно противоречие между направленностью перевозчика извлекать наибольшую прибыль из транспортного процесса и требованиями пассажиров получать качественную и прежде всего безопасную услугу. По мнению авторов, современные системы пассажирских автомобильных перевозок сталкиваются с необходимостью повышать эффективность, прозрачность и финансовую устойчивость. Один из перспективных методов достижения этих целей — переход на брутто-контракты.

Использование брутто-контрактов обеспечивает стабильное финансирование перевозчиков, что важно для модернизации парка, повышения качества обслуживания и расширения маршрутов перевозок [6]. Сегодня назрела необходимость оптимизации пассажирских автомобильных перевозок в условиях применения различных видов брутто-контракта. Поэтому цель исследования, представленного в статье, состоит в повышении эффективности городских пассажирских автомобильных перевозок на основе определения оптимального вида брутто-контракта при взаимодействии транспортных властей и перевозчиков.

Задачи исследования: проанализировать научную литературу, нормативное обеспечение, опыт работы городского пассажирского автомобильного транспорта в условиях брутто-контракта; разработать критерии применения вида брутто-контракта в зависимости от потребностей населения в перемещениях, а также в зависимости от территориальных, технологических и социально-экономических возможностей муниципальных образований; создать с использованием критериев модель перехода процесса перевозок пассажиров автомобильным транспортом к работе в условиях брутто-контракта.

Рабочая гипотеза исследования заключается в предположении, что оптимальному функционированию городской пассажирской автотранспортной системы должен соответствовать определенный вид брутто-контракта.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ СТАТЬИ

В работе [5] анализируются различные, в том числе по своей структуре и характеристикам, модели организации городских пассажирских перевозок. К основным из них, как уже было отмечено, относятся модель 1990-х годов, нетто-модель и брутто-модель. Первая отличается тем, что в ней значительная часть финансовых рисков возлагается на систему «водитель — пассажир», а тарифы формируются перевозчиками на основе технико-экономических показателей их деятельности. Это ведет

к высокой неопределенности экономических результатов, качества и безопасности перевозок. Нетто-модель строится на том, что доходы от перевозок поступают на счет перевозчику, а муниципалитет дополнительно возмещает ему затраты в размере, позволяющем вести безубыточную транспортную деятельность. Это дает возможность более точно прогнозировать финансовые результаты и стимулировать улучшение качества услуг. Принцип брутто-модели заключается в том, что вся выручка аккумулируется на счете муниципалитета. Муниципалитет выплачивает перевозчику стоимость выполненной транспортной работы с учетом стоимости 1 км пробега транспортного средства по маршруту и показателей качества транспортного процесса. Такая модель обеспечивает высокую эффективность управления городскими перевозками.

В работе [7] авторы подробно рассматривают методологическую основу брутто-модели организации городских пассажирских перевозок, рассматривают ее структуру и условия применения.

В статье [8] анализируются достоинства и потенциальные риски использования брутто-контракта при организации городских пассажирских перевозок в сравнении с другими моделями взаимодействия субъектов автотранспортной деятельности. Авторы приходят к выводу, что применение брутто-модели позволяет оптимизировать транспортные процессы и осуществлять эффективный контроль за качеством работы пассажирского транспорта. Для примера приводится реализация брутто-контрактов в Москве (2016 г.), Твери (2019 г.), Новокузнецке (2020 г.), Санкт-Петербурге, Южно-Сахалинске и Краснодаре (2022 г.). В исследовании [9] подробно изучен этот метод организации транспортного обслуживания, выделены его ключевые достоинства и возможные ограничения в сравнении с альтернативными формами контрактации.

В [10] рассмотрены вопросы проектирования и управления транспортной инфраструктурой городских территорий, имеющие важное значение при организации работы транспорта общего пользования, в том числе в условиях брутто-контракта. Особое внимание уделено оценке эффективности рассматриваемой системы по показателям безопасности дорожного движения, состояния транспортной сети и технологической инфраструктуры города.

В работе [11] анализируется нормативно-правовая база организации регулярных перевозок пассажиров. Отмечается, что действующие нормативные акты не в полной мере соответствуют быстро меняющимся внешним условиям. Авторы считают, что предоставление организаторам перевозок полномочий по сбору платы за проезд в случаях, когда перевозки финансируются муниципалитетом, упростит переход на брутто-контракты и исключит возможность присвоения выручки от оплаты проезда работниками перевозчика.

В статье [12] отмечено, что брутто-контракт представляет собой новую модель взаимодействия между перевозчиками и городской администрацией, способствует более эффективной работе всех участников процесса. Анализ показывает, что внедрение этого метода может значительно повысить качество обслуживания пассажиров, обеспечивает стабильность и предсказуемость доходов перевозчиков. Важным аспектом является

повышение безопасности перевозок, что играет ключевую роль в создании комфортной городской транспортной среды.

В [13] подчеркивается важность поддержания баланса между интересами перевозчиков и финансовой устойчивостью бюджетов при определении стартовой стоимости контрактов в сфере пассажирских перевозок. Авторы считают, что установление оптимальной цены должно учитывать разнообразные факторы, влияющие на деятельность транспортных компаний в рамках брутто-контрактов.

Статья [14] посвящена анализу изменений в системе городских автобусных перевозок развивающихся стран и стран с переходной экономикой, включая СНГ и Китай, которые сталкиваются с проблемами в организации общественного транспорта из-за нехватки финансовых ресурсов, слабых институциональных структур и быстрых изменений в обществе. Авторы также отмечают избыточное разнообразие подходов к реформам.

В работе [15] исследуется влияние структуры собственности и типов договорных контрактов на эффективность перевозок во Франции. Авторы сравнивают государственные и частные компании и делают вывод, что структура собственности и тип контрактов влияют на эффективность операторов, но в условиях французской системы эти различия малы и не приводят к значительным улучшениям при переходе к более либеральным моделям.

В целом изучение научной литературы, нормативного обеспечения, опыта работы городского пассажирского автомобильного транспорта свидетельствует о позитивной оценке организации перевозок пассажиров с использованием брутто-контракта, необходимости дополнительного осмысления его положений, разработки модели перехода к такому взаимодействию субъектов автотранспортной деятельности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, КРИТЕРИИ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНЕДРЕНИЯ ВИДОВ БРУТТО-КОНТРАКТА

В основе исследования, представленного в статье, лежат общенаучные методы анализа и синтеза, системного анализа, а также положения теории транспортных процессов и систем. Используются современные общенаучные программные продукты, открытые информационные ресурсы о городских пассажирских автомобильных перевозках в регионах Российской Федерации.

По результатам проведенного анализа формализованы теоретические и методические положения, касающиеся следующих видов брутто-контрактов: для маршрутов, осуществляющих перевозки по всей маршрутной улично-дорожной сети (УДС); для нескольких маршрутов; для одного маршрута; для различных периодов суток по отдельно взятому маршруту (табл. 1). Рассмотрение брутто-контракта для различных периодов суток по отдельно взятому маршруту обусловлено большим количеством нареканий пассажиров на перевозки в вечерние часы.

В качестве критериев для видов брутто-контракта используются: масштаб внедрения, характеризующий географические и временные параметры использования; уровень риска при установившемся функционировании, характеризующий масштаб возможных неблагоприятных последствий для городской пассажирской автотранспортной системы; сложность реализации, характеризующая уровень взаимодействия субъектов автотранспортной деятельности при установившемся состоянии системы; возможная продолжительность перехода к установившемуся состоянию (при наличии КСОТ), характеризующая переходный период для установления вида брутто-контракта; требуемые ресурсы для подготовки и установившегося функционирования перевозок в условиях вида брутто-контракта.

Таблица 1

Критерии и основные характеристики внедрения видов брутто-контракта

Критерий	Брутто-контракт			
	для различных периодов суток по отдельно взятому маршруту	для одного маршрута	для нескольких маршрутов	для маршрутов по всей УДС
Масштаб внедрения	Один или несколько маршрутов	Один маршрут	Несколько маршрутов	Все маршруты
Уровень риска при установившемся функционировании	Минимальный в пределах периодов суток по одному или нескольким маршрутам	Минимальный в пределах времени работы маршрута	Локальный в пределах совокупности транспортных районов города	Системный в пределах города
Сложность реализации	Невысокая	Повышенная	Средняя	Высокая
Возможная продолжительность перехода к установившемуся состоянию (при наличии КСОТ)*	3–6 месяцев	3–6 месяцев	До 12 месяцев	До 24 месяцев
Требуемые ресурсы	Наименьшие по сравнению с другими видами брутто-контракта	Увеличенные относительно предыдущего вида брутто-контракта, пропорционально возросшему объему транспортной работы по одному маршруту	Увеличенные относительно предыдущего вида брутто-контракта, пропорционально возросшему объему транспортной работы по нескольким маршрутам	Увеличенные относительно предыдущего вида брутто-контракта, пропорционально возросшему объему транспортной работы для маршрутов по всей УДС

*КСОТ — комплексная схема организации транспортного обслуживания населения общественным транспортом.

Наименьшие требуемые ресурсы, в том числе временные, и возможные риски характерны для брутто-контракта, регулирующего перевозки в различные периоды суток по отдельному взятому маршруту, наибольшие — для маршрутов по всей УДС. Оставшиеся два вида занимают промежуточное положение, их можно рассматривать как переходные. При этом устойчивое и качественное функционирование городских пассажирских автотранспортных систем может обеспечить распространение на все маршруты, осуществляющие перевозки по всей УДС. Другие виды рационально использовать в качестве подготовительных этапов и применять по мере усложнения.

Модель перехода городского пассажирского автомобильного транспорта для работы в условиях брутто-контракта направлена на решение двуединой задачи: на соблюдение стандарта качества, прежде всего безопасности, перевозок и на уменьшение компенсационных выплат перевозчику из муниципального бюджета. Модель имеет четыре уровня: проектирование технологии перевозок; проектирование организации перевозок; оценка экономических показателей процесса перевозок; обеспечение точности реализации проектных решений.

1. Уровень проектирования технологии перевозок:
 - 1.1) построение транспортной модели;
 - 1.2) построение матрицы пассажирских корреспонденций;
 - 1.3) анализ существующей маршрутной сети;
 - 1.4) проверка на удовлетворение качества существующей маршрутной сети;
 - 1.5) построение маршрутной сети (в случае отсутствия и не удовлетворения показателям качества перевозок);
 - 1.6) определение пассажиропотоков на маршрутах;
 - 1.7) технологический расчет показателей процесса перевозок;
 - 1.8) составление расписания с определением количества рейсов и годового пробега;
 - 1.9) разделение маршрутного расписания на периоды суток для работы в условиях брутто-контракта в определенные часы с определением годового пробега в часы работы по брутто-контракту.
2. Уровень проектирования организации перевозок:
 - 2.1) организация открытого конкурса на право получения свидетельств об осуществлении перевозок по одному или нескольким муниципальным маршрутам регулярных перевозок;
 - 2.2) заключение контрактов на осуществление городских регулярных перевозок транспортом общего пользования;
 - 2.3) контроль организатором перевозок соблюдения условий контракта;
 - 2.4) выявление и согласование с исполнителем транспортной работы нарушений условий контракта.
3. Уровень оценки экономических показателей процесса перевозок:
 - 3.1) определение начальной (максимальной) цены контракта;
 - 3.2) переход на работу в условиях брутто-контракта всей маршрутной сети, части маршрутов, одного маршрута или переход маршрутов в определенные часы;
 - 3.3) определение суммы, подлежащей выплате перевозчику за фактически выполненные работы;

3.4) определение необходимых компенсационных выплат из бюджета по каждому осуществляющему перевозку в условиях брутто-контракта маршруту.

4. Обеспечение точности реализации проектных решений:

4.1) осуществление перевозочного процесса перевозчиком в условиях заключенного контракта;

4.2) передача данных о состоянии подвижного состава и процесса осуществления транспортной работы в реальном времени.

Целевая функция модели:

$$D_b \rightarrow \min,$$

где D_b — сумма компенсационных выплат перевозчику из муниципального бюджета при перевозке пассажиров городским транспортом общего пользования по регулярным маршрутам с учетом вида брутто-контракта, руб.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ МАРШРУТА В УСЛОВИЯХ БРУТТО-КОНТРАКТА

На примере муниципального маршрута № 6А «Пос. Комсомольский — ТЦ «Хэппи Молл»» города Саратова выполнен расчет по разработанной модели. Основные параметры маршрута приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры маршрута № 6А
«Пос. Комсомольский — ТЦ «Хэппи Молл»» города Саратова

Показатель	Значение показателя
Протяженность маршрута, км	63,1
Время оборота, ч	3,155
Максимальное количество автобусов на маршруте, ед.	30
Класс транспортных средств	Большой
Марка и модель транспортных средств	ЛиАЗ 529265, ЛиАЗ 529267
Годовой пробег всех транспортных средств на маршруте, км	1893 757,2
Годовой пассажиропоток на маршруте, пасс.	5 836 800
Себестоимость 1 км пробега по маршруту, руб.	232,7
Годовой пробег всех транспортных средств на маршруте в часы спада пассажиропотока с 20:00 до 00:25, км	310 073,4
Годовой пассажиропоток на маршруте в часы спада пассажиропотока с 20:00 до 00:25, км	1 013 200
Стоимость оплаты проезда наличным и безналичным расчетом, руб.	34
Интервалы движения на маршруте	05:45–07:00 — от 8 до 16 мин 07:00–09:00 — 8 мин 09:00–17:00 — от 8 до 16 мин 17:00–19:00 — 8 мин 19:00–21:00 — от 8 до 16 мин 21:00–22:00 — от 16 до 32 мин 22:00–00:25 — от 16 до 32 мин

Таблица 3

Расчет параметров по маршруту № 6А «Пос. Комсомольский — ТЦ “Хэппи Молл”» города Саратова

Показатель	Значение показателя
Годовые затраты на перевозку пассажиров по маршруту, руб.	440 677 300,4
Возможный годовой доход, руб.	198 451 200
Годовые затраты на перевозку пассажиров по маршруту в часы спада пассажиропотока с 20:00 до 00:25, руб.	72 154 080,18
Возможный годовой доход в период с 20:00 до 00:25, руб.	34 448 800
Соотношение годовых затрат и возможного годового дохода, %	45
Соотношение годовых затрат и возможного годового дохода в период с 20:00 до 00:25, %	47,7

Исходя из параметров маршрута проведен расчет затрат на перевозку пассажиров и возможного годового дохода для работы в условиях брутто-контракта по двум видам: 1) для одного маршрута; 2) для различных периодов суток по отдельно взятому маршруту. Результаты приведены в табл. 3.

На рис. 1 графически представлены результаты расчетов возможного годового дохода и необходимых компенсационных выплат из бюджета по этим видам брутто-контрактов. Из приведенных результатов следует, что часть дохода, получаемая от оплаты проезда пассажирами, составляет 45 % затрат при условии работы по брутто-контракту одного маршрута и 47,7 % по брутто-контракту на период времени суток с 20:00 до 00:25 этого же маршрута. Оставшиеся части затрат перевозчиков должны быть компенсированы из муниципального бюджета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана модель перехода городского пассажирского автомобильного транспорта общего пользования для работы в условиях брутто-контракта, которая включает четыре уровня взаимодействия и решает задачу перехода на модель брутто-контракта для всей маршрутной улично-дорожной сети, для одного или нескольких маршрутов, а также для различных периодов суток. Выполненный расчет для маршрута № 6А «Пос. Комсомольский — ТЦ “Хэппи Молл”» города Саратова позволил установить, что для перевода этого маршрута на работу в условиях брутто-контракта доходная часть, оплачиваемая пассажирами, составит

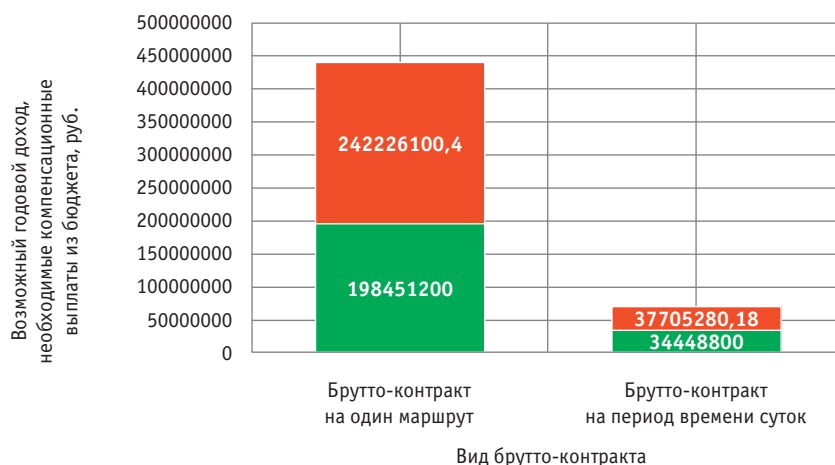


Рис. 1. Результаты расчетов возможного годового дохода и необходимых компенсационных выплат из бюджета по видам брутто-контрактов для маршрута № 6А «Пос. Комсомольский — ТЦ “Хэппи Молл”» в Саратове:

- необходимые компенсационные выплаты из бюджета, руб.;
- возможный годовой доход, руб.

45 % от понесенных затрат, оставшаяся часть в 55 % должна быть возмещена перевозчику из муниципального бюджета. В случае использования на этом маршруте брутто-контракта на период времени суток с 20:00 до 00:25 доходная часть, оплачиваемая пассажирами, составит 47,7 % от понесенных затрат, оставшаяся часть — 52,3 % — должна быть возмещена перевозчику из муниципального бюджета. В абсолютном выражении перевозчику должны быть выплачены компенсации в размере более 242 млн руб. в год и более 37 млн руб. в год соответственно.

Таким образом, при выборе маршрутов для перехода городского пассажирского автомобильного транспорта общего пользования на работу по брутто-контракту необходим детальный анализ возможных вариантов, в том числе:

1) определение траектории маршрутов, от которой зависит величина транспортного спроса на регулярные пассажирские перевозки, определяющей доходную часть перевозок и, следовательно, отношение части дохода, получаемой от оплаты проезда пассажирами, к общим затратам на транспортную работу;

2) расчет номинальной пассажиропровместимости и последующий выбор класса подвижного состава, их количества, обеспечивающие наименьшие затраты на осуществление транспортной работы при обеспечении требований к качеству, прежде всего безопасности, перевозок;

3) определение возможности муниципальных бюджетов осуществлять компенсационные выплаты перевозчику.

Основным научным результатом исследования можно считать модель пере-

хода городского пассажирского автомобильного транспорта для работы в условиях брутто-контракта, направленную на соблюдение стандарта качества перевозок и уменьшение компенсационных выплат перевозчику из муниципального бюджета. Согласно модели, выбор вида брутто-контракта определяется результатом проектирования технологии и организации процесса перевозок, оценкой экономических показателей процесса перевозок, а также точностью реализации проектных решений.

Сведения об авторах:

Николай Николаевич Якунин,
член-эксперт Общественного совета при Минтрансе России,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автомобильного транспорта
Оренбургского государственного университета

Кристина Алексеевна Паршакова,
ассистент кафедры автомобильного транспорта
Оренбургского государственного университета

Виталий Валерьевич Котов,
кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта
Оренбургского государственного университета

Евгений Викторович Фёклин,
кандидат экономических наук, доцент, заместитель генерального
директора по эксплуатации АО «Межгородтранс»

Практическая значимость исследования заключается в предоставлении представителям отрасли пассажирских автомобильных перевозок делать обоснованный выбор вида брутто-контракта исходя из возможностей муниципальных образований и решаемых задач.

Направлением дальнейших исследований будет конкретизация модели с учетом архитектурно-планировочных решений городских территорий.

Authors information:

Nikolay N. Yakunin,
Expert Member of the Public Council
of the Ministry of Transport of the Russian Federation,
DSc in Engineering, Professor, Head of Road Transport Department,
Orenburg State University

Kristina A. Parshakova,
Assistant Lecturer of Road Transport Department,
Orenburg State University

Vitaliy V. Kotov,
PhD in Engineering, Associate Professor
of Road Transport Department, Orenburg State University

Evgeniy V. Fyoklin,
PhD in Economics, Associate Professor,
Deputy General for Operations, Mezhhgorodtrans JSC

Литература

1. Легкий С. А., Корастелев Д. С. Методика выбора подвижного состава для городских автобусных маршрутов с учетом экономических и технических факторов // Вести Автомобильно-дорожного института. 2024. № 3 (50). С. 37–49.
2. Якунина Н. В. Методология повышения качества перевозок пассажиров автомобильным транспортом по регулярным маршрутам : монография. Оренбург : Университет, 2015. 262 с.
3. Легкий С. А., Аксенов А. С. Усовершенствование процесса разработки маршрутов городских автобусных перевозок с учетом их удобства для пассажиров // Вести Автомобильно-дорожного института. 2019. № 1 (28). С. 42–52.
4. Якунин Н. Н., Якунина Н. В., Любимов И. И. Региональные пассажирские автотранспортные системы: постановка задачи, первые результаты оценивания // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20. № 6 (94). С. 748–761. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761.
5. Любимов И. И., Якунин Н. Н., Якунина Н. В. Анализ моделей взаимодействия субъектов пассажирских автомобильных перевозок // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19. № 6 (88). С. 878–889. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889.
6. Евсеев О. В. О транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 5 (18). С. 7–11. ISSN 1994-831X.
7. Любимов И. И., Якунин Н. Н. Исследование методологической среды применения брутто-контракта в условиях городских пассажирских автомобильных перевозок // Прогрессивные технологии в транспортных системах : материалы XVIII международной научно-практической конференции, Оренбург, 15–17 ноября 2023 г. Оренбург : Изд-во ОГУ, 2023. С. 253–261.

References

1. Legkii S. A., Korastelev D. S. Rolling Stock Selection Methodology for Urban Bus Routes, Taking into Account Economic and Technical Factors. *Bulletin of the Automobile and Road Institute*. 2024. No. 3 (50). Pp. 37–49. (In Russian).
2. Yakunina N. V. The methodology for improving the quality of transportation of passengers by public motor transport on regular routes. *Orenburg : University*, 2015. 262 p. (In Russian).
3. Legkii S. A., Aksenov A. S. Improvement of the Route Development Process of Urban Bus Transportation Based on their Conveniences for Passengers. *Bulletin of the Automobile and Road Institute*. 2019. No. 1 (28). Pp. 42–52. (In Russian).
4. Yakunin N. N., Yakunina N. V., Lyubimov I. I. Regional passenger motor transport systems: problem statement, first estimation results. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023. Vol. 20. No. 6 (94). Pp. 748–761. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761. (In Russian).
5. Lyubimov I. I., Yakunin N. N., Yakunina N. V. Analysis for models of interaction between road passenger transport operators *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022. Vol. 19. No. 6 (88). Pp. 878–889. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889. (In Russian).
6. Evseev O. V. On the transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030. *Transport of the Russian Federation*. 2008. No. 5 (18). Pp. 7–11. ISSN 1994-831X. (In Russian).
7. Lyubimov I. I., Yakunin N. N. Investigation of the methodological environment of the gross contract application in urban passenger automobile transportation. *Progressive technologies in transport systems : proceedings of the 18th International scientific and practical conference, Orenburg, November 15–17, 2023*.

8. Котенкова И. Н., Сенин И. С., Камышникова Н. А. Особенности внедрения брутто-контрактов на городском пассажирском транспорте // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2023. № 4. С. 79–83.
 9. Якунина Н. В., Студеникин В. А. Организация перевозок пассажиров городским общественным транспортом на основе брутто-контракта // Прогрессивные технологии в транспортных системах : материалы XVI международной научно-практической конференции, Оренбург, 11–13 ноября 2021 г. Оренбург : Изд-во ОГУ, 2021. С. 606–611.
 10. Тургунов З. Х., Тухтабаев М. А. Создание системы брутто-контракта в развитии городского общественного транспорта (на примере г. Намангана) // Экономика и социум. 2023. № 4-1 (107). С. 1138–1142. ISSN 2225-1545.
 11. Матанцева О. Ю., Трякин К. В. О некоторых направлениях реформирования организации общественного пассажирского транспорта на федеральном и региональном уровнях // Россия: Тенденции и перспективы развития : материалы XIII международной научно-практической конференции, Курск, 3–4 июня 2022 г. Москва : Институт научной информации по общественным наукам РАН, 2022. Вып. 17. Ч. 3. С. 123–126.
 12. Чебкасов И. Г. Финансирование и развитие общественного транспорта города Красноярск за счет перехода на инновационную систему «брутто-контракта» // Modern Economy Success. 2023. № 4. С. 172–177. ISSN 2500-3747.
 13. Матанцева О. Ю., Белогребень А. А., Спирин И. В. Совершенствование порядка определения начальной (максимальной) цены контракта при осуществлении закупок в сфере регулярных пассажирских перевозок автомобильным и городским наземным электрическим транспортом при переходе на брутто-модель взаимодействия с перевозчиками // Научный вестник автомобильного транспорта. 2021. № 2. С. 5–15. ISSN 2078-1474.
 14. Finn B., Mulley C. Urban Bus Services in Developing Countries and Countries in Transition: A Framework for Regulatory and Institutional Developments // Journal of Public Transportation. 2011. Vol. 14. No. 4. Pp. 89–107.
 15. Roy W., Yvrande-Billon A. Ownership, Contractual Practices and Technical Efficiency: The Case of Urban Public Transport in France // Journal of Transport Economics and Policy. 2007. Vol. 41. No. 2. Pp. 257–282.
- Orenburg : Publishing House of Orenburg State University, 2023. Pp. 253–261. (In Russian).
 8. Kotenkova I. N., Senin I. S., Kamyshnikova N. A. Features of the implementation of gross cost contracts in urban passenger transport. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2023. No. 4. Pp. 79–83. (In Russian).
 9. Yakunina N. V., Studenikin V. A. Organization of passenger transportation by urban public transport based on a gross contract. *Progressive technologies in transport systems : proceedings of the 16th International scientific and practical conference*, Orenburg, November 11–13, 2021. Orenburg : Publishing House of Orenburg State University, 2021. Pp. 606–611. (In Russian).
 10. Turgunov Z. X., Tukhtabaev M. A. Establishment of the pool system in development of urban public transport (in the case of the city of Namangan). *Economy and society*. 2023. No. 4-1 (107). Pp. 1138–1142. ISSN 2225-1545. (In Russian).
 11. Matantseva O. Yu., Tryakin K. V. On some areas of reforming the organization of public passenger transport at the federal and regional levels. *Russia: Trends and development prospects : proceedings of the 13th International scientific and practical conference*, Kursk, June 3–4, 2022. Moscow : Institute of Scientific Information for Social Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2022. Issue 17. Part 3. Pp. 123–126. (In Russian).
 12. Chebkasov I. G. Funding and development of public transport in the city of Krasnoyarsk through the transition to the innovative «gross contract» system. *Modern Economy Success*. 2023. No. 4. Pp. 172–177. ISSN 2500-3747. (In Russian).
 13. Matantseva O. Yu., Belogreben A. A., Spirin I. V. Improving the procedure for determining the initial (maximum) contract price when purchases in the field of regular passenger transportation by road and urban ground electric transport in the transition to the gross model interaction with carriers. *The Bulletin of Road Transport Research*. 2021. No. 2. Pp. 5–15. ISSN 2078-1474. (In Russian).
 14. Finn B., Mulley C. Urban Bus Services in Developing Countries and Countries in Transition: A Framework for Regulatory and Institutional Developments. *Journal of Public Transportation*. 2011. Vol. 14. No. 4. Pp. 89–107.
 15. Roy W., Yvrande-Billon A. Ownership, Contractual Practices and Technical Efficiency: The Case of Urban Public Transport in France. *Journal of Transport Economics and Policy*. 2007. Vol. 41. No. 2. Pp. 257–282.

Научная статья

УДК 625.1

Математический анализ и прогноз достоверности контрольных измерений цифровых моделей железнодорожного пути

Артем Александрович Платунов¹, Сергей Геннадьевич Аккерман²¹Екатеринбургский центр диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия²Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Mathematical analysis and reliability forecasting for control measurements of digital railway track models

Artem A. Platonov¹, Sergey G. Akkerman²¹Ekaterinburg Center for Diagnostics and Monitoring of Russian Railways Infrastructure Devices, Ekaterinburg, Russia²Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

Статья продолжает цикл исследований, посвященных оценке эффективности применения технологии цифрового моделирования железнодорожного пути на основе фотограмметрической обработки данных, полученных с использованием беспилотных воздушных судов. Основное внимание уделено математическому анализу зависимости процента контрольных измерений высотных отметок рельсовых нитей, попадающих в нормативный интервал точности, от разрешения получаемых цифровых моделей местности, которое напрямую связано с высотой полета беспилотных воздушных судов. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных при различных разрешениях цифровых моделей. Описание выявленной зависимости и прогнозирование точностных характеристик выполнены при помощи методов аппроксимации с использованием математических функций. На основе анализа моделей установлено, что для достижения 100 % вхождения контрольных измерений в заданный интервал точности требуется разрешение 0,74 см/пикс цифровых моделей местности.

Ключевые слова: цифровое моделирование, железнодорожный путь, фотограмметрия, беспилотное воздушное судно, точность измерений, разрешение цифровой модели, аппроксимация, математическое прогнозирование, высота полета, контрольные измерения

Abstract

The article continues a series of studies devoted to evaluating the effectiveness of digital railway track modeling technology based on photogrammetric data processing obtained using unmanned aircraft. The main attention is paid to the mathematical analysis of the dependence of the percentage of control measurements of the elevation of rail threads that fall within the standard accuracy range on the resolution of the digital terrain models obtained, which is directly related to the flight altitude of unmanned aircraft. A comparative analysis of the results obtained at different resolutions of digital models is carried out. The description of the revealed dependence and prediction of the accuracy characteristics were performed using approximation methods using mathematical functions. Based on the analysis of the models, it was found that in order to achieve 100 % of the control measurements within the specified accuracy range, resolution of 0.74 cm/pixels of digital terrain models is required.

Keywords: digital modeling, railway track, photogrammetry, unmanned aircraft, measurement accuracy, digital model resolution, approximation, mathematical forecasting, flight altitude, control measurements

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-81-84

Публикуемая статья продолжает цикл исследований [1, 2], посвященных оценке точности и эффективности применения технологии цифрового моделирования железнодорожного пути на основе фотограмметрической обработки данных [3], полученных с использованием беспилотных воздушных судов (БВС) [4].

Ранее в наших исследованиях были проанализированы начальные этапы экспериментальных работ. Основное внимание было уделено методике проведения натурных измерений, включая использование спутникового геодезического оборудования (мобильного приемника, штатного приемника на БВС и базовой станции), стратегическое размещение опознавательных знаков и выполнение съемочных работ с различных высот полета БВС. Ключевая цель состояла в определении точности воспроизведения трехмерных параметров рельсового пути, в частности высотных отметок, как критически важного показателя для задач паспортизации железнодорожных станций и создания актуальных планов путевого хозяйства.

В рамках исследования были сформированы цифровые модели местности (ЦММ) с различным разрешением, для оценки точности которых использовались данные 120 контрольных измерений, равномерно распределенных на поверхности рельсовых нитей. Первичный математический анализ был сосредоточен на распределении расхождений высотных отметок, полученных с ЦММ (при высоте полета БВС 45 м), с эталонными значениями. Было установлено, что значительное количество контрольных измерений (72,45 и 76,53 % для двух типов выравнивания фотоматериалов) укладывается в первые два интервала точности (до ± 50 мм), при этом в наиболее строгий интервал (до ± 25 мм) попало 33,67 и 34,69 % измерений соответственно. Также было определено, что на малых высотах съемки использование опознавательных знаков не оказало решающего влияния на точность отрисовки элементов рельсового пути по сравнению со свободным

выравниванием по данным спутниковых систем глобальной навигации (ГНСС), хотя и привело к различиям в статистических показателях эксцесса и асимметрии распределения ошибок.

Первичные выводы подтвердили высокий потенциал метода и локальный характер пиковых отклонений. Было анонсировано, что дальнейшие исследования будут направлены на сравнительный анализ множества результатов цифрового моделирования, полученных при различных параметрах съемки, с акцентом на вхождении контрольных измерений в заданные интервалы достоверности, а также на разработке математических моделей для аппроксимации параметров точности в зависимости от контролируемых условий эксперимента.

Проведенный эксперимент представлял собой комплекс операций по измерению железнодорожных путей с использованием методически выверенных инструментов [5, 6] на основе учета приобретенного опыта анализа предыдущих результатов. Далее описан сравнительный анализ множества результатов цифрового моделирования в разрезе вхождения в интервалы достоверности контрольных измерений и рассмотрены математические модели аппроксимации параметров достоверности в зависимости от контролируемого параметра.

Итогом анализа контрольных измерений групп по отдельности является обратная зависимость процентного вхождения контрольных измерений в установленный нормативный табличный интервал. Результаты процентных вхождений формируются от численной величины разрешения цифровых моделей местности, используемых для определения величин по фиксированному контрольному точкам. Группа полученных величин образует фактический график зависимости, представленный на рис. 1.

Точки результатов на графике могут быть описаны при помощи аппроксимации линии тренда некоторой функции, позволяющей прогнозировать математическим путем вероятные значения величин, недоступные в текущий момент. В одном из рассмотренных вариантов на рис. 1 используется линия тренда с логарифмической функцией как с величиной достоверности аппроксимации, до-

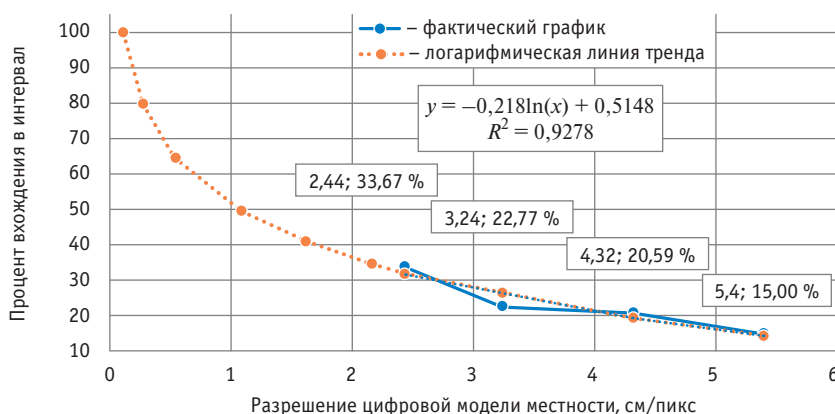


Рис. 1. Зависимость процента вхождения контрольных измерений в первый табличный интервал от разрешения цифровой модели с логарифмической прогнозной функцией

Таблица 1

Описание логарифмической линии тренда вхождения контрольных измерений в первый табличный интервал

Вхождение в первый табличный интервал, %	Разрешение цифровой модели местности, см/пикс	Расчетная высота полета с используемым в исследовании оборудованием, м
100,00	0,10798	1.8
79,04	0,2824	5
64,46	0,5514	10
49,61	1,0894	20
40,86	1,6274	30
34,64	2,1654	40
32,08	2,4344	45
25,84	3,2414	60
19,59	4,3174	80
14,74	5,3934	100

статочной для дальнейшего изучения. Линия тренда представлена уравнением

$$y = -0,218 \cdot \ln(x) + 0,5148, \quad (1)$$

где x — произвольная величина разрешения цифровой модели местности, см/пикс; y — процентный результат прогноза вхождения контрольных измерений в нормативный табличный интервал.

На основании полученного уравнения можно описать результаты математического прогнозирования. Прогнозный расчет зависимости процента вхождения контрольных измерений от разрешения цифровых моделей приведен в табл. 1 и доходит до значения разрешения цифровой модели, позволяющего обеспе-

чить математически полную достоверность моделирования железнодорожного пути.

Эмпирическим путем установлен более оптимистичный прогноз (рис. 2), где линия тренда задана степенной функцией и представлена уравнением

$$y = 0,753x^{-0,941}. \quad (2)$$

Помимо короткого плеча прогнозирования для достижения полного вхождения контрольных измерений в первый табличный интервал, степенная линия тренда представлена большей величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,954$ с разницей от логарифмической величины на 0,026.

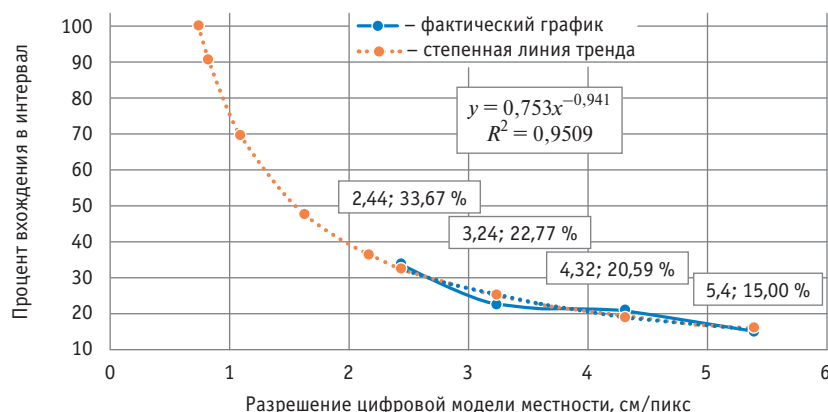


Рис. 2. Зависимость процента вхождения контрольных измерений в первый табличный интервал со степенной прогнозной функцией

Таблица 2

Описание степенной линии тренда вхождения контрольных измерений в первый табличный интервал

Вхождение в первый табличный интервал, %	Разрешение цифровой модели местности, см/пикс	Расчетная высота полета с используемым в исследовании оборудованием, м
100,00	0,7397	13,5
90,72	0,8204	15
69,47	1,0894	20
47,62	1,6274	30
36,40	2,1654	40
32,60	2,4344	45
24,90	3,2414	60
19,01	4,3174	80
15,42	5,3934	100

В табл. 2 приведены результаты прогнозирования с использованием степенной функции. Они, как и расчеты по уравнению логарифмической функции, не создают условия безопасной эксплуатации участвовавших в эксперименте беспилотных воздушных судов для цифрового моделирования. Вместе с тем эти результаты позволяют обозначить технологическую перспективу и установить научно обоснованные требования к оборудованию, способному обеспечить достоверность собираемых данных для цифрового

моделирования объектов и инфраструктуры железных дорог.

Большинство объектов путевого хозяйства являются вспомогательными для получения габаритных расстояний до оси пути, что не требует достоверной высотной информации. Модель цифрового рельсового пути — источник семантической информации для составления не только масштабных планов, но и продольных рельсовых профилей, поэтому требования, предъявляемые к определению высотного положения, должны соблюдаться [7, 8].

Эффективность моделирования линейных объектов и мониторинга их состояния зависит от наличия полноценной и достоверной информации. Поэтому развитие цифрового моделирования железнодорожного пути и объектов железнодорожной инфраструктуры должно быть нацелено на точность, требуемую к отображению на трехмерных моделях и необходимую при решении инженерных задач.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов контрольных измерений с применением аппроксимации позволил определить параметры цифрового моделирования, приводящие к полному вхождению цифровых данных в установленный нормативный интервал. На практике аналогичный результат возможен только при создании особых условий пилотирования на территории железных дорог.

Прогнозирование на основе аппроксимации дает возможность обозначить технологическую перспективу и установить научно обоснованные требования к оборудованию, способному обеспечить достоверность данных для цифрового моделирования объектов и инфраструктуры железных дорог.

Для практического подтверждения результатов прогнозной аппроксимации следует использовать более совершенную цифровую съемочную технику, позволяющую увеличивать разрешение цифровых моделей без снижения высоты полета беспилотного судна.

Беспилотные воздушные суда с подвешенной фотокамерой прежде всего являются эффективным источником общей цифровой основы, включающей в себя полосы отвода железных дорог, нежели универсальным устройством, способным решить все задачи цифрового моделирования. Поэтому в большинстве сценариев получаемые цифровые модели требуют дополнения достоверными трехмерными данными о ключевых объектах моделирования.

Сведения об авторах:

Артем Александрович Платунов,
ведущий инженер Екатеринбургского центра диагностики
и мониторинга устройств инфраструктуры ОАО «РЖД»

Сергей Геннадьевич Аккерман,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Путь и железнодорожное строительство»
Уральского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Artem A. Platunov,
Lead Engineer of Ekaterinburg Center for Diagnostics and Monitoring
of Russian Railways Infrastructure Devices

Sergey G. Akkerman,
PhD in Engineering, Associate Professor
of Railway Construction and Railway Track Department,
Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Платунов А. А., Аккерман С. Г. Технологии цифрового моделирования объектов железнодорожной инфраструктуры с применением беспилотных воздушных судов // Железнодорожный транспорт и технологии : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 29–30 ноября 2023 г. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2024. Вып. 1 (256). С. 137–139.
2. Платунов А. А., Аккерман С. Г. Экспериментальное исследование комплексных возможностей при моделировании объектов железнодорожной инфраструктуры // Транспорт и логистика: технологии устойчивого развития : сборник научных трудов VIII международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 1–2 февраля, 2024 г. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2024. С. 254–257.
3. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan: Professional Edition, версия 1.4. URL: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_ru.pdf.
4. Phantom 4. Инструкция по эксплуатации. URL: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4/en/Phantom_4_User_Manual_ru_v1.2.pdf.
5. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. Москва, 2002. 100 с.
6. ГОСТ Р 59328–2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. Москва : Стандартинформ, 2021. 45 с.
7. Методические указания по составлению продольных профилей станционных путей и перегонов ЦПТ-54/26 : утв. ОАО «РЖД» 17.12.2008. Москва, 2008.
8. Инструкция по проведению диагностики земляного полотна на железных дорогах ОАО «РЖД» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» 12.12.2011 г. № 2663р. 76 с.

References

1. Platunov A. A., Akkerman S. G. Technologies of digital modeling of railway infrastructure facilities using unmanned aircraft. *Railway Transport and Technologies* : proceedings of the International scientific and practical conference, Ekaterinburg, November 29–30, 2023. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2024. Issue 1 (256). Pp. 137–139. (In Russian).
2. Platunov A. A., Akkerman S. G. Experimental study of complex possibilities in modeling railway infrastructure facilities. *Transport and logistics: technologies of sustainable development* : proceedings of the 8th International scientific and practical conference, Rostov-on-Don, February 1–2, 2024. Rostov-on-Don : Publishing House of RSTU, 2024. Pp. 254–257. (In Russian).
3. User's Guide Agisoft PhotoScan: Professional Edition, version 1.4. URL: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_ru.pdf. (In Russian).
4. Phantom 4. User Manual. URL: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4/en/Phantom_4_User_Manual_ru_v1.2.pdf. (In Russian).
5. Instructions for photogrammetric work when creating digital topographic maps and plans. Moscow, 2002. 100 p. (In Russian).
6. GOST R 59328–2021. Aerial photography for mapping. Technical requirements. Moscow : Standardinform, 2021. 45 p. (In Russian).
7. Methodological guidelines for the compilation of longitudinal profiles of station tracks and sidings TsPT-54/26 : approved by the JSC «RZD» 17.12.2008. Moscow, 2008. (In Russian).
8. Instructions for carrying out diagnostics of the roadbed on the railways of JSC «RZD» : approved by the Order of the JSC «RZD» 12.12.2011 No. 2663r. 76 p. (In Russian).

Научная статья

УДК 625.12:624.139

Влияние растительного покрова на состояние дорожных сооружений в процессе их эксплуатации на многолетнемерзлых грунтах

Светлана Мирзахановна Жданова¹, Оксана Анатольевна Нератова¹, Ирина Евгеньевна Парамонова¹¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

The impact of vegetation in the condition of road constructions during their operation on permanently frozen soils

Svetlana M. Zhdanova¹, Oksana A. Neratova¹, Irina E. Paramonova¹¹Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

Аннотация

Исследования авторов и практика эксплуатации земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах показали, что растительный покров оказывает значительное влияние на состояние дорожных сооружений. Низкие температуры, переувлажнение грунтов в период оттаивания, техногенное воздействие от движения поездов, преобладание ветров приводят к перестроению растительности. Растительность, произрастающая в водоотводных сооружениях, например в канавах и в руслах выпусков из водопропускных труб, постепенно угнетается, что приводит к испарению и осушению грунтов. Угнетенная моховая поверхность всегда «провоцирует» многолетнемерзлые грунты к протаиванию, скоплению воды, переувлажнению, изменению консистенции грунтов оснований и постоянным деформациям земляного полотна.

В статье рассмотрено влияние растительного покрова на причины возникновения и развития деформаций на слабых грунтах, в том числе на многолетнемерзлых, и приведены разработанные в Дальневосточном государственном университете путей сообщения предложения по предупреждению и ликвидации таких деформаций.

Ключевые слова: горные породы, дороги, грунтовые технические системы, теплофизические свойства многолетнемерзлых пород земной коры, физико-механические параметры грунтов, растительный покров, теплообмен, конструктивно-технологические решения

Abstract

The authors' research and the practice of operating the roadbed on permafrost soils have shown that vegetation has a significant impact on the condition of road structures. Low temperatures, waterlogging of soils during the thawing period, man-made effects from trains, and the predominance of winds lead to the reshaping of vegetation. Vegetation growing in drainage structures, for example in ditches and in the channels of outlets from culverts, is gradually suppressed, which leads to evaporation and drainage of soils. The oppressed moss surface always «provokes» permafrost soils to thaw, water accumulation, waterlogging, changes in the consistency of the soils of the foundations and permanent deformations of the earth bed.

The article analyzes the influence of vegetation cover on the causes and development of deformations on weak soils, including permafrost, and presents proposals developed at the Far Eastern State Transport University to prevent and eliminate such deformations.

Keywords: rocks, roads, ground technical systems, thermophysical properties of perennially frozen rocks of the Earth's crust, physical and mechanical parameters of soils, vegetation cover, heat exchange, design and technological solutions

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-85-90

Актуальность представленного в статье исследования связана с высокими требованиями к стабильности земляного полотна в путевом хозяйстве для обеспечения эффективного освоения объемов грузоперевозок и безопасности движения поездов повышенной массы в условиях многолетнемерзлых грунтов. Авторы в течение многих лет изучают воздействие техногенных и природных явлений на эксплуатацию железных дорог в северных регионах. Состояние пород, подстилающих земляное полотно железных и автомобильных дорог, определяется большим диапазоном абсолютных высот, морфологическим различием и степенью расчлененности рельефа, неоднородностью состава коренных пород, различием среднегодовой температуры воздуха и разнородностью ее распространения по высоте, гидрогеологией, а также вибродинамическими, термодинамическими и вулканическими процессами.

Температурный режим в основании земляного полотна формируется под влиянием суммарных температурных воздействий: конструктивных элементов земляного полотна, прилегающей территории, техногенных явлений и нарушений природных ландшафтов. Подобные условия создаются и при угнетении естественного почвенно-растительного покрова на территории вдоль насыпи из-за подтопления приподошвенных зон и откосов земляного полотна поверхностными и грунтовыми водами.

Распространение многолетней мерзлоты от юга к северу сменяется следующими областями [1]: суббореальной (умеренной), бореальной (умеренно холодной), субполярной (холодной), полярной (повышенно холодной). Суббореальная область находится в зоне средней тайги (62–60° с.ш.), характеризуется суббореальным (умеренно теплым) климатическим поясом с суммой положительных температур более 10 °С и высоким коэффициентом увлажнения — более 1,5. Бореальная область, территориально совпадающая с зоной северной тайги, расположена на юге в диапазоне 62–63° с.ш. (умеренно холодная). Здесь вечная мерзлота встречается лишь в виде отдельных островов. Субполярная область размещается в пределах лесотундры между арктическим

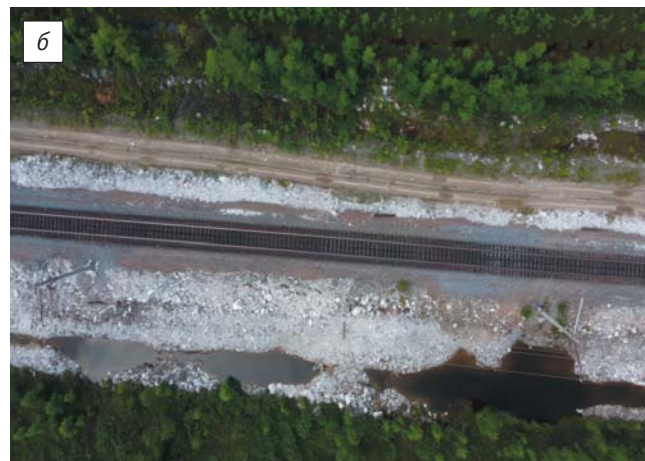


Рис. 1. Термокарстовые озера:

а — на участке Тындинской дистанции пути; *б* — на участке Этыркенской дистанции пути (фото авторов)

и умеренным климатическими поясами Северного полушария. В этой области развиты вечная мерзлота с островами таликов и островная мерзлота. Полярную область, самую холодную ($6-68^{\circ}$ с.ш.), делят на три подзоны тундры — лишайниковую, моховую и кустарничковую.

Горные породы, слагающие поверхностный слой земной коры, в котором находятся в том числе и мерзлые толщи, характеризуются большим разнообразием физико-механических и теплофизических свойств. Дороги, как правило, определяют сложность физической природы механизмов переноса тепла и вещества. Это представляет значительный интерес для дальнейшего исследования воздействия дорог, форм рельефа, микроклиматических условий на температуру и мощность горных пород, а также для изучения роли растительного покрова, гидрогеологических и гидрологических условий.

В зоне Восточного полигона формируются следующие типы подземных вод [2]:

- 1) поровые воды четвертичных аллювиальных, пролювальных, озерных, морских, флювиоглянцеальных и ледниковых отложений;
- 2) поровые грунтовые и пластичные воды континентальных отложений мезозойско-кайнозойских межгорных впадин;
- 3) порово-трещинно-пластовые, трещинно-пластовые, трещинно-карстовые воды терригенно-карбонатных и галогенных пород и др.

Теплопередача в грунтах происходит в конвективной и кондуктивной формах. Встречается также лучистая передача энергии, имеющая подчиненное значение. Конвективная теплопередача происходит в горных породах по трещинам и порам. В сплошных скальных горных породах перенос тепла при положительных и отрицательных температурах осуществляется кондуктивным путем. В естественной среде и дорожных техногенных системах непрерывно происходят процессы переноса энергии и вещества, нарушающие это равновесие [3].

Дороги и их строительство определяют сложность физической природы механизмов переноса тепла и вещества в рассматриваемых средах, в том числе, как установлено

многими исследователями, в виде парникового эффекта. Например, профессор С. Л. Бастамов пришел к выводу, что в подобных случаях происходит перемещение пара под влиянием разности его упругостей при различных температурах [4]. Это подтвердили и исследования, выполненные в Дальневосточном государственном университете путей сообщения (ДВГУПС) [5]. В настоящее время многолетняя мерзлота медленно, но протавает, температура воздуха повышается из-за антропогенных выбросов. В том числе в атмосферу в результате таяния мерзлоты поступает значительное количество соединений углерода (углекислого газа, метана, присутствующего в многолетней мерзлоте), которые усиливают парниковый эффект [6].

Содержание льда в толщах многолетней мерзлоты различно. Неблагоприятные климатические условия криолитозоны (низкие температуры, значительное количество осадков, высокая обводненность грунтов в период оттаивания, преобладание ветров) способствуют переформированию растительного мира. Кроме того, земляное полотно железных дорог, само по себе являясь препятствием на пути грунтового и поверхностного стока, влияет на особенности возникновения в нем и в его основании деформаций криогенного характера. Это вызывает необходимость дальнейшего изучения процессов, которые происходят в грунтах дорожных сооружений и в поверхностных слоях земной коры, расположенных на мерзлых толщах.

Для решения обозначенных задач, которые напрямую связаны с состоянием поверхностных слоев земной коры северных регионов, влияющих на земляное полотно, деформации которого составляют от 30 до 40 % протяженности железнодорожных линий (по данным многолетних исследований ДВГУПС), большее внимание должно уделяться исследованию и ликвидации криогенных, склоновых и термоэрозийных процессов, негативно воздействующих на растительность северных дорог [7].

К наиболее неблагоприятным криогенным процессам, влияющим на растительный мир, можно отнести такие, как морозобойное растрескивание и жильное льдообразование, гидроакколиты, бугры пучения, наледеобразование, криогенное выветривание и термокарст (рис. 1).

Другая группа — это склоновые процессы, которые обусловлены действием сил гравитации: солифлюкция, курумы, сплывы, наледная суффозия. К следующей группе можно отнести термоэрозию и термоабразию. Наиболее распространенный процесс, который сегодня чаще всего встречается на Восточном полигоне Байкало-Амурской магистрали (БАМ), — напорная механическая суффозия на участках, где ранее был проигнорирован поперечный водовыпуск из малых логов и депрессионных впадин [8].

При строительстве БАМа, согласно существовавшим тогда нормам 1978 г., было предусмотрено объединять бассейны логов, так как малые искусственные сооружения (ИССО) должны были размещаться не чаще чем через 1 км. При этом не учитывалось, что на многолетнемерзлых грунтах процессы, связанные с водоотведением, существенно отличаются от обычных условий [9].

На БАМе и на Амуро-Якутской железнодорожной магистрали (АЯМ) попытка заменить водопропускные сооружения мелиоративными и другими конструктивными мероприятиями (особенно на участках слабосточных марей), а также отвод русел и их засыпка дренирующим грунтом оказались малоэффективными. В частности, грунтовые валики, которыми заменялись канавы и лотки, сразу после строительства размывались, и надмерзлотная подземная и поверхностная вода беспрепятственно стекала и скапливалась у подножия земляного полотна, понижая верхнюю границу многолетнемерзлых грунтов оснований.

Таким образом, как показал опыт, решения, связанные с объединением бассейнов, устройством водоотводных валиков вместо канав и лотков, устройством берм из дренирующих грунтов, оказались ошибочными.

За длительный период эксплуатации (50 лет) первоначальный естественный сток поверхностных вод и ручьев в большинстве мелких логов восстановился и вызвал обводнение земляного полотна, появление криогенных деформаций и термоэрозионных процессов. В результате разрушения канав вода подходит к насыпи и в предзимний период

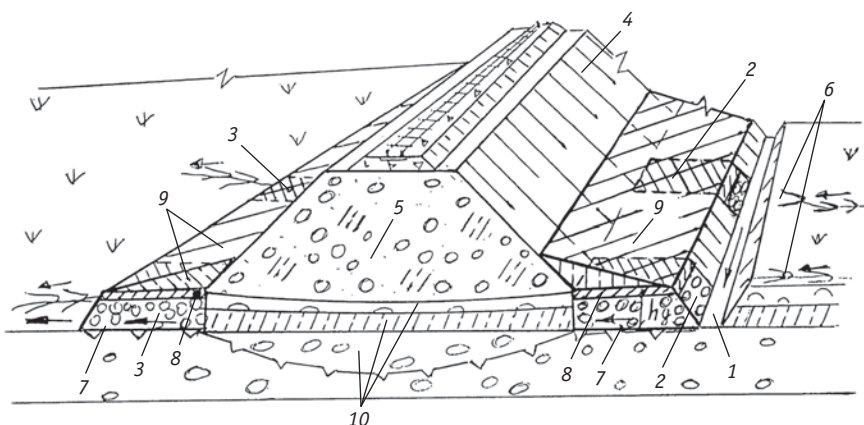


Рис. 2. Устройство для выпуска поверхностных и грунтовых вод [11]:

- 1 — продольная траншея (канавы); 2, 3 — дренажные прорезы на участках пересечения с логами; 4 — откосы насыпи; 5 — насыпь; 6 — пониженная часть рельефа (лог); 7 — граница сезонного промерзания; 8 — теплоизолирующий слой из пенополистирола; 9 — бермы из глинистого грунта; 10 — грунты основания насыпи

под большим напором проникает в тело земляного полотна, где, замерзая, образует пучины, наледи и гидролакколиты.

При этом естественный растительный покров у подошвы земляного полотна постепенно угнетается, происходит осушение грунтов. Препятствия в виде земляного полотна на пути стока подземных вод и нарушения поверхностного водоотвода с начала зимнего периода приводят к механической суффозии (вымыванию) слабых грунтов из основания насыпи, интенсифицируя осадочный процесс и другие криогенные деформации [10].

Механическая наледная суффозия и выпор грунта — его фильтрационная деформация (изменение структуры вплоть до полного ее разрушения), возникающая под влиянием гидродинамического давления при напорном режиме потока подземных вод, определяется величиной и соотношением диаметров фракции грунта, а также величиной пьезометрического уклона.

При величине напора подземной воды над кровлей сезонной мерзлоты в пределах до 2 м (часто наблюдаемой в натуре) наледному пучению будет подвергаться пласт сезонной мерзлоты мощностью примерно до 0,5 м.

Особенно опасна ситуация, когда при разработке выемки вскрывается напорный источник, свободный напор которого над уровнем основной площадки в на-

чале зимы может достигать значительной величины. В подобном случае на основной площадке выемки развиваются наледи и бугры пучения, иногда вырастающие на большую высоту.

При этом, если не предусмотреть в проекте специальных технических решений, обеспечивающих снятие гидростатического напора подземных вод в зоне земляного полотна, могут возникнуть опасные мерзлотные деформации, несопоставимые по степени опасности с многолетними осадками, вызванными деградацией многолетней мерзлоты на протаивающих грунтах 3-й и 4-й категорий термопросадочности. Например, на участках обводнения у призмы земляного полотна и особенно при фильтрации воды через призму насыпи рекомендуется устраивать водоотжимные бермы из глинистых грунтов или поперечные дренажные траншеи, утепленные на полосах стока для перепуска вод в безнапорном режиме в предзимний период (рис. 2).

Форма и характер развития руслового процесса, которые проявляются, например, на торфяно-моховых марях надпойменной террасы р. Буреи, на участках интенсивно зарастающих русел постоянных водотоков, отличаются меандрированием в пределах террасы (при отсутствии переотложения наносов). Особенности этого явления прослеживаются в пазухах между железной и автомобильной дорогами (рис. 3).

Специфику взаимодействия руслового и мерзлотного процесса определяют благоприятные условия южной зоны вечной мерзлоты, способствующие зарастанию полос стока и интенсивному накоплению торфа в прибрежных зонах водотоков. Развитие кочкарника, подъем густой высокой луговой растительности повышают тепловую отдачу талых грунтов деятельного слоя в толщу подстилающих многолетнемерзлых грунтов и приводят к увеличению застойных озер.

Восстановление мерзлотных условий на участках старых русел водотоков приводит к их поднятию. При этом затопленными оказываются участки местности с угнетенной низкорослой растительностью. Постепенное вытаивание затопленных территорий многолетнемерзлых грунтов приводит к формированию новых русел водотоков. Этот процесс обусловлен восстановлением мерзлотных условий наряду с протаиванием, осадкой грунтовых толщ и затоплением их поверхностными водами, так как природная среда, суровые условия возникновения и развития многолетнемерзлых грунтов остались малоизмененными.

Как показывают наблюдения за подобными объектами, процесс формирования суммарных просадок выглядит примерно следующим образом. Деформации насыпи начинаются с медленного ее погружения в протаявшее основание с последующим разрушением откосов этого грунтового сооружения. Растительный покров выступает в качестве одного из главных факторов, препятствующих интенсивному развитию термоэрозионных процессов. Изменение температуры мерзлых пород и их характерных признаков взаимосвязано с зональностью природных ландшафтов.

Как правило, практически все малые ИССО на Восточном полигоне, включая подходные насыпи, расположены в бессточных озерах. Главная особенность термоэрозионных процессов (например, на участках термокарста), распространенных в районах вечной мерзлоты (см. рис. 1б и рис. 2), — их «заживляемость» своими силами, силами самой природы. Этот процесс обусловлен восстановлением мерзлотных условий наряду с протаиванием, осадкой грунтовых толщ и затоплением их поверхностными водами.



Рис. 3. Нарушение стока вод в пазухе между железной и автомобильной дорогами (298 км Адиканского обхода Буреинского водохранилища железнодорожной линии Известковая — Ургал) (фото авторов)

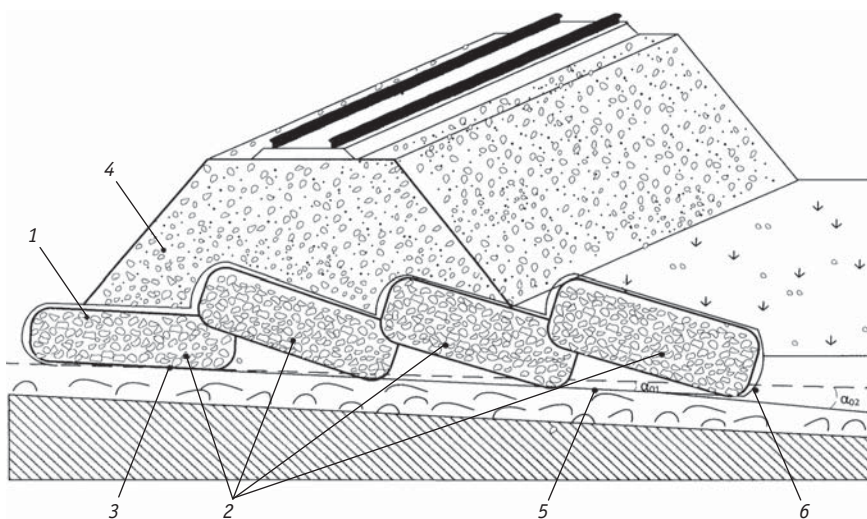


Рис. 4. Организация руслового и поверхностно стока вод на бессточных участках [12]:

- 1 — дренажная секция; 2 — контейнеры с сортированным скальным грунтом;
3 — дорожное полотно; 4 — тело земляного дорожного полотна;
5 — дно выпускного русла стока воды; 6 — геосинтетический материал

При этом по результатам многолетних исследований маревых участков на многолетнемерзлых грунтах установлено, что щелевидные прорезы, нарезанные в слое растительности зарастающего русла и в его оторфованных грунтах, все-таки позволяют обеспечивать сток. Одно из таких конструктивно-технологических решений, разработанных специалистами ДВГУПС, показано на рис. 4.

Конструкция представляет собой комплект туб из скального грунта, сформиро-

ванных путем отсыпки грунта на полотно синтетического нетканого материала (СНМ). Свободными краями полотен СНМ оборачивают грунт в виде туб и закрепляют их скобами по центру.

Для создания продольного уклона на бессточных маревых участках и создания стока от выходного отверстия ИССО в низовую сторону сначала на участке выпуска нарезают щелевидную прорезь, а затем последовательно укладывают тубы. Процесс выполняется следующим обра-

зом: на конец первой тубы, расположенной у отверстия ИССО, укладывают вторую тубу, масса (вес) которой увеличена на 10–15 %, затем на конец второй тубы укладывают тубу с еще большим (на 20–25 %) весом и т.д., что является обязательным условием для каждой последующей тубы. И так — до конца прорези. В результате последовательная укладка туб в общей конструкции создает продольный уклон, обеспечивающий сток воды в выпускном русле на многие десятки лет.

ВЫВОДЫ

1. Многолетняя практика эксплуатации земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах свидетельствует о значительном влиянии растительного покрова на состояние дорожных сооружений в процессе эксплуатации. В частности, угнетенная моховая поверхность всегда «провоцирует» многолетнемерзлые грунты к протаиванию и дальнейшим деформациям земляного полотна.

Сведения об авторах:

Светлана Мирзахановна Жданова,
доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство»
Дальневосточного государственного университета путей сообщения

Оксана Анатольевна Нератова,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство»
Дальневосточного государственного университета путей сообщения

Ирина Евгеньевна Парамонова,
преподаватель кафедры «Строительство» Дальневосточного
государственного университета путей сообщения

2. В руслах и полосах стока постоянных и временных водотоков в зонах многолетней мерзлоты неизбежны нарушения при строительстве и эксплуатации транспортных объектов. Влияние любых нарушений естественных условий стока на многолетнюю мерзлоту требует исследования механизмов развития и взаимодействия эрозионных, русловых и мерзлотных процессов.

3. Опыт авторов по реализации конструктивно-технологических мероприятий, направленных на восстановление естественно-природного режима территорий (и стабилизацию земляного полотна), свидетельствует, что растительный покров оказывает значительное влияние на состояние дорожных сооружений в процессе их эксплуатации на многолетнемерзлых грунтах. Поэтому необходимо дальнейшее изучение воздействия микроклиматических условий на температуру и процессы, которые нарушают фауну полосы отвода северных дорог, расположенных на мерзлых толщах.

Authors information:

Svetlana M. Zhdanova,
DSc in Engineering, Professor of Construction Department,
Far Eastern State Transport University

Oksana A. Neratova,
PhD in Engineering, Associate Professor of Construction Department,
Far Eastern State Transport University

Irina E. Paramonova,
Lecturer of Construction Department,
Far Eastern State Transport University

Литература

1. Мерзлотные гидрогеотермические и гидрогеологические исследования на Востоке СССР. Москва : Наука, 1967. 203 с.
2. Шепелев В. В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск : Гео, 2011. 169 с.
3. Анисимов О. А., Белолуцкая М. А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология. 2006. № 6. С. 15–22. ISSN 0130-2906.
4. Материалы по гидрометрическому режиму автодорожного полотна и его регулированию / С. Л. Бастамов, В. И. Морозкин, Л. А. Преферансова, Н. В. Швейковский // Труды ДорНИИ. 1944. Вып. 2.
5. Жданова С. М., Дыдышко П. И. Усиление земляного полотна на оттаивающих вечномерзлых грунтах : монография. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2005. 137 с.
6. Исследование термовлажностного режима оснований осадочных насыпей в годовом цикле : отчет о НИР (заключительный). Хабаровск, 2002. 26 с.
7. Катен-Ярцев А. С., Жданова С. М. Нетрадиционные аспекты влияния вибродинамической нагрузки на стабильность оснований и откосов земляного полотна : монография. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2005. 102 с.
8. Solving Stabilization Problems Roadbed on Berkakit-Tommot-Yakutsk Railway Line / S. Zhdanova, O. Neratova, A. Edigarian,

References

1. Permafrost hydrogeothermal and hydrogeological research in the East of the USSR. Moscow : Science, 1967. 203 p. (In Russian).
2. Shepelev V. V. Permafrost waters of the cryolithozone. Novosibirsk : Geo, 2011. 169 p. (In Russian).
3. Anisimov O. A., Belolutskaia M. A. Evaluation of the effect of climate change and permafrost degradation on infrastructure in the northern regions of Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2006. No. 6. Pp. 15–22. ISSN 0130-2906. (In Russian).
4. Bastamov S. L., Moroshkin V. I., Preferansova L. A., Shveykovskiy N. V. Materials on the hydrometric regime of the roadway and its regulation. *Scientific works of DorNII*. 1944. Issue 2. (In Russian).
5. Zhdanova S. M., Dydyshko P. I. Reinforcement of the earth bed on thawing permafrost soils : monograph. Khabarovsk : Publishing House of FESTU, 2005. 137 p. (In Russian).
6. Investigation of the thermo-humidity regime of sedimentary embankment bases in the annual cycle (research report). Khabarovsk, 2002. 26 p. (In Russian).
7. Katen-Yartsev A. S., Zhdanova S. M. Non-traditional aspects of the influence of vibrodynamic load on the stability of foundations and slopes of the earth bed : monograph. Khabarovsk : Publishing House of FESTU, 2005. 102 p. (In Russian).
8. Zhdanova S., Neratova O., Edigarian A., Gorshkov N. Solving Stabilization Problems Roadbed on Berkakit-Tommot-Yakutsk Railway Line. *International Scientific Siberian Transport Forum Trans-*

- N. Gorshkov // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021. 2022. Vol. 2. Pp. 1061–1067. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_118.
9. Шполянская Н. А. Вечная мерзлота и глобальные изменения климата. Москва, Ижевск, 2010. 198 с.
 10. Болтрамович С. Ф. Геоморфология. Москва : Академия, 2005. 528 с.
 11. Устройство для выпуска поверхностных и грунтовых вод / В. А. Крапивный, С. М. Жданова, В. В. Воронин, А. Ф. Серенко : пат. 2553738 Российская Федерация. № 2014120892/03; заявл. 23.05.2014; опубл. 20.06.2015, Бюл. № 17.
 12. Водопрпускное сооружение на вечномерзлых грунтах / С. М. Жданова, В. В. Воронин, Ю. В. Акимов, А. В. Мошенжал : пат. 2567248 Российская Федерация. № 2014134359/03; заявл. 21.08.2014; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.
- Siberia* — 2021. 2022. Vol. 2. Pp. 1061–1067. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_118.
9. Shpolyanskaya N. A. Permafrost and global climate change. Moscow, Izhevsk, 2010. 198 p. (In Russian).
 10. Boltramovich S. F. Geomorphology. Moscow : Academy, 2005. 528 p. (In Russian).
 11. Krapivnyy V. A., Zhdanova S. M., Voronin V. V., Serenko A. F. A device for releasing surface and groundwater : patent 2553738 Russian Federation. No. 2014120892/03; filed 23.05.2014; publ. 20.06.2015, Bulletin No. 17. (In Russian).
 12. Zhdanova S. M., Voronin V. V., Akimov Yu. V., Moshenzhal A. V. Culvert on permafrost soils : patent 2567248 Russian Federation. No. 2014134359/03; filed 21.08.2014; publ. 10.11.2015, Bulletin No. 31. (In Russian).

Научная статья

УДК 621.336.2

Увеличение нагрузочной способности полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава

Валерий Викторович Томилов¹, Олег Алексеевич Сидоров¹, Александр Владимирович Тарасенко¹¹Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

Pantograph head increasing current load for mainline electric rolling stock

Valerii V. Tomilov¹, Oleg A. Sidorov¹, Alexander V. Tarasenko¹¹Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация

Усовершенствованные полозы отечественных токоприемников позволяют осуществлять съем тягового тока величиной, на 25–32 % большей по сравнению с типовой конструкцией. В статье представлено техническое решение, существенно увеличивающее нагрузочную способность токоприемника. Задачами выполненного авторами исследования были: усовершенствование математической модели, созданной в Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС) для оценки теплового состояния полоза с учетом применения систем охлаждения, и разработка технического решения конструкции токоприемника с увеличенной нагрузочной способностью. Представленный программный комплекс для теплового расчета полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава позволяет оценить его температуру с учетом использования устройств дополнительного охлаждения контактных вставок. Результаты расчетов дают возможность определить частоту включения системы охлаждения, а также максимальный эффект по критерию снижения температуры и увеличению тягового тока. Предлагаемая конструкция токоприемника содержит управляемую по величине нагрева вставки полоза систему подачи хладагента (углекислоты). Расчеты показывают, что применение представленной активной системы охлаждения полоза позволит увеличить съем тягового тока на 41 %.

Ключевые слова: токоприемник, полоз, тяговый ток, моделирование, электроподвижной состав, охлаждение, электрические характеристики, максимально допустимый длительный ток, тепловая постоянная, угольные вставки

Abstract

Improved panheads of domestic pantograph allow to carry out the removal of traction current of 25–32 % greater in comparison with their standard design. The article presents a technical solution that significantly increases the load capacity of the pantograph. The objectives of the study carried out by the authors were: to improve the mathematical model created at Omsk State Transport University to assess the thermal condition of the skid, taking into account the use of cooling systems, and to develop a technical solution for the design of a pantograph with increased load capacity. The presented software package for thermal calculation of the pantograph head of a mainline electric rolling stock allows to estimate its temperature taking into account the use of additional cooling devices for contact strips. The calculation results allow to determine the frequency of switching on the cooling system, the maximum effect according to the criterion of temperature reduction and increase in traction current. The proposed design of the pantograph contains a system for supplying coolant (carbon dioxide) controlled by the amount of heating of the panhead insert. Calculations show that the use of the presented active panhead cooling system will increase the traction current collection by 41 %.

Keywords: pantograph, pantograph head, traction current, modeling, electric rolling stock, cooling, electrical characteristics, maximum continuous current, thermal constant, carbon strips

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-91-96

В Транспортной стратегии Российской Федерации [1] особое внимание уделяется увеличению объема и скорости транзита грузов, в том числе за счет развития мультимодальных перевозок. Наличие узких мест в единой транспортной сети ограничивает провозные возможности транспортной системы России, препятствуя развитию промышленного потенциала регионов. Железнодорожный транспорт, являясь неотъемлемой частью транспортного комплекса страны, выполняет важнейшие государственные функции, поэтому от его надежной и эффективной работы напрямую зависит реализация основных положений Транспортной стратегии Российской Федерации. Ликвидацию узких мест на железных дорогах необходимо проводить комплексно, сочетая усиление мощности энергетического хозяйства и внедрение современного тягового подвижного состава. Такой подход будет способствовать развитию тяжеловесного движения, увеличению веса и длины поездов, а значит, повышению провозной способности.

Известно, что передача электрической энергии на электроподвижной состав (ЭПС) характеризуется целым рядом сложностей, в том числе вызванных повышенным нагревом контактных вставок токоприемника из-за пропуска через них электрического тока. ГОСТ 32204-2013 регламентирует предельно допустимую температуру вставок при движении ЭПС в зависимости от материала, из которого изготовлены вставки [2]. В условиях увеличения мощности ЭПС для обеспечения безопасности движения весьма важно соблюдать указанные требования. Для этого используются различные системы охлаждения, которые по результатам анализа известных способов повышения нагрузочной способности токоприемников можно разделить на активные и пассивные [3]. Эффективность активных систем определяется характеристиками хладагента, применяемого в системе для принудительной циркуляции, пассивных — характеристиками окружающей среды.

Исследования [4, 5], посвященные охлаждению контактных вставок токоприемника за счет более интенсивного их обдува встречным воздухом, проходящим между вставками и каркасом полоза различного профиля, показали, что эффективность известных отечественных пассивных систем охлаждения не превышает 32 %. В связи с этим наиболее перспективным направлением, позволяющим снизить температуру нагрева полоза токоприемника, является применение активных систем охлаждения (в том числе использующих хладагент), разработкой которых начиная с 1980-х гг. занимаются в Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС) [6, 7]. Для оценки эффективности предлагаемых технических решений в ОмГУПС создана математическая модель расчета теплового состояния полоза токоприемника магистрального ЭПС [8] с учетом изменения положения контактного провода в плане. Отличительной особенностью модели является возможность определять температуру вставок в период работы системы охлаждения (в так называемом нестационарном режиме).

С использованием этой математической модели был выполнен расчет температуры двухполозного токоприемника, оснащенного угольными вставками, при движении ЭПС со скоростью 120 км/ч и равномерном законе распределения плотности зигзага ± 300 мм [9].

Расчетная схема математической модели тепловых процессов на примере одной вставки полоза токоприемника представлена на рис. 1. Вставка сегментирована на несколько i -х элементов шириной по 30 мм. Каждый элемент полоза нагревается тяговым током и обменивается теплом с соседними элементами и окружающей средой.

При выполнении расчетов приняты следующие допущения:

температура внутри «охлаждающего облака» $T_{\text{охл}}$ на все время работы системы охлаждения полоза принимается равной -70 °С [10], температура окружающей среды $T_{\text{окр}}$ составляет $+45$ °С;

влияние ветрового воздействия на токоприемник одинаково во всем рассматриваемом температурном диапазоне.

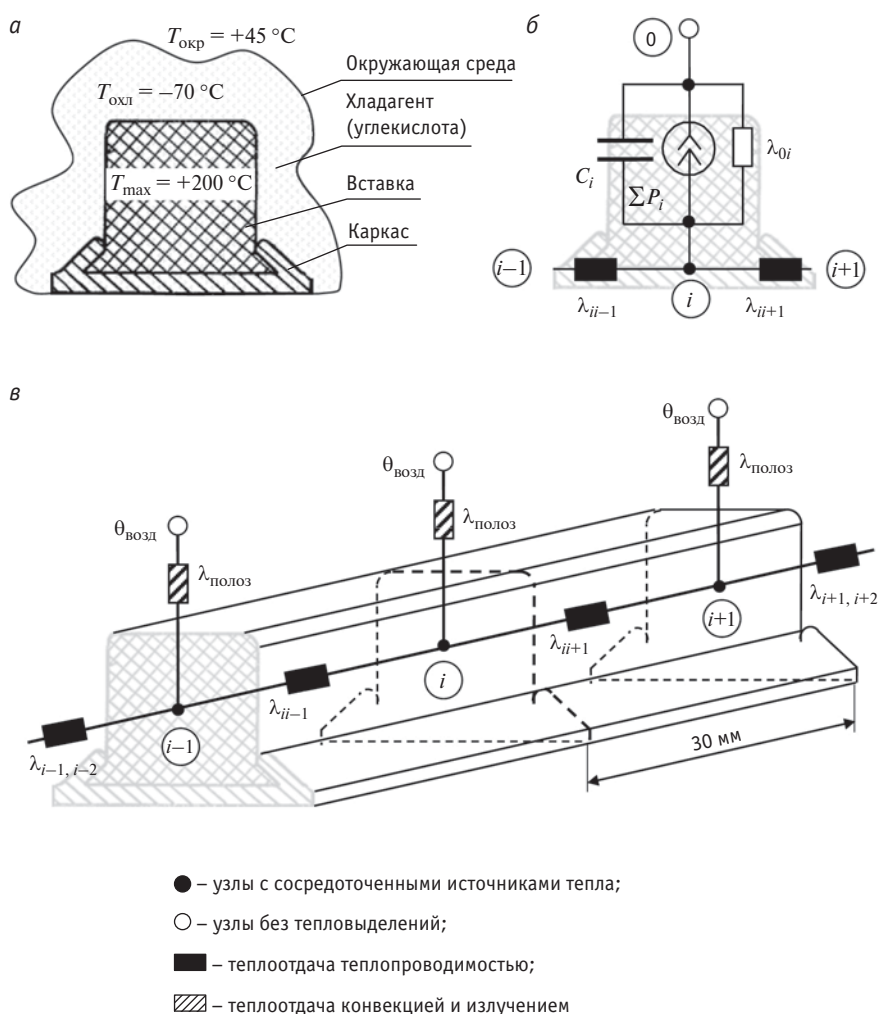


Рис. 1. Расчетная схема теплового состояния вставки токоприемника:
а — температура вставки, «охлаждающего облака» и окружающей среды;
б — тепловая схема замещения i -го элемента для расчета нестационарных режимов;
в — упрощенная картина температур и тепловых связей

Тепловое состояние i -го элемента описывается дифференциальным уравнением теплового баланса

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^{q(j \neq i)} \lambda_{ji} (T_j - T_i) + \sum P_i, \quad (1)$$

где C_i — теплоемкость i -го элемента полоза; T_i — температура i -го элемента; T_j — температура одного из соседних элементов j ; q — количество тел, связанных в тепловом отношении с рассматриваемым элементом i ; λ_{ji} — теплоотдача от одного из соседних элементов j к данному элементу i (см. рис. 1б); $\sum P_i$ —

потери мощности в данном элементе i ; t — расчетное время.

Максимальная температура нагрева элементов токоприемника — это не только определяющая величина для его максимально допустимого длительного тока в соответствии со стандартом [2], но также показатель износостойкости контактной вставки. На рис. 2 приведены результаты расчета максимальной температуры токоприемника при сьеме тока 4000 А двумя полозами с угольными вставками [5]. Моделирование выполнено с помощью разработанного в ОмГУПС программного комплекса теплового расчета полоза токоприемника [11] для трех режимов:

1) стандартного режима нагрева вставки полоза до максимально допустимой температуры $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с 0 до 7 мин);

2) режима охлаждения полоза (с 7 по 8 мин) с момента достижения максимально допустимого значения температуры вставки в предыдущем режиме;

3) режима нагрева вставки после прекращения работы системы охлаждения (с 8 мин).

Из рис. 2 видно, что охлаждение графитовой вставки углекислотой в течение $\Delta t_2 = 1$ мин (режим 2) позволяет снизить ее температуру с 200 до $166\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. на 17% от ее максимально допустимого значения нагрева. После прекращения охлаждения температура вновь возрастает до максимально допустимой за период, равный $\Delta t_1 = 4$ мин (режим 3). Таким образом, чтобы исключить превышение максимально допустимой температуры вставки, можно организовать циклический режим работы активной системы охлаждения, при котором она каждые 5 мин включается на одну минуту.

Время достижения установившихся значений температуры при нагреве вставки (тепловая постоянная времени) и при ее охлаждении одинаково и определяется теплоемкостью полоза. Однако эффективность охлаждения при максимальных значениях температуры вставки выше, что важно для расхода хладагента. Скорость снижения температуры вставки $\Delta T/\Delta t_2$ в начале режима 2 существенно выше, чем скорость увеличения $\Delta T/\Delta t_1$ в начале режима 3.

Программный комплекс [11] позволяет также оценить не только максимальное значение температуры полоза, но и ее распределение вдоль всей конструкции полоза, которое зависит от распределения зигзага контактного провода и неравномерности контактного нажатия токоприемника на контактную подвеску [8]. Результаты расчета для трех переходных режимов при вышеуказанных условиях приведены на рис. 3.

Оценить эффективность активной системы охлаждения токоприемника можно по двум критериям — снижению максимальной температуры нагрева вставки и увеличению максимально допустимого длительного тока.

В обоих случаях целесообразно определять максимальный эффект при номинальных исходных значениях тягового тока, встречного ветра и температуры окружающей среды, например, как при установившемся значении максимально допустимой температуры $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в режиме 1 (рис. 4).

В режиме 2 (охлаждение) уменьшение температуры нагрева вставки полоза с 200 до $86\text{ }^{\circ}\text{C}$ при токе 3900 A (см. рис. 4) дает максимальный эффект по критерию снижения температуры вставки, который составляет 57% .

При увеличении тока до 5500 A и при непрерывно работающей активной системе охлаждения полоза (режим 3 на рис. 4) максимальное установившееся значение его температуры, согласно расчетам, равно $198\text{ }^{\circ}\text{C}$, а эффективность системы охлаждения по увеличению тока составляет 41% .

Расчетные нагрузочные характеристики полоза токоприемника без охлаждения и с непрерывно работающей системой охлаждения и постоянной подачей хладагента представлены на рис. 5.

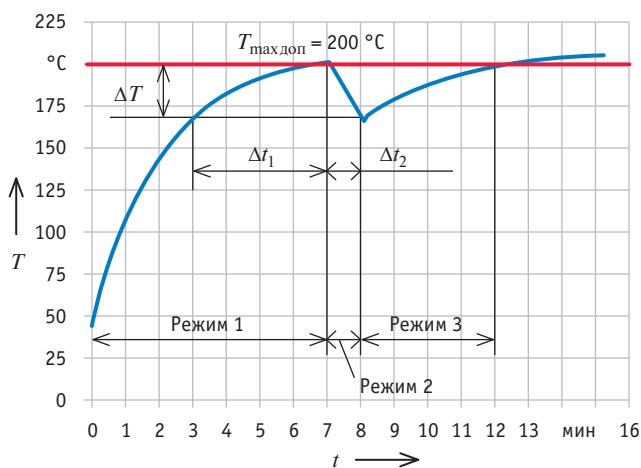


Рис. 2. График нагрева вставки полоза токоприемника с циклически работающей системой охлаждения

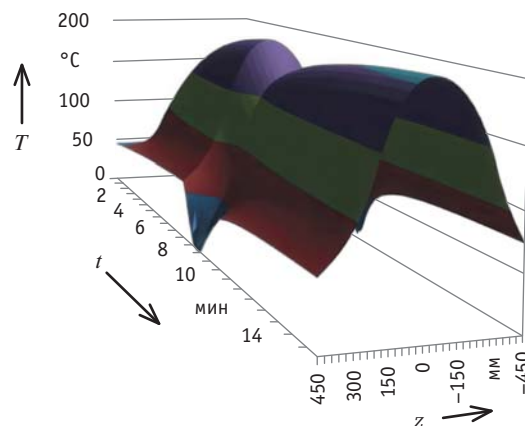


Рис. 3. График изменения распределения температуры по длине z вставки полоза токоприемника, оснащенного системой охлаждения

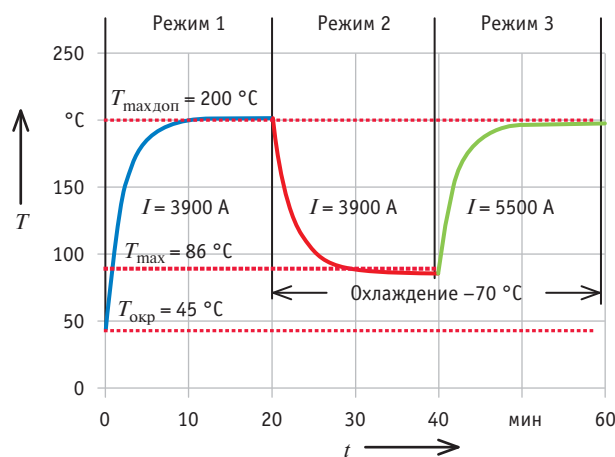


Рис. 4. График максимального нагрева полоза токоприемника в номинальных режимах работы при охлаждении

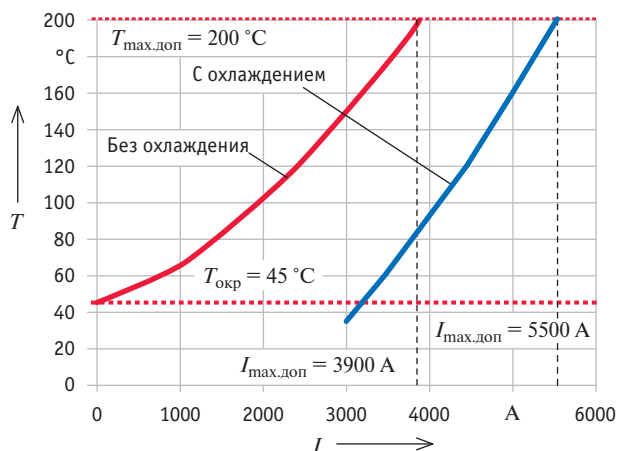


Рис. 5. Расчетные нагрузочные характеристики полоза токоприемника

Технически рассматриваемое решение активной системы охлаждения с использованием хладагента реализовано в конструкции токоприемника ЭПС, предложенной в ОмГУПС (рис. 6) [12].

Принцип работы системы охлаждения состоит в том, что при достижении вставкой полоза 1 температуры, установленной на срабатывание системы охлаждения и фиксируемой датчиком 2, регулятор 3 активирует управляемый клапан 4 и посредством патрубка 5 подает хладагент (углекислоту), находящийся под давлением в емкости 6, во внутреннюю полость 7 каркаса 8, а далее при помощи форсунок 9 — на стенки вставки 1. Испарение углекислоты сопровождается снижением температуры стенок вставок. Жидкая двуокись углерода при атмосферном

давлении превращается в газ и снег с температурой $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, которые охлаждают стенки вставок токоприемника [13].

Предлагаемое решение позволяет увеличить нагрузочные характеристики токоприемников магистрального ЭПС для развития тяжеловесного движения, увеличения веса и длины поездов, внедрения новых серий тягового подвижного состава, что соответствует принципам Транспортной стратегии Российской Федерации [1].

ВЫВОДЫ

1. При возрастании токовых нагрузок на токоприемник, которые могут привести к недопустимому нагреву его элементов (в первую очередь вставок), применение различных систем охлаждения становится важным и необходимым условием для обеспечения работоспособности токоприемника ЭПС. Активные системы охлаждения по критериям минимальной температуры нагрева вставки и максимально возможному снимаемому току более эффективны по сравнению с пассивными системами, что подтверждается проведенными расчетами.

2. Разработанная математическая модель и предложенный программный комплекс для теплового расчета полоза токоприемника позволяют исследовать нестационарные (переходные) нагрузочные режимы по току, в том числе при охлаждении вставок, и временные характеристики достижения установившихся температур, которые характеризуют расход хладагента.

3. Применение токоприемников, оснащенных системой автоматического активного охлаждения и позволяющих надежно снимать тяговый ток свыше 4000 А, отвечает принципам расширения узких мест, изложенным в Транспортной стратегии Российской Федерации, исключая ограничение пропускной способности со стороны ЭПС.

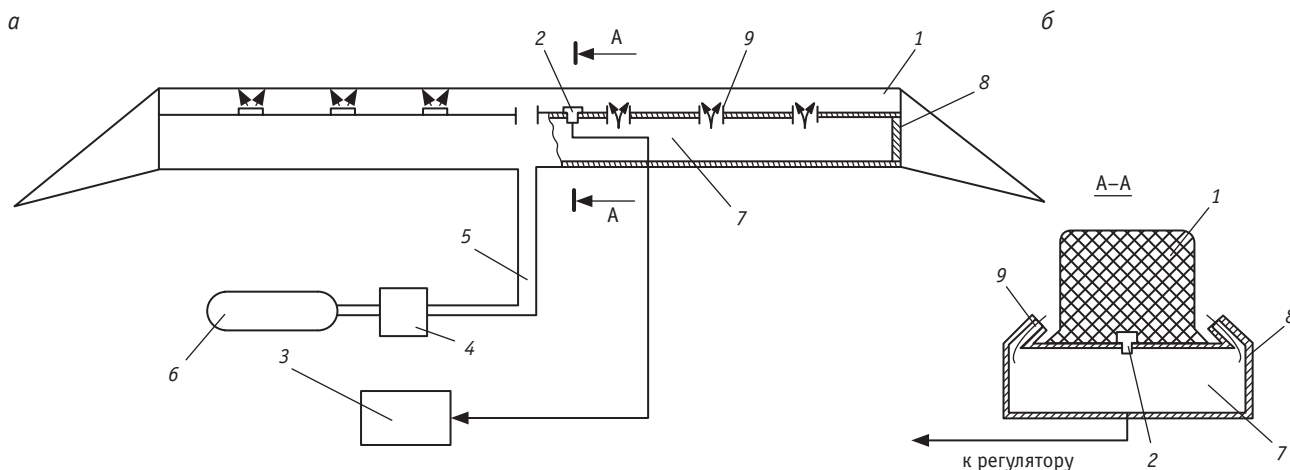


Рис. 6. Схема токоприемника электроподвижного состава:
а — общий вид; б — разрез полоза

Сведения об авторах:

Валерий Викторович Томилов,

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроснабжение железнодорожного транспорта»
Омского государственного университета путей сообщения

Олег Алексеевич Сидоров, доктор технических наук,
профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного
транспорта» Омского государственного университета путей сообщения

Александр Владимирович Тарасенко,

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроснабжение железнодорожного транспорта»
Омского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Valerii V. Tomilov,

PhD in Engineering, Associate Professor
of Power Supply of Railway Transport Department,
Omsk State Transport University

Oleg A. Sidorov,

DSc in Engineering, Professor of Power Supply of Railway
Transport Department, Omsk State Transport University

Alexander V. Tarasenko,

PhD in Engineering, Associate Professor
of Power Supply of Railway Transport Department,
Omsk State Transport University

Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Москва : Центрмг, 2025. 256 с.
2. ГОСТ 32204–2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 24 с.
3. Сидоров О. А., Смердин А. Н., Томилов В. В. Исследование температуры нагрева полоза токоприемника и способы ее снижения // Известия Транссиба. 2017. № 4 (32). С. 25–34. ISSN 2220-4245.
4. Увеличение нагрузочной способности токоприемников / И. А. Беляев, Е. А. Вологин, Ю. Е. Купцов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 1974. № 8. С. 51–54. ISSN 0044-4448.
5. Томилов В. В., Утепбергенова С. М., Сидоров О. А. Математическая модель системы охлаждения полоза токоприемника в режиме движения магистрального электроподвижного состава // Транспорт Урала. 2020. № 2 (65). С. 86–92. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-86-92.
6. Лисунов В. Н., Поздняков О. И., Усманов Ю. А. Токоприемник с регулируемой нагрузочной способностью // Тезисы докладов научно-практической конференции кафедр Омского института инженеров железнодорожного транспорта, посвященной 60-летию ОМИИТ. Омск : ОМИИТ, 1990. С. 96–97.
7. Токоприемник электроподвижного состава / О. И. Поздняков, В. И. Поздняков : пат. 1553415 СССР. № 4384931; заявл. 29.02.1988; опубл. 30.03.1990, Бюл. № 12.
8. Утепбергенова С. М., Томилов В. В., Сидоров О. А. Методика расчета теплового состояния полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава с учетом изменения положения контактного провода в плане // Известия Транссиба. 2019. № 4 (40). С. 43–53. ISSN 2220-4245.
9. Смердин А. Н., Томилов В. В., Павлов В. М. Совершенствование методики определения нагрузочных показателей токоприемников магистрального электроподвижного состава // Известия Транссиба. 2019. № 3 (39). С. 99–110. ISSN 2220-4245.
10. Томилов В. В., Аркашев А. Е. Повышение надежности работы токоприемников с пневматическими резинокордными элементами в условиях низких температур // Транспорт Урала. 2009. № 4 (23). С. 101–103. ISSN 1815-9400.

References

1. Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 No. 3363-p. Moscow, 2025. 256 p. (In Russian).
2. GOST 32204–2013. Current collectors of railway electric rolling stock. General specifications. Moscow : Standardinform, 2014. 24 p. (In Russian).
3. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Tomilov V. V. Research of pantograph panhead heating temperature and its reduction methods. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2017. No. 4 (32). Pp. 25–34. ISSN 2220-4245. (In Russian).
4. Belyaev I. A., Volgin E. A., Kuptsov Yu. E. [et al.]. Increasing the load capacity of pantographs. *Railway Transport*. 1974. No. 8. Pp. 51–54. ISSN 0044-4448. (In Russian).
5. Tomilov V. V., Utepbergenova S. M., Sidorov O. A. Pantograph cooling system mathematical model during motion of the railway electric transport. *Transport of the Urals*. 2020. No. 2 (65). Pp. 86–92. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-86-92. (In Russian).
6. Lisunov V. N., Pozdnyakov O. I., Usmanov Yu. A. Pantograph with adjustable load function. *Proceedings of scientific and practical conference of the departments of the Omsk Institute of Railway Engineers, dedicated to the 60th anniversary of the Omsk Institute of Railway Engineers*. Omsk : Omsk Institute of Railway Engineers, 1990. Pp. 96–97. (In Russian).
7. Pozdnyakov O. I., Pozdnyakov V. I. Electric rolling stock pantograph : patent 1553415 USSR. No. 4384931; filed 29.02.1988; publ. 30.03.1990, Bulletin No. 12. (In Russian).
8. Utepbergenova S. M., Tomilov V. V., Sidorov O. A. Method for the heat state calculating of pantograph head of a mainline electric rolling stock taking account the contact wire zigzag. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2019. No. 4 (40). Pp. 43–53. ISSN 2220-4245. (In Russian).
9. Smerdin A. N., Tomilov V. V., Pavlov V. M. Improvement methods of checking of electrical duty indicators of rolling stocks pantographs. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2019. No. 3 (39). Pp. 99–110. ISSN 2220-4245. (In Russian).
10. Tomilov V. V., Arkashev A. E. Improvement of operational reliability of current collectors with pneumatic rubber-cord elements in conditions of low temperatures. *Transport of the Urals*. 2009. No. 4 (23). Pp. 101–103. ISSN 1815-9400. (In Russian).

11. Программный комплекс для теплового расчета полоза токоприемника / В. В. Томилов, О. А. Сидоров, В. В. Синяков : программа для ЭВМ 2023617295 Российская Федерация. № 2023615888, заявл. 28.03.2023, опубл. 07.04.2023, Бюл. № 4.
12. Токоприемник электроподвижного состава / В. В. Томилов, О. А. Сидоров, В. В. Синяков, И. Е. Чертков : пат. на полезную модель 2814121 Российская Федерация. № 2023118830; заявл. 14.07.2023; опубл. 22.02.2024, Бюл. № 6.
13. ГОСТ 8050-85. Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2006. 24 с.

11. Tomilov V. V., Sidorov O. A., Sinyakov V. V. Software package for thermal calculation of pantograph skid : computer program 2023617295 Russian Federation. No. 2023615888, filed 28.03.2023, publ. 07.04.2023, Bulletin No. 4. (In Russian).
12. Tomilov V. V., Sidorov O. A., Sinyakov V. V., Chertkov I. E. Electric rolling stock pantograph : patent for utility model 2814121 Russian Federation. No. 2023118830; filed 14.07.2023; publ. 22.02.2024, Bulletin No. 6. (In Russian).
13. GOST 8050-85. Gaseous and liquid carbon dioxide. Specifications. Moscow : Standardinform, 2006. 24 p. (In Russian).

Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

Назначение платежа: «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67 или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusknikov-urgups>

Извещение	<p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2025 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2025 г.</p>

Подписка на 2026 год.
Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

✂

АБОНЕМЕНТ

на

газету

 журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2026 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на

газету

 журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Стои-мость

подписки

переадресовки

руб. коп.

руб. коп.

Количество комплектов:

на 2026 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)