

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ТЕРМИНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПОЕЗДОВ
НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПОРЯДКА ВЫПОЛНЕНИЯ
ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ**

**РЕЛЯЦИОННАЯ СТРАТЕГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
СОХРАННОСТИ ВАГОННОГО ПАРКА**

**МОДЕРНИЗАЦИЯ КОЛЕСНО-МОТОРНЫХ БЛОКОВ ТЕПЛОВЗОВ
В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ
ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОРБЦИОННЫХ КОНДИЦИОНЕРОВ
НА АВТОМОБИЛЯХ С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**



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. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с. н. с., Екатеринбург
12. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
13. Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
15. Тушин Николай Андреевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
16. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
17. 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. Ledyev Alexander Petrovich, DSc, professor, St. Petersburg
9. Loktev Alexey Alexeevich, DSc, professor, Moscow
10. Nevolin Dmitriy Germanovich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
11. Rumyantsev Sergey Alexeevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
12. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
13. Sirina Nina Fridrikhovna, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Tushin Nikolay Andreevich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
16. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
17. Yakunin Nikolay Nikolaevich, DSc, professor, Orenburg

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

П. А. Козлов, В. П. Козлова, О. В. Осокин, Н. А. Тушин.
0 технологии расчета систем железнодорожного транспорта 3

О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, Д. В. Васильев.
Совершенствование технологии терминальной обработки контейнерных поездов на основе оптимизации порядка выполнения перегрузочных операций 10

А. А. Локтев, В. В. Королев, О. И. Поддаева, А. Н. Федосова, П. С. Чурин.
Ветровые воздействия на объекты транспортной инфраструктуры, относящиеся к сооружениям повышенного уровня ответственности 16

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

Н. Ф. Сирина, В. Б. Свердлов.
Реляционная стратегия обеспечения сохранности вагонного парка 22

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

Д. Ж. Сайфутдинов, Г. А. Тимофеева.
Расчет гравитационной модели железнодорожных перевозок в России по данным базы о продаже билетов 28

И. Л. Васильев, К. М. Тимухин.
Об изучении истории актов незаконного вмешательства при подготовке специалистов в сфере управления процессами перевозок 34

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Д. Н. Шевченко.
Модернизация колесно-моторных блоков тепловозов в условиях импортозамещения 40

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин.
Корреляционный приемник с квадратурными каналами для автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН 49

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А. А. Локтев, В. В. Королев, И. В. Шишкина, О. И. Поддаева, Ю. С. Грибач.
Исследование мостового перехода высокоскоростной железнодорожной магистрали при аэродинамических воздействиях 55

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Л. В. Плотников, И. А. Калинин, В. А. Следнев, В. А. Шурупов.
Газодинамический анализ процесса впуска с разными конструкциями канала в головке блока цилиндров в автомобильном двигателе 60

Н. В. Буланов, Е. И. Авксентьева, В. Г. Бондаренко.
Использование сорбционных кондиционеров на автомобилях с двигателями внутреннего сгорания 67

Е. С. Козин. Система поддержки принятия решений по управлению станцией технического обслуживания автомобилей 73

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

Н. О. Фролов, Е. М. Елькин. Обзор известных локомотивных систем машинного зрения и их совершенствование за счет обеспечения динамического освещения пути 78

Д. Л. Худояров, Е. А. Григорьев.
Особенности тяговых свойств электровозов серии 2ЭС6 82

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

А. А. Кузнецов, В. В. Харламов, М. А. Волчанина.
Повышение эффективности диагностирования изоляции высоковольтных вводов трехфазных трансформаторов 86

А. В. Паранин, Д. А. Ефимов, А. Б. Батрашов.
Взаимодействие токоприемника высокоскоростного подвижного состава и контактной подвески в различных условиях эксплуатации 94

И. А. Юшкова, Н. В. Крапивин. Автоматизация обработки заявок по обслуживанию устройств электроснабжения железных дорог путем внедрения цифровых технологий 100

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

P. A. Kozlov, V. P. Kozlova, O. V. Osokin, N. A. Tushin.
On technology for calculation of systems of railway transport 3

O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva, D. V. Vasilyev.
Improvement of technology for terminal processing of container trains on the basis of optimization of execution order for transshipment operations 10

A. A. Loktev, V. V. Korolev, O. I. Poddaeva, A. N. Fedosova, P. S. Churin.
Wind influence on transport infrastructure objects related to constructions of high level of responsibility 16

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

N. F. Sirina, V. B. Sverdllov.
Relational strategy of car fleet safety assurance 22

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

D. Zh. Sayfutdinov, G. A. Timofeeva.
Calculation of a gravity model of railway transportation in Russia according to ticket sales database 28

I. L. Vasilyev, K. M. Timukhin.
On study of history of unlawful interference acts at training of specialists in sphere of train management 34

ROLLING STOCK AND TRACTION

A. S. Kosmodamianskiy, V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov, D. N. Shevchenko.
Modernization of wheels and motors units for diesel locomotives in conditions of import substitution 40

AUTOMATION, TELEMECHANICS AND COMMUNICATION

R. R. Yusupov, A. S. Khokhrin.
Correlation receiver with quadrature channels for continuously working automatic cab signalling 49

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

A. A. Loktev, V. V. Korolev, I. V. Shishkina, O. I. Poddaeva, Yu. S. Gribach.
Study of river crossing of high-speed railway at aerodynamic influence 55

MOTOR TRANSPORT

L. V. Plotnikov, I. A. Kalinin, V. A. Slednev, V. A. Shurupov.
Gas dynamic analysis of admission process in automobile engine with various designs of channel in head of cylinder block 60

N. V. Bulanov, E. I. Avksentyeva, V. G. Bondarenko.
Use of sorption conditioners on automobiles with internal combustion engines 67

E. S. Kozin. Decision support system for control of automobile service station 73

ELECTRIC TRACTION

N. O. Frolov, E. M. Elkin.
Overview of known locomotive systems of computer vision and their improvement by provision of dynamic lighting of track 78

D. L. Khudoyarov, E. A. Grigoryev.
Peculiarities of haulage performance of 2ES6 electric locomotives 82

ELECTRIC SUPPLY

A. A. Kuznetsov, V. V. Kharlamov, M. A. Volchanina.
Increase of efficiency of insulation diagnostics for high-voltage bushing of three-phase transformers 86

A. V. Paranin, D. A. Efimov, A. B. Batrashov.
Interaction of current collector of high-speed rolling stock and catenary suspension in various conditions of operation 94

I. A. Yushkova, N. V. Krapivin.
Automation of processing of requests on maintenance of railway power supply facilities by application of digital technologies 100

УДК 656.222

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

**Валерия Петровна Козлова, доктор экономических наук, главный специалист научно-исследовательской фирмы
«Аналитические и управляющие системы на транспорте «Транспортный алгоритм», Москва, Россия,**

**Олег Викторович Осокин, доктор технических наук, директор научно-исследовательской фирмы «Аналитические
и управляющие системы на транспорте «Транспортный алгоритм», Москва, Россия,**

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

О ТЕХНОЛОГИИ РАСЧЕТА СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

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

**Valeriya Petrovna Kozlova, DSc in Economics, Principal Specialist of Research company
«Analytical and controlling systems on transport traffic accidents algorithm», Moscow, Russia,**

**Oleg Viktorovich Osokin, DSc in Engineering, Director of Research company
«Analytical and controlling systems on transport traffic accidents algorithm», Moscow, Russia,**

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

On technology for calculation of systems of railway transport

Аннотация

Рассматриваются принципы построения методов расчета железнодорожных станций и полигонов. Показано, что за теоретическую основу построения методов в существующих инструкциях принималась, по сути, логическая правдоподобность. Предлагается считать научной основой системный подход в оригинальной постановке. Система рассматривается как общеприродная форма построения организованной материи, позволяющая ей устойчиво функционировать в среде с дезорганизацией. Важным свойством системы признается адаптивность, когда структурные элементы вступают в динамическое взаимодействие. Утверждается, что в моделях расчета элементу присваивается (осознанно или нет) некоторая функциональная роль, которая часто не соответствует реальной роли. Соответствие этих ролей принимается как основной критерий корректности метода расчета. Но функциональная роль определяется не только свойствами элемента, но и характером его взаимодействия с другими элементами. Поэтому изолированно рассчитывать пропускную способность структурных элементов нельзя. На конкретных примерах показано, что это возможно только в целостной модели всей системы. Сделан вывод, что основным методом расчета систем железнодорожного транспорта следует считать имитационное моделирование.

Ключевые слова: система, станция, полигон, расчет, функция, пропускная способность.

Abstract

The paper considers principles of creating methods for calculation of railway stations and polygons. It shows that methods in existing instructions are theoretically based, in the essence, on logical soundness. The authors propose to consider a system approach in original statement as a scientific basis. A system is considered as a generally natural form of construction of organized matter which allows steadily functioning in environment with disorganization. An important property of the system is adaptability when structural elements enter a dynamic interaction. The authors state that in calculation models an element is assigned (consciously or not) a certain functional role that often doesn't match a real role. Accordance of these roles is assumed as a main criterion of correctness of a calculation method. But the functional role is determined not only by properties of the element but also by a character of its interaction with other elements. That is why you can't calculate a capacity of structural elements separately. The authors show on specific examples that it is possible to calculate the capacity only in a comprehensive model of the whole system. As a result, it is necessary to consider simulation modeling as a main method for calculation of systems of railway transport.

Keywords: system, station, polygon, calculation, function, capacity.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-3-9

ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной экономики основная задача грузового транспорта заключается в обеспечении экономических связей страны надежными и эффективными транспортными сообщениями. Для этого нужна развитая транспортная инфраструктура. Поскольку в России железнодорожная сеть имеет целый ряд узких мест, то планируется ее интенсивное развитие, на что потребуются очень крупные инвестиции. Соответственно важное значение имеет грамотная оценка эффективности проектных решений. А для этого необходимы корректные методы расчета железнодорожных станций, узлов и полигонов.

Данной проблеме посвящено много исследований в России [1–4] и в других странах [5–9].

СУЩЕСТВУЮЩЕЕ ПОЛОЖЕНИЕ

В России методы расчета используются в течение десятилетий, основные подходы сформировались давно и существенной корректировке практически не подвергались. Технология расчета закреплена в главном нормативном документе [10]. Теоретической основой при разработке методов являлась, по сути, логическая правдоподобность. Обнаруженная впоследствии некорректность ряда исходных положений долго не замечалась, потому что не было надежного аппарата проверки. Теперь такой аппарат есть — имитационное моделирование.

Постулат 1. Отдельные части станции можно и следует рассчитывать по отдельности, не учитывая эффект взаимодействия. В инструкции [10, п. 2.1.4] утверждается, что «пропускная способность какого-либо устройства может быть правильно установлена только в том случае, если при расчете не учитывается возможное ее ограничение пропускной способностью соседних устройств». И далее: «...порядок расчета пропускной и перерабатывающей способности станции устанавливается следующий:

— *определяется пропускная (перерабатывающая) способность отдельных станционных устройств;*

— *устанавливается результирующая пропускная способность станции отдельно по каждому из примыкающих направлений, соответствующая устройству, имеющему наименьшую ее величину»* [10, п. 2.1.7].

По-видимому, логика здесь такая. Пусть соединены две трубы разного диаметра. Свойства их при соединении не меняются. Общую пропускную способность будет определять труба с меньшим диаметром. Но при взаимодействии парка и горловины свойства обеих частей существенно меняются. Уровень фактического использования горловины зависит от работы парка, и наоборот.

Постулат 2. Горловину может представлять одна, наиболее загруженная стрелка. «При этом больше будет уверенность в том, что пропускная способность горловины определена действительно по наиболее загруженной стрелке» [10, с. 82]. Ниже будет показано, что отдельная стрелка не может представлять всю горловину.

Постулат 3. Структурный элемент может быть загружен на 100 %. В инструкции [10, с. 80] считается, что, скажем, при занятости наиболее загруженной стрелки на 70 % горловина

имеет резерв пропускной способности в 30 %. Расчеты на моделях показывают, что это не так.

Расчет станции поэлементно вызывает большие сомнения. В ряде публикаций утверждается, что ее надо рассматривать как целое. Например, в [5] говорится о разработке модели для решения проблемы управления задержками, которая включает в себя пропускную способность станций. В [8] подчеркивается, что структурные элементы станции должны рассматриваться только как ее составные части.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

В качестве теоретической основы для построения методов расчета предлагается системный подход.

Системным исследованиям посвящено много публикаций. Само слово «система» стало весьма распространенным термином с самым широким толкованием. Приведем некоторые примеры.

Развитие системных исследований в целом до сих пор не опиралось на какую-то общепринятую теоретическую концепцию. И естественно, что развитие системных исследований принесло весьма скромные результаты.

Слово «система» стало удобным термином: это и Солнечная система, и система управления, и система показателей, и система линейных уравнений, и др. Для такого разброса понятий вряд ли можно создать общую содержательную теорию систем. Предлагается новый подход.

Определение 1. «Система — это форма построения организованной материи, позволяющая ей устойчиво существовать в среде с дезорганизацией». Эта форма выработана природой. Что же это за форма?

Определение 2. «Система — это целостное образование с активным самоподдержанием, при этом ее элементы тоже являются системами».

Здесь важны три фактора.

Первый. Система — это некоторое целое с параметрами, которые представляют его как целое. То есть систему характеризуют системные параметры.

Второй. Активное самоподдержание, которое сохраняет системные параметры в требуемых границах при внешних возмущающих воздействиях.

Третий. Элементы системы тоже являются системами, а значит, имеют собственные системные параметры и активные механизмы их поддержания.

Здесь возникает противоречие. С одной стороны, элементы должны быть способны гибко менять свою технологию для поддержания системных параметров надсистемы, а с другой — уметь поддерживать собственные системные параметры при возмущениях извне. Это диалектическое противоречие, которое описывается философским законом единства и борьбы противоположностей. И нужна мера в развитии этих противоположных способностей, своего рода гармония. Мера эта будет различной в системах разной природы.

Во многих публикациях главной отличительной чертой системы считается целостность. Аристотель дал такое определение: «Целое — это когда нельзя никакой части отнять и никакой прибавить». Но и велосипед, и мясорубка являются

тогда «целыми». Важно не просто «целое», а только то, которое имеет самоподдержание. Без этого в природе не может существовать никакое «целое».

Активное самоподдержание обеспечивает адаптивность, или адаптивная технология в производственных системах. Адаптивность порождает так называемые *динамические резервы* [11]. Они замещают по функции резервы статические, фактические. Совокупность динамических резервов и обеспечивает устойчивость системы в изменяющейся среде.

Но адаптивность предполагает изменяемое взаимодействие структурных элементов между собой. А значит, функциональность структурного элемента будут определять не только его собственные свойства, но и характер его взаимодействия с другими элементами.

При выборе расчетного элемента в модели ему присваивается осознанно (а чаще неосознанно) некоторая функциональная роль.

Предлагается основной критерий корректности метода расчета — *функциональные роли расчетного элемента в действительности и в модели должны совпадать*. Минимальные функциональные роли на станции — либо технологическая операция (в парках), либо законченное передвижение (в горловинах). С этой позиции и следует рассмотреть основные методы расчета.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ

Расчет пропускной способности парков

В нормативном документе [10] говорится следующее:

«*Пропускная способность станционных устройств определяется числом поездов*

$$n = \frac{1440m - \sum T_{\text{пост}}}{t_{\text{зан}}}$$

где m — число параллельно работающих однородных элементов рассчитываемого устройства (например, число путей в парке);

$t_{\text{зан}}$ — время занятия пути одним поездом;

$\sum T_{\text{пост}}$ — время занятия устройства в течение суток выполнением постоянных операций, мин».

Собственно, эта формула существует в учебниках с 1930-х гг. и переходит из книги в книгу с некоторыми поправками.

В приведенной формуле неявно подразумевается функциональная роль пути, т.е. некоторого канала обслуживания, работающего изолированно (рис. 1).

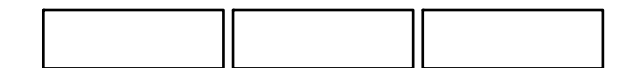


Рис. 1. Функциональная роль пути в методе расчета

На самом деле реальная функциональная роль пути более сложная. Возникает занятость его разнообразными задержками, которые нельзя определить при изолированном рассмотрении (рис. 2).

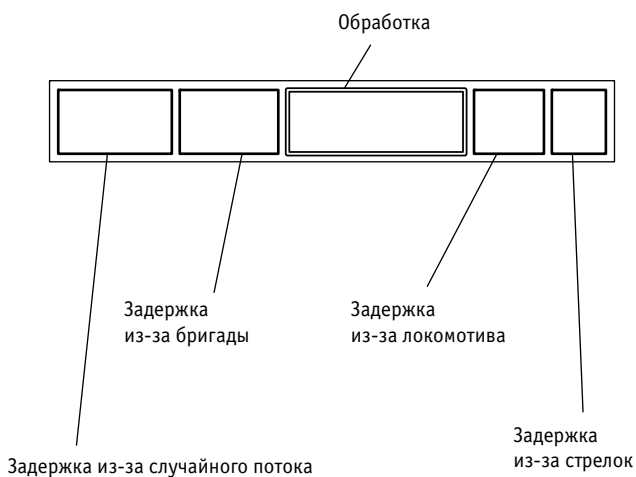


Рис. 2. Реальная функциональная роль пути

Но есть и еще один аспект. Каналами обслуживания можно считать только те пути, на которых работают бригады обслуживания. Остальные пути — резервные. Так что пропускная способность парка рассчитывается неверно.

Расчет пропускной способности горловины

В существующем методе расчета предполагается, что пропускная способность наиболее загруженной стрелки (при 100 %-й ее занятости) и горловины — это одно и то же.

Но даже наиболее загруженную стрелку использовать на 100 % невозможно. Вот что показывают многочисленные расчеты на моделях станций (рис. 3).

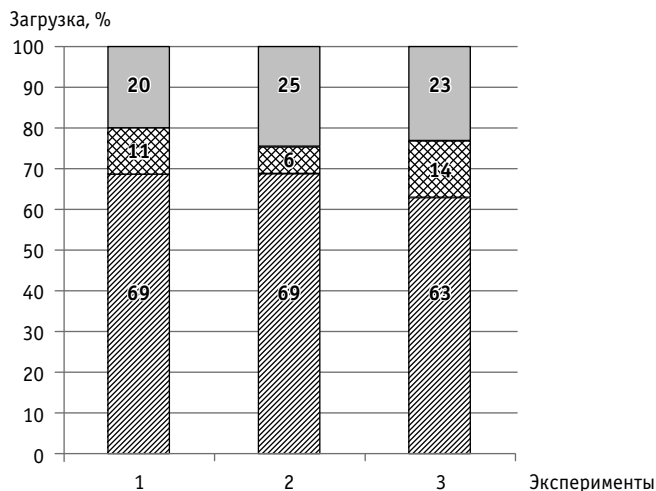


Рис. 3. Полезная загрузка стрелок и структурно-функциональные потери:

- — структурные потери; ▨ — технологические потери;
- ▤ — загрузка стрелок с технологическими операциями

Возникают структурные и функциональные потери. Структурные — это дополнительные задержки в операции из-за последующих стрелок при свободности наиболее загруженной. Функциональные потери возникают из-за отсутствия готовой

технологической операции (например, в данное время нет свободного локомотива). От величины функциональных задержек будет зависеть уровень использования горловины, вот почему горловину нельзя рассчитывать отдельно от парка.

Кроме того, самая загруженная стрелка не всегда вызывает наибольшие задержки. Расчеты показывают, что между этими двумя параметрами нет прямой зависимости (рис. 4).

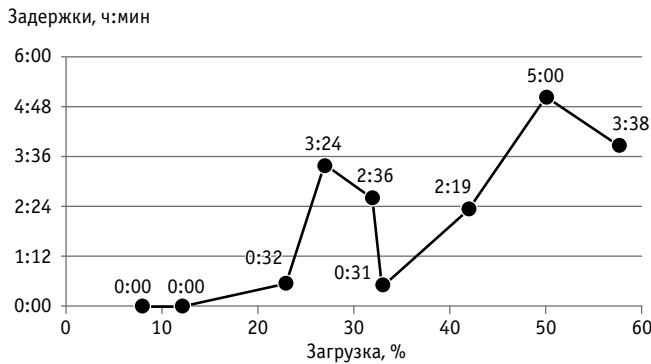


Рис. 4. Зависимость задержек от загрузки стрелок на одной из станций

Методическое руководство [12] рекомендует определять задержки в горловине следующим образом:

«время задержек у пересечений маршрутов в одном уровне»

$$T = \frac{n_1 n_2 (t_1 + t_2)^2}{2 \cdot 1440}$$

где n_1, n_2 — размеры передвижений по соответствующим маршрутам за сутки;

t_1 и t_2 — время занятия пересечения поездом соответствующего маршрута, мин;

1440 — число минут в сутках».

Проверка на имитационных моделях показала, что задержки из-за стрелок рассчитывать по приведенной формуле нельзя (рис. 5). Как оказалось, задержка зависит не только от величины, но и от характера загрузки: длинными или короткими отрезками времени, равномерно или неравномерно.

Итак, отдельная стрелка не может структурно обеспечить законченное передвижение. В методе расчета ей присваивается функциональная роль, которой нет в действительности. Метод некорректен.

РАСЧЕТ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

При нормативном подходе пропускная способность горки и предгорочного парка рассчитывается отдельно, изолированно, и наименьшая из них определяет этот параметр для всей связи. Подход неверный, по отдельности эти структурные элементы рассчитывать нельзя.

Резервные пути парка выполняют активную роль: они образуют случайный поток в управляемый и тем самым повышают возможный уровень использования максимальной пропускной способности горки. Вот что показали имитационные эксперименты (рис. 6).

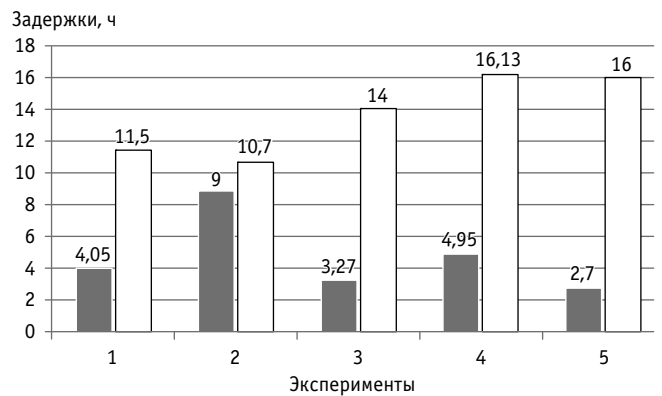


Рис. 5. Задержки из-за занятости стрелок в горловинах разных станций: ■ — по формуле; □ — имитационная модель

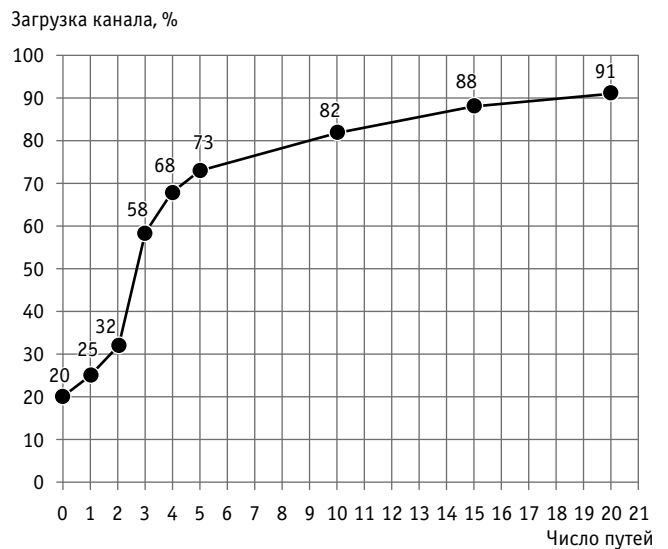


Рис. 6. Возможный уровень загрузки горки при разной емкости предгорочного парка

Поэтому любые каналы обслуживания (грузовые терминалы, причалы и др.) можно рассчитывать только вместе с парками путей перед ними. Потому что чем меньше организован поток, тем большие потери пропускной способности будут возникать. Максимальная пропускная способность при случайном разбросе в обслуживании станет возможной только при полностью управляемом потоке. То есть фактически достижимая величина определяется уровнем возможной полезной загрузки:

$$\tilde{U} = \gamma \cdot U,$$

где U — максимальная пропускная способность;

\tilde{U} — реальная пропускная способность;

γ — коэффициент возможной загрузки канала при данном потоке.

Именно по этому параметру следует определять «узкое место».

Расчет больших полигонов

В существующей практике рассчитываются изолированно технические станции и участки между ними. Меньшая из пропускных способностей принимается для пары «станция — участок».

Впервые построенная имитационная модель полигона Кузбасс — порт Усть-Луга (это 230 станций) показала, что при взаимодействии характер работы и станции, и участка существенно меняется.

Расчеты станций выполнены с помощью подробных имитационных моделей, где отображается структура вплоть до каждого пути и отдельной стрелки. Для больших полигонов разработана и реализована технология макро моделирования — здесь укрупненно отображаются горловины и парки.

В горловине множество стрелок заменяется на множество так называемых структурных каналов (рис. 7).

Проверка сравнительными расчетами на подробных и укрупненных моделях показала, что задержки из-за горловин практически одинаковы (рис. 8).

При макро моделировании парков используется функциональный подход. Задается не физическая вместимость путей, а предельная функциональная емкость парка, при которой сохраняются еще его функциональные свойства. Определяется это по предельно допустимой величине задержек (рис. 9).

Вместимость парка 886 вагонов, а функциональная емкость по допустимым задержкам только 632 вагона.

Время нахождения вагонов в парках при одной и той же технологии в микро- и макро моделях также проверяется сравнительными расчетами, которые показывают довольно большое совпадение результатов (рис. 10).

Для участков разрабатывается график движения, при этом работа технических станций не отображается. Есть автоматизированные системы для построения так называемых энергооптимальных графиков. Модель показывает, что возникают простои поездов на промежуточных станциях по неприему техническими (рис. 11).

Слева сверху на рис. 11 показаны причины дополнительных простоев на станции Л. Из-за этого появились простои поездов на промежуточных станциях П и Б. Так что по отдельности рассчитывать станции и участки нельзя.

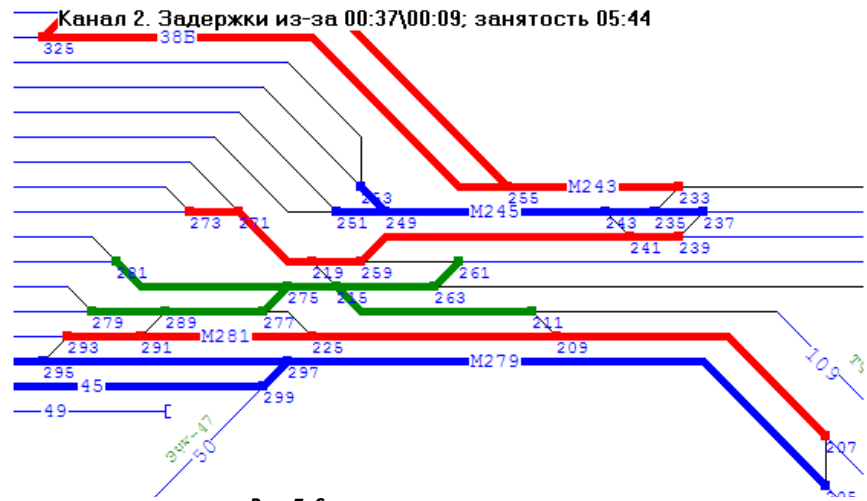


Рис. 7. Структурные каналы в горловине

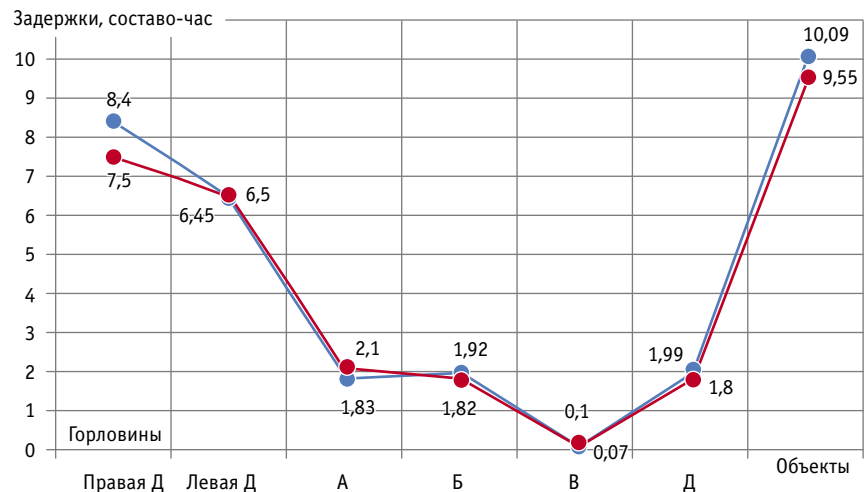


Рис. 8. Задержки в горловинах:

— в микро модели; — в макро модели

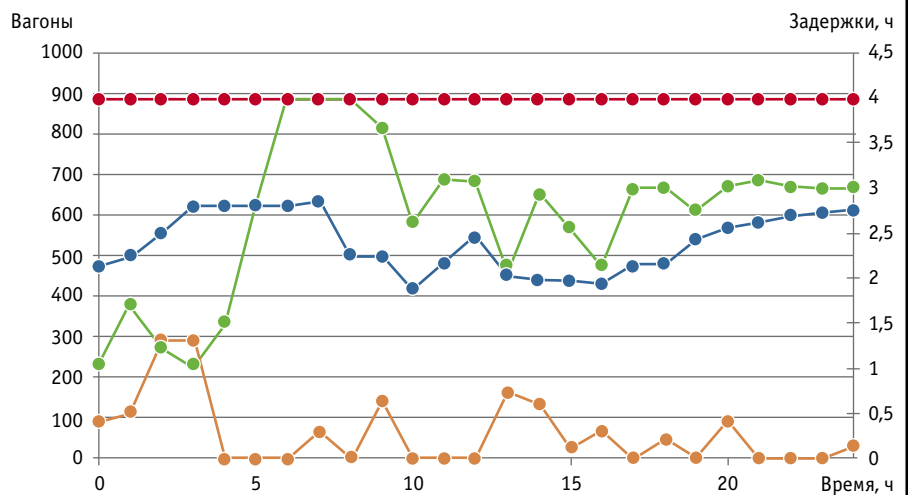


Рис. 9. Динамика вагонов и задержки в парке станции К:

— число вагонов; — задержки по входу; — задержки по выходу; — суммарная длина путей

Отсюда следует важный вывод — единственным корректным методом расчета систем железнодорожного транспорта является имитационное моделирование. Рассчитать пропускную способность парка или горловины возможно только в том случае, если рассматривать структурные элементы станции в ее общей модели.

Это положение подтверждается и в ряде зарубежных публикаций [5, 7, 9], в которых говорится о том, что имитационная модель представляется единственным подходящим инструментом для проведения исследований в реальных условиях.

Наша технология подробного и укрупненного моделирования утверждена в ОАО «РЖД» [13]. Системы моделирования ИСТРА для подробного моделирования и ИМЕТРА для макро моделирования прошли государственную регистрацию.

Выводы

1. Исследование систем железнодорожного транспорта на компьютерных моделях показало, что принятые и официально утвержденные методы расчета этих систем содержат существенные ошибки.

2. Методы были основаны на внешне правдоподобных, но не всегда правильных постулатах, отсюда функциональная роль элемента транспортной системы в действительности и в модели часто не совпадала.

3. Основной ошибкой подходов был тезис, что пропускную способность устройств можно рассчитывать по отдельности, без учета их взаимодействия. Проверки на моделях показали, что при взаимодействии двух элементов их параметры существенно меняются.

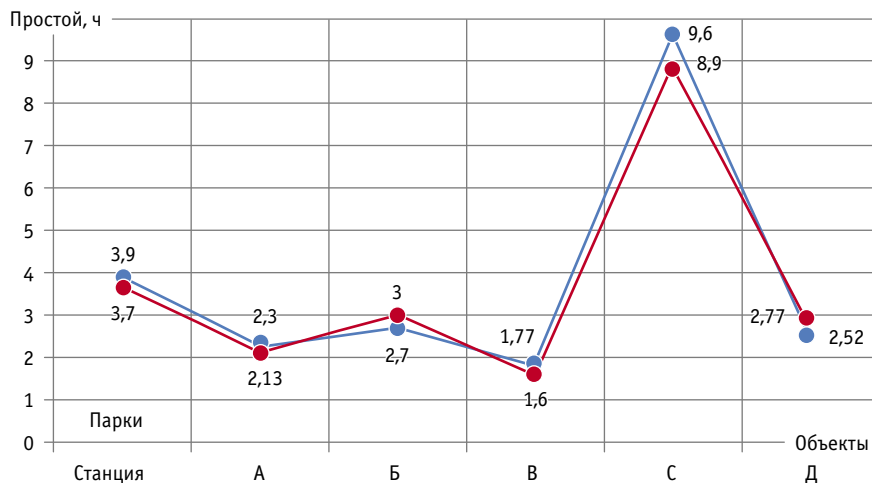


Рис. 10. Время нахождения вагонов в парках:
— в микро модели; — в макро модели

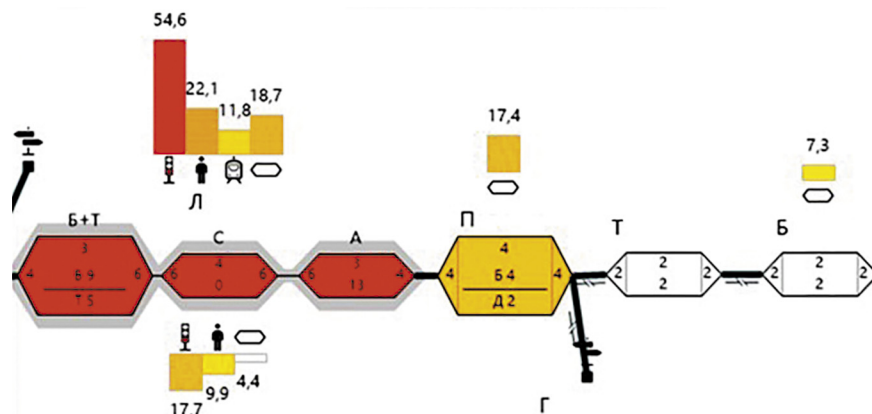


Рис. 11. Задержки при пропуске поездов в среднем на поезд:

— из-за участка;
 — из-за бригад ПТО;
 — из-за путей на следующей станции;
 — из-за локомотивов

4. Наиболее адекватным методом расчета является имитационное моделирование, которое корректно отображает работу элементов в их взаимодействии —

подробно для железнодорожных станций и укрупненно для крупных транспортных узлов и больших полигонов железнодорожного транспорта.

Литература

1. Алгоритмические решения задач эффективного использования и развития железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. С. Прокофьева, Р. Ф. Сайбаталов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2019. № 3. С. 28–39. ISSN 2304–9642.
2. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О загрузке стрелок и пропускной способности горловин // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7. ISSN 1815–9400.
3. Вакуленко С. П., Головнич А. К., Правдин Н. В. Основы автоматизации проектирования железнодорожных станций и узлов. Москва : Маршрут, 2004. 400 с.
4. Негрей В. Я. Научные основы расчетов и проектирования железнодорожных станций и узлов: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Ленинград, 1987. 35 с.
5. Delay Management Including Capacities of Stations / T. Dollevoet, D. Huisman, L. Kroon [et al.] // Transportation Science. 2014. Vol. 49. Issue 2. Pp. 185–203.
6. Adamko N., Klima V., Marton P. Designing railway terminals using simulation techniques // International Journal of Civil Engineering. 2010. Vol. 8. Issue 1. Pp. 58–67.
7. Medeossi G., Marchionna A., Longo G. Capacity and reliability on railway networks: a simulative approach. Trieste : Università degli Studi di Trieste, 2009. 140 p.
8. Landex A., Jensen L. W. Measures for track complexity and robustness of operation at stations // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2013. Vol. 3. Issues 1–2. Pp. 22–35.
9. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modeling Transport / 3rd edition. John Wiley & Sons, Ltd., 2008. 499 p.
10. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог / ОАО «РЖД». Москва : Техинформ, 2011. 289 с.
11. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортно-обслуживания заводов черной металлургии: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Липецк, 1986. 377 с.
12. Проектирование железнодорожных станций и узлов / Э. В. Бакумов, Е. П. Бакумова, К. Г. Гусева [и др.] : справочное и методическое руководство / Под ред. А. М. Козлова, К. Г. Гусевой; 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1981. 591 с.
13. Методика проведения исследований проектов развития железнодорожных станций и линий с определением «узких мест», влияния на пропускные и перерабатывающие способности, рациональной технологии и прогнозируемых эксплуатационных показателей с использованием аппарата математического моделирования: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 09.01.2018 г. № 2/р.

References

1. Algorithmic solutions of tasks aimed at efficient use and development of railway infrastructure and transport resources [Algoritmicheskie resheniya zadach effektivnogo ispol'zovaniya i razvitiya zheleznodorozhnoy infrastruktury i perevozochnykh resursov] / A. F. Borodin, V. V. Panin, E. S. Prokofyeva, R. F. Saybatalov // Bulletin of Joint Scientific Council of JSC Russian Railways. 2019. No. 3. Pp. 28–39. ISSN 2304–9642.
2. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. On the loading of points and station neck capacity [O zagruzke strelok i propusknoy sposobnosti gorlovin] // Transport of the Urals. 2016. No. 4 (51). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7. ISSN 1815–9400.
3. Vakulenko S. P., Golovnich A. K., Pravdin N. V. Basics of automation for design of railway stations and nodes [Osnovy avtomatizatsii proektirovaniya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov]. Moscow : Route, 2004. 400 p.
4. Negrey V. Ya. Scientific basics of calculation and design of railways stations and nodes [Nauchnye osnovy raschetov i proektirovaniya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov] : Synopsis of DSc in Engineering Thesis. Leningrad, 1987. 35 p.
5. Delay Management Including Capacities of Stations / T. Dollevoet, D. Huisman, L. Kroon [et al.] // Transportation Science. 2014. Vol. 49. Issue 2. Pp. 185–203.
6. Adamko N., Klima V., Marton P. Designing railway terminals using simulation techniques // International Journal of Civil Engineering. 2010. Vol. 8. Issue 1. Pp. 58–67.
7. Medeossi G., Marchionna A., Longo G. Capacity and reliability on railway networks: a simulative approach. Trieste : Università degli Studi di Trieste, 2009. 140 p.
8. Landex A., Jensen L. W. Measures for track complexity and robustness of operation at stations // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2013. Vol. 3. Issues 1–2. Pp. 22–35.
9. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modeling Transport / 3rd edition. John Wiley & Sons, Ltd., 2008. 499 p.
10. Instruction on calculation railways capacity [Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog] / JSC Russian Railways. Moscow : Tekhinform, 2011. 289 p.
11. Kozlov P. A. Theoretical basis, organizational forms, methods of optimization of flexible transport service methods at ferrous metallurgy plants [Teoreticheskie osnovy, organizatsionnye formy, metody optimizatsii gibkoy tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya zavodov chernoy metallurgii] : DSc in Engineering Thesis. Lipetsk, 1986. 377 p.
12. Design of railway stations and junctions [Proektirovanie zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov] / E. V. Bakumov, E. P. Bakumova, K. G. Guseva [et al.] : reference and methodological guide / Ed. by A. M. Kozlov and K. G. Guseva; 2nd edition, revised and expanded. Moscow : Transport, 1981. 591 p.
13. Method of conducting investigations of projects for developing railway stations and lines with determination of bottlenecks, influence on capacity, rational technology and prospective operational indicators with the use of mathematical modeling [Metodika provedeniya issledovaniya projektov razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy i liniy s opredeleniem «uzkikh mest», vliyaniya na propusknye i pererabatyvayushhie sposobnosti, ratsional'noy tekhnologii i prognoziruemykh ekspluatatsionnykh pokazateley s ispol'zovaniem apparata matematicheskogo modelirovaniya] : approved by the Order of JSC Russian Railways dated 09.01.2018 No. 2/р.

Объем статьи 0,83 авторских листа

УДК 658.512.6

Олег Валерьевич Москвичев, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,

Елена Евгеньевна Москвичева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,

Дмитрий Владиславович Васильев, преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПОЕЗДОВ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПОРЯДКА ВЫПОЛНЕНИЯ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Oleg Valeryevich Moskvichev, DSc in Engineering, Head of Operations Management Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,

Elena Evgenyevna Moskvicheva, PhD in Engineering, Associate Professor, Freight and Commercial Technologies Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,

Dmitriy Vladislavovich Vasilyev, Lecturer, Operations Management Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia

Improvement of technology for terminal processing of container trains on the basis of optimization of execution order for transshipment operations

Аннотация

Выполнен анализ автоматизации технологических процессов транспортно-логистической инфраструктуры ОАО «РЖД». Дана оценка перспектив развития автоматизированных систем управления контейнерным терминалом. Предложена математическая модель выполнения плана погрузочно-выгрузочных операций в виде задачи линейного булева программирования со сложными ограничениями комбинаторного типа для сокращения общей длительности обработки контейнерных поездов погрузочно-разгрузочными механизмами, снижения числа избыточных перестановок контейнеров и затрат материально-технических ресурсов. Разработан генетический алгоритм, позволяющий найти оптимальную последовательность выполнения погрузочно-выгрузочных операций. Проведены численные эксперименты, подтверждающие эффективность использования предложенных математической модели и алгоритма.

Ключевые слова: контейнерный терминал, козловой кран, автоматизация, целочисленное программирование, генетический алгоритм, ресурсосбережение.

Abstract

The authors have analysed automation of operational processes of transport and logistics infrastructure of the JSC «RZD» and have assessed perspectives of development of container terminal automated control systems. The authors propose a mathematical model of execution of loading-unloading operations plan in the form of a problem of linear Boolean programming with complicated restrictions of a combinatorial type for decrease of total duration of container trains processing by handling facilities, decrease of a number of excessive rearrangements of containers and costs of material and technical resources. They have developed a genetic algorithm that gives an optimal sequence of loading-unloading operations. As a result, the paper presents results of numerical experiments that confirm efficiency of the suggested mathematical model and the algorithm.

Keywords: container terminal, gantry crane, automation, integer programming, genetic algorithm, resource-saving.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-10-15

ВВЕДЕНИЕ

Для сокращения сроков доставки грузов происходит переход к продвижению контейнеров в составе маршрутных контейнерных поездов. Их доля в общем объеме контейнерных перевозок на сети ОАО «РЖД» достигла 78 %. Однако созданная на сети транспортно-логистическая инфраструктура уже не соответствует современным потребностям рынка [1], например, длина погрузочно-выгрузочных путей большей части контейнерных терминалов не позволяет обрабатывать полносоставный контейнерный поезд. Именно поэтому в Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. модернизация транспортно-логистической инфраструктуры выделена в качестве одной из основных задач. Кроме модернизации непосредственно инфраструктуры, к ключевым направлениям отнесено развитие в транспортно-логистических центрах (ТЛЦ) таких технологий, как ускоренная разгрузка контейнерных поездов и роботизированное управление складской логистикой.

Зарубежный опыт показывает, что при увеличении объемов обрабатываемых контейнеров наступает момент, когда модернизация инфраструктуры становится невозможной либо неэффективной. Необходим переход к новой технологии — использованию частичной или полной автоматизации контейнерных терминалов, основанной на научных исследованиях по оптимизации технологии работы элементов терминала и их взаимо-

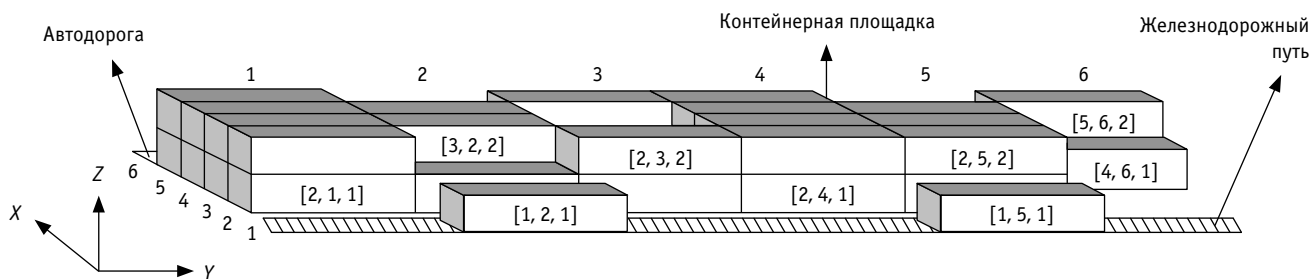


Рис. 1. Схема контейнерной площадки (по оси X — ряды, по оси Y — места, по оси Z — ярусы)

действию между собой [2–7]. Особо следует выделить работы, посвященные отслеживанию местонахождения контейнеров на терминале, их оптимальному размещению в штабелях, зонированию контейнерных площадок, решению задачи предварительной сортировки контейнеров [8–15] и оптимизации погрузочно-разгрузочных механизмов (ПРМ) для повышения их производительности, сокращения затрат на электроэнергию и горюче-смазочные материалы [16–18].

Сегодня в ОАО «РЖД» отсутствуют полностью автоматизированные контейнерные терминалы, а используемые автоматизированные системы управления ими не предусматривают подобной модернизации. В рамках Стратегии цифровой трансформации предполагается переход к новому программно-аппаратному комплексу управления ТЛЦ — Автоматизированной системе управления терминально-складским комплексом (АСУ ТСК). В функциональных требованиях к АСУ ТСК изначально заложена возможность перехода на полную автоматизацию деятельности ТЛЦ, однако пока система работает в информационно-справочном режиме, а ввод модуля автоматизации и роботизации технологических процессов назначен на 2025 г.

В связи с увеличением общего объема контейнерных перевозок и ростом доли контейнерных поездов критически важной становится задача автоматизации и оптимизации работы ПРМ. Существующие методы планирования их работы не предусматривают рационального использования материально-технических ресурсов и определения планов, позволяющих обрабатывать контейнерные поезда за кратчайший период времени.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ НАБОРА ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

После подачи контейнерного поезда на терминал общая длительность его обработки ПРМ складывается из трех элементов:

рабочего хода — времени, которое ПРМ тратит на перемещение контейнеров;

холостого хода — времени, в течение которого перегрузочное средство движется от места постановки предыдущего контейнера к новому контейнеру;

избыточной перестановки — времени, которое затрачивается для обеспечения доступа к целевому контейнеру и необходимо для снятия контейнеров, установленных выше целевого.

Критериями оптимальности могут быть и общая длительность работы перегрузочных средств при выполнении операций по обработке контейнеров, и величина эксплуатаци-

онных затрат, связанных с работой перегрузочного средства, которые прямо пропорциональны длительности работы перегрузочных средств.

Построим математическую модель выполнения погрузочно-выгрузочных операций в виде задачи математического программирования. Это предполагает введение величин (параметров), которые отражают механизм влияния отдельных факторов задачи на выбранный показатель эффективности работы системы (критерий эффективности). В качестве такого показателя целесообразно взять длительность работы крана, непрерывно осуществляющего операции погрузки и выгрузки.

Для формализации задачи представим контейнерную площадку в виде трехмерного массива в декартовой системе координат (рис. 1).

Обозначим переменные и параметры, используемые для математических формулировок:

N — количество задач обработки, равное числу обрабатываемых контейнеров;

L — максимальное количество ярусов контейнерной площадки;

i, j — индексы задач обработки;

x^1, x^2, x^3, x^4 — индексы рядов рабочих позиций;

y^1, y^2, y^3, y^4 — индексы мест рабочих позиций;

z^1, z^2 — индексы ярусов рабочих позиций;

$(x^1, y^1, z^1) \rightarrow (x^2, y^2, z^2)$ — индексы погрузочно-выгрузочных операций;

φ — коэффициент преобразования времени для операций снятия блокирующих контейнеров;

t_{ij} — время холостого перемещения от задачи i к задаче j ;

M — достаточно большая константа;

множество V — набор погрузочно-выгрузочных операций;

множество P — набор индексов погрузочно-выгрузочных операций;

$T_i'(x^1, y^1, z^1), (x^2, y^2, z^2)$ — время начала задачи i от (x^1, y^1, z^1) до (x^2, y^2, z^2) ;

$T_i''(x^1, y^1, z^1), (x^2, y^2, z^2)$ — время завершения задачи i от (x^1, y^1, z^1) до (x^2, y^2, z^2) ;

$X_{ij} = 1$, если задача j сразу же начинается после завершения задачи i , в противном случае $X_{ij} = 0$. Задачи S и T считаются начальными и конечными позициями. Таким образом, если задача i является первой задачей, то $X_{Si} = 1$, если задача i является последней задачей, то $X_{iT} = 1$;

$r^i(x^1, y^1, z^1 + m)$ — время снятия блокирующего контейнера для задачи i , вызванное наличием контейнера на m -м ярусе;

$B_{ij}(x^1, y^1, z^1), (x^3, y^3, z^3) = 0$, если задача i начинается раньше задачи j , в противном случае $B_{ij}(x^1, y^1, z^1), (x^3, y^3, z^3) = 1$. (x^1, y^1, z^1) — начальная позиция задачи i , а (x^3, y^3, z^3) — начальная позиция задачи j .

В табл. 1 приведен пример последовательности выполнения задач обработки контейнеров.

Таблица 1

Пример последовательности выполнения погрузочно-выгрузочных операций

		Задача j					
		1	2	...	125	126	T
Задача i	S	0	0	...	1	0	0
	1	–	0	...	0	0	0
	2	1	–	...	0	0	0

	125	0	1	...	–	0	0
	126	0	0	...	0	–	1

Исходя из данных табл. 1 последовательность выполнения задач обработки контейнеров будет следующей: из начальной точки S перегрузочное средство направится выполнять задачу 125. После выполнения задачи 125 будет выполнена задача 2. Далее будет выполнена задача 1. В конечном счете будет выполнена задача 126. Затем перегрузочное средство направится в конечную точку T .

Для постановки задачи введем следующие допущения: каждая погрузочно-выгрузочная операция включает только один контейнер за раз;

предполагается, что рабочие позиции известны и фиксированы после создания задачи обработки контейнерного поезда; все операции не являются упреждающими, т.е. как только начинается погрузочно-выгрузочная операция, она должна быть завершена без какой-либо паузы или сдвига;

предполагается, что контейнеры в модели имеют одинаковый размер.

Таким образом, целевая функция модели оптимизации выполнения погрузочно-выгрузочных операций контейнеров состоит в том, чтобы минимизировать общее время обработки целевых и снятия блокирующих контейнеров, и может быть записана в виде

$$F = \sum_{i=1}^N \left(T_i''(x^1, y^1, z^1), (x^2, y^2, z^2) - T_i'(x^1, y^1, z^1), (x^2, y^2, z^2) \right) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N X_{ij} t_{ij} + \varphi \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{L-k} r^i(x^1, y^1, z^1 + m) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Для обеспечения практической реализуемости решения введем ограничения:

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} \leq 1, \forall i \in V \quad (2)$$

(ограничение (2) означает, что для каждой операции обработки контейнера существует не более одной последующей операции);

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} \leq 1, \forall j \in V \quad (3)$$

(ограничение (3) означает, что для каждой операции обработки контейнера существует не более одной предварительной операции);

$$\sum_{i=1}^N X_{Si} = 1, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{iT} = 1 \quad (5)$$

(ограничения (4) и (5) являются начальными и конечными, они представляют, что вся задача обработки контейнера может иметь только одну начальную и одну завершающую операцию);

$$T_i''(x^1, y^1, z^1), (x^2, y^2, z^2) - T_i'(x^1, y^1, z^1), (x^2, y^2, z^2) + t_{ij} \leq M(1 - X_{ij}), \forall i, j \in V \quad (6)$$

(ограничение (6) указывает на непрерывную временную зависимость между двумя последовательными погрузочно-выгрузочными операциями);

$$B_{ij}(x^1, y^1, z^1), (x^1, y^1, z^1 + m) \leq 1 - X_{ij}, \forall i, j \in V; \quad \forall (x^1, y^1, z^1), (x^1, y^1, z^1 + m) \in P \quad (7)$$

(ограничение (7) определяет взаимосвязь двух задач непрерывной обработки);

$$r^i(x^1, y^1, z^1 + m) \geq 0, \forall i \in V; \quad \forall (x^1, y^1, z^1), (x^1, y^1, z^1 + m) \in P; \quad (8)$$

$$X_{ij}, B_{ij}(x^1, y^1, z^1), (x^3, y^3, z^2) \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V; \quad \forall (x^1, y^1, z^1), (x^3, y^3, z^2) \in P. \quad (9)$$

Оптимизационная задача (2)–(9) представляет собой задачу линейного булева программирования (ЛБП) со сложными ограничениями комбинаторного типа. При небольшом числе переменных ЛБП можно решать точными методами, однако в нашем практическом случае количество переменных и особенно количество ограничений настолько велико, что не позволяет применять известные методы для получения точного решения. В таких условиях единственный вариант — приближенное определение достаточно хорошего решения за малый срок. Это возможно за счет использования эвристических алгоритмов, в частности генетического алгоритма (рис. 2).

Генетический алгоритм работает по принципу эволюционного поиска оптимального решения и применительно к задаче определения оптимальной последовательности обработки контейнеров его суть заключается в следующем.

1. Исходные данные для работы алгоритма — паросочетания контейнеров и мест на контейнерной площадке или платформе, входящих в текущий план работы, а также текущее расположение всех контейнеров на контейнерной площадке.

2. На основе указанных выше данных алгоритм формирует исходное множество последовательностей обработки, случайным образом выбирая их из общего множества всех возможных последовательностей.

3. Исходное множество сортируется по длительности выполнения в порядке ее увеличения.

4. Все значения ниже предварительно заданного лимита отбрасываются.

5. К множеству последовательностей применяются операторы кроссинговера и мутаций. Полученные новые последовательности добавляются в множество в том случае, если их длительность выполнения меньше, чем у какой-то последовательности из множества.

6. Четвертый и пятый пункт в зависимости от числа контейнеров, подлежащих обработке, повторяются определенное число раз.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки эффективности предлагаемых математической модели и алгоритма реализован программный продукт на языке Java. В табл. 2 приведен пример плана работы ПРМ, который использовался при оценке.

График процесса определения оптимальной последовательности обработки 30 контейнеров представлен на рис. 3, а на рис. 4 показаны результаты еще пяти попыток определения оптимальной последовательности при тех же исходных данных. Необходимо обратить внимание, что, несмотря на разные точки начала графиков, в итоге они сходятся приблизительно к одному и тому же значению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование предложенных математической модели и алгоритма при разработке модуля автоматизации и ро-

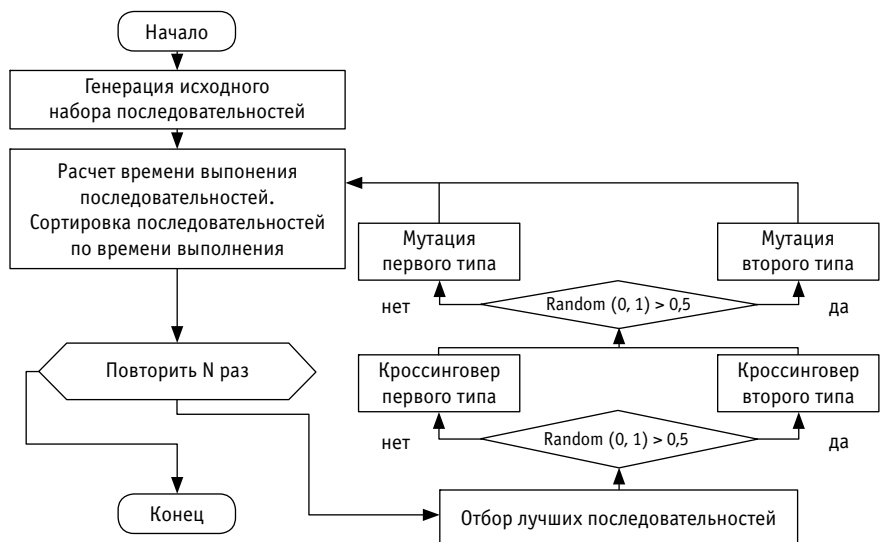


Рис. 2. Схема работы генетического алгоритма

Таблица 2

План работы перегрузочного средства

Номер операции	Начальная позиция	Конечная позиция	Номер операции	Начальная позиция	Конечная позиция
1	(3,2,1)	(1,1,1)	16	(5,13,1)	(1,16,1)
2	(4,1,1)	(1,2,1)	17	(3,17,1)	(1,17,1)
3	(2,5,2)	(1,3,1)	18	(4,14,2)	(1,18,1)
4	(3,8,1)	(1,4,1)	19	(3,22,1)	(1,19,1)
5	(5,4,1)	(1,5,1)	20	(2,21,1)	(1,20,1)
6	(4,4,1)	(1,6,1)	21	(3,21,2)	(1,21,1)
7	(2,5,1)	(1,7,1)	22	(4,27,1)	(1,22,1)
8	(2,9,2)	(1,8,1)	23	(4,22,1)	(1,23,1)
9	(4,5,1)	(1,9,1)	24	(2,24,2)	(1,24,1)
10	(2,10,2)	(1,10,1)	25	(5,25,1)	(1,25,1)
11	(3,8,2)	(1,11,1)	26	(2,24,1)	(1,26,1)
12	(5,12,1)	(1,12,1)	27	(4,22,2)	(1,27,1)
13	(4,14,1)	(1,13,1)	28	(2,27,1)	(1,28,1)
14	(2,11,1)	(1,14,1)	29	(3,29,1)	(1,29,1)
15	(3,9,2)	(1,15,1)	30	(4,27,2)	(1,30,1)

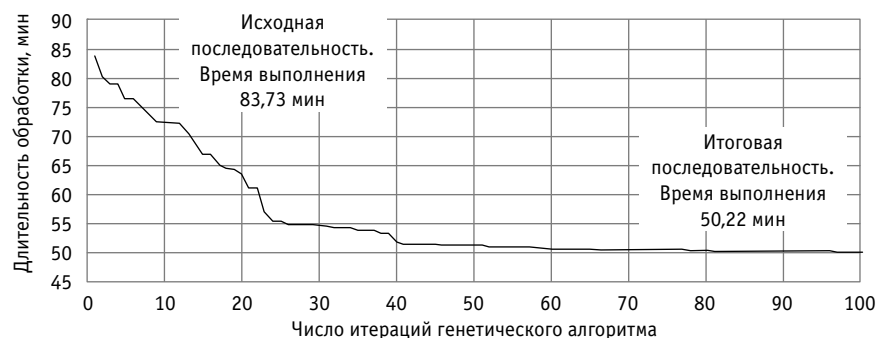


Рис. 3. Процесс определения оптимального плана работы ПРМ с помощью генетического алгоритма

ботизации АСУ ТСК позволит сократить общую длительность обработки контейнерных поездов ПРМ, уменьшить число избыточных перестановок контейнеров и пропорционально снизить затраты материально-технических ресурсов. Исходя из представленных выше результатов численных экспериментов сокращение длительности обработки контейнерных поездов ПРМ составит 35–40 %, что обеспечит сокращение срока доставки грузов в составе контейнерных поездов и повышение уровня конкурентоспособности ОАО «РЖД».

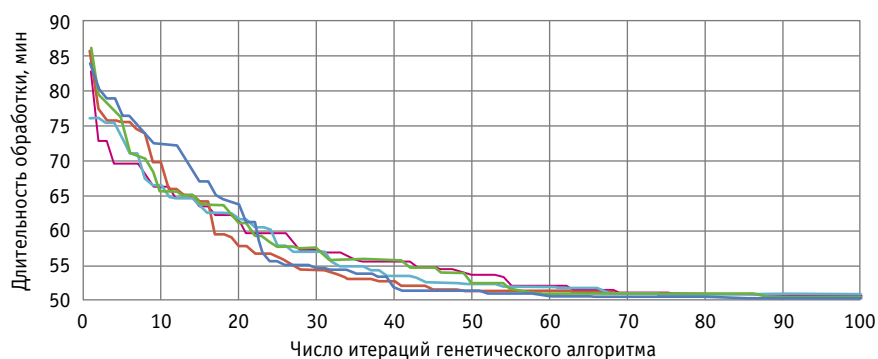


Рис. 4. Сравнение пяти попыток определения оптимального плана работы ПРМ с помощью генетического алгоритма

Литература

1. Moskvichev O., Moskvicheva E., Bulatov A. Clustering Methods for Determination of Optimal Locations of Container Storage and Distribution Centers // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 54. Pp. 461–469.
2. Hartmann S. A general framework for scheduling equipment and manpower at container terminals // *OR Spectrum*. 2004. Vol. 26. No. 1. Pp. 51–74.
3. Optimisation for job scheduling at automated container terminals using genetic algorithm / B. Skinner, Sh. Yuan, Sh. Huang [et al.] // *Computers and Industrial Engineering*. 2013. Vol. 64. No. 1. Pp. 511–523.
4. Simultaneous scheduling of parts and automated guided vehicles in an FMS environment using adaptive genetic algorithm / J. Jerald, P. Asokan, R. Saravanan, A. Delphin Carolina Rani // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. Vol. 29. No. 5–6. Pp. 584–589.
5. Feng X., Lau F. C. M., Gao D. A New Bio-inspired Approach to the Traveling Salesman Problem // *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering*. 2009. Vol. 5. Pp. 1310–1321.
6. Muthiah A., Rajkumar R. A comparison of artificial bee colony algorithm and genetic algorithm to minimize the makespan for job shop scheduling // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 97. Pp. 1745–1754.
7. Vis I. F. A., de Koster R. Transshipment of containers at a container terminal: An overview // *European Journal of Operational Research*. 2003. Vol. 147. No. 1. Pp. 1–16.
8. Bazzazi M., Safaei N., Javadian N. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal // *Computers and Industrial Engineering*. 2009. Vol. 56. No. 1. Pp. 44–52.
9. Stacking Position Allocation Model Based on Automatic Rail Crane / J. Rong, S. Ji, Q. Zhao, D. Guo // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 790. No. 1.
10. Chang Y. M., Zhu X. N. Slot allocation of railway container terminal considering stowage plan // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020. Vol. 20. No. 4. Pp. 205–216.
11. The inbound container space allocation in the automated container terminals / Yu M., Liang Zh., Teng Yi [et al.] // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 179.

References

1. Moskvichev O., Moskvicheva E., Bulatov A. Clustering Methods for Determination of Optimal Locations of Container Storage and Distribution Centers // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 54. Pp. 461–469.
2. Hartmann S. A general framework for scheduling equipment and manpower at container terminals // *OR Spectrum*. 2004. Vol. 26. No. 1. Pp. 51–74.
3. Optimisation for job scheduling at automated container terminals using genetic algorithm / B. Skinner, Sh. Yuan, Sh. Huang [et al.] // *Computers and Industrial Engineering*. 2013. Vol. 64. No. 1. Pp. 511–523.
4. Simultaneous scheduling of parts and automated guided vehicles in an FMS environment using adaptive genetic algorithm / J. Jerald, P. Asokan, R. Saravanan, A. Delphin Carolina Rani // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. Vol. 29. No. 5–6. Pp. 584–589.
5. Feng X., Lau F. C. M., Gao D. A New Bio-inspired Approach to the Traveling Salesman Problem // *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering*. 2009. Vol. 5. Pp. 1310–1321.
6. Muthiah A., Rajkumar R. A comparison of artificial bee colony algorithm and genetic algorithm to minimize the makespan for job shop scheduling // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 97. Pp. 1745–1754.
7. Vis I. F. A., de Koster R. Transshipment of containers at a container terminal: An overview // *European Journal of Operational Research*. 2003. Vol. 147. No. 1. Pp. 1–16.
8. Bazzazi M., Safaei N., Javadian N. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal // *Computers and Industrial Engineering*. 2009. Vol. 56. No. 1. Pp. 44–52.
9. Stacking Position Allocation Model Based on Automatic Rail Crane / J. Rong, S. Ji, Q. Zhao, D. Guo // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 790. No. 1.
10. Chang Y. M., Zhu X. N. Slot allocation of railway container terminal considering stowage plan // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020. Vol. 20. No. 4. Pp. 205–216.
11. The inbound container space allocation in the automated container terminals / Yu M., Liang Zh., Teng Yi [et al.] // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 179.

12. Zhou C., Wang W., Li H. Container reshuffling considered space allocation problem in container terminals // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2020. Vol. 136.
13. Park T., Kim J., Ryu K. R. Iterative replanning using genetic algorithms for remarshaling in a container terminal // Proceedings of the 10th IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, AIA 2010. Acta Press, 2010. Pp. 22–28.
14. Gheith M., Eltawil A. B., Harraz N. A. Solving the container pre-marshalling problem using variable length genetic algorithms // Engineering Optimization. 2016. Vol. 48. No. 4. Pp. 687–705.
15. Moskvichev O., Nikishchenkov S., Moskvicheva E. Optimization of production and transport infrastructure based on cluster analysis methods // E 3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2020. Vol. 164.
16. Yard Crane Scheduling with Real-time Reshuffle / X. Man, F. Zheng, Chu F., Xu Y. // Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM). DOI: 10.1109/IESM45758.2019.8948160.
17. A decision method on yard cranes transformation and deployment in green ports / Z. Tan, Q. Zhang, Y. Yuan, Y. Jin // International Transactions in Operational Research. 2022. Vol. 29. No. 1. Pp. 323–346. <https://doi.org/10.1111/itor.13027>.
18. Azab A., Morita H. The block relocation problem with appointment scheduling // European Journal of Operational Research. 2022. Vol. 297. No. 2. Pp. 680–694. DOI:10.1016/J.EJOR.2021.06.007.

12. Zhou C., Wang W., Li H. Container reshuffling considered space allocation problem in container terminals // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2020. Vol. 136.
13. Park T., Kim J., Ryu K. R. Iterative replanning using genetic algorithms for remarshaling in a container terminal // Proceedings of the 10th IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, AIA 2010. Acta Press, 2010. Pp. 22–28.
14. Gheith M., Eltawil A. B., Harraz N. A. Solving the container pre-marshalling problem using variable length genetic algorithms // Engineering Optimization. 2016. Vol. 48. No. 4. Pp. 687–705.
15. Moskvichev O., Nikishchenkov S., Moskvicheva E. Optimization of production and transport infrastructure based on cluster analysis methods // E 3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2020. Vol. 164.
16. Yard Crane Scheduling with Real-time Reshuffle / X. Man, F. Zheng, Chu F., Xu Y. // Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM). DOI: 10.1109/IESM45758.2019.8948160.
17. A decision method on yard cranes transformation and deployment in green ports / Z. Tan, Q. Zhang, Y. Yuan, Y. Jin // International Transactions in Operational Research. 2022. Vol. 29. No. 1. Pp. 323–346. <https://doi.org/10.1111/itor.13027>.
18. Azab A., Morita H. The block relocation problem with appointment scheduling // European Journal of Operational Research. 2022. Vol. 297. No. 2. Pp. 680–694. DOI:10.1016/J.EJOR.2021.06.007.

Объем статьи 0,64 авторских листа

УДК 533.6.071.5

Алексей Алексеевич Локтев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Вадим Вадимович Королев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Ольга Игоревна Поддаева, кандидат технических наук, доцент, заведующая Учебно-научно-производственной лабораторией аэродинамических и аэроакустических испытаний строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия,

Анастасия Николаевна Федосова, кандидат технических наук, доцент Российского государственного аграрного университета — МСХА имени К. А. Тимирязева (РГАУ-МСХА), Москва, Россия,

Павел Сергеевич Чурин, заместитель заведующего Учебно-научно-производственной лабораторией аэродинамических и аэроакустических испытаний строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия

ВЕТРОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К СООРУЖЕНИЯМ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Alexey Alexeevich Loktev, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Vadim Vadimovich Korolev, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Olga Igorevna Poddaeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Educational, Scientific and Production Laboratory of Aerodynamic and Aeroacoustic Tests of Building Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,

Anastasiya Nikolaevna Fedosova, PhD in Engineering, Associate Professor, Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU — MTAA named after K. A. Timiryazev), Moscow, Russia,

Pavel Sergeevich Churin, Deputy Head of Educational, Scientific and Production Laboratory of Aerodynamic and Aeroacoustic Tests of Building Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

Wind influence on transport infrastructure objects related to constructions of high level of responsibility

Аннотация

Согласно действующим нормативным документам, для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности назначение ветровых нагрузок должно быть проведено на основании результатов модельных испытаний в аэродинамических трубах. Повышенный уровень ответственности может быть обусловлен не технической сложностью и пространственной уникальностью проектируемого объекта, а только его производственным назначением, принадлежностью к объектам капитального строительства инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования и геометрическими размерами. В статье рассмотрена оценка допустимости использования при назначении ветровых нагрузок типовых схем приложения СП 20.13330.2016 для зданий и сооружений, относящихся к зданиям и сооружениям повышенного уровня ответственности по принципу их производственного назначения, для чего была проведена серия аэродинамических испытаний для выбранного объекта повышенного уровня ответственности.

Ключевые слова: сооружения повышенного уровня ответственности, ветровые воздействия, экспериментальное моделирование, аэродинамические трубы.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-16-21

Abstract

According to existing regulatory documents, assignment of wind loads for buildings and constructions of high level of responsibility must be carried out on the basis of results of modeling tests in wind tunnels. High level of responsibility can be conditioned not by technical complexity and spatial originality of the designed object, but only by its production purpose, affiliation to capital construction object of railway infrastructure of public traffic and geometrical dimensions. The paper considers an assessment of permissibility of using typical schemes from the SP 20.13330.2016 attachment at assignment of wind loads for buildings and constructions related to buildings and constructions of high level of responsibility according to the principle of their production purpose. For that reason the authors have carried out a set of aerodynamic tests for a selected object of high level of responsibility.

Keywords: constructions of high level of responsibility, wind influence, experimental modeling, wind tunnels.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Федеральным законом от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ (в редакции от 02.07.2013 г.) к зданиям и сооружениям повышенного уровня ответственности относятся здания и сооружения, отнесенные в соответствии с Градостроительным кодексом Российской Федерации к особо опасным, технически сложным или уникальным объектам. Таким образом, даже здания и сооружения типовых схем СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [1], относящиеся к опасным производственным объектам, подпадают под категорию зданий и сооружений повышенного уровня ответственности. Для таких сооружений СП 20.13330.2016 предписывает назначать аэродинамические коэффициенты «с учетом опыта нормирования воздействия ветра на основе результатов модельных испытаний сооружений в аэродинамических трубах». Зачастую повышенный уровень ответственности сооружений обусловлен не геометрической сложностью, а технологическим назначением производственных зданий.

В работе исследовались ветровые воздействия на объекты повышенного уровня ответственности. Цель исследований — оценка допустимости использования нагрузок типовых схем приложения СП 20.13330.2016 при назначении ветровых нагрузок на здания и сооружения повышенного уровня ответственности (опоры мостового перехода высотой от 50 до 100 м, дымовые трубы тепловой электростанции, питающей тяговые подстанции железных дорог), поскольку повышенный уровень ответственности обусловлен не сложной пространственной формой, а назначением объекта и его геометрическими размерами.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТА КОНСТРУКЦИИ

Для экспериментальных исследований была разработана и изготовлена модель исследуемого объекта следующего типа (рис. 1), который может быть использован для различных сооружений как транспортной отрасли, так и других отраслей народного хозяйства (промышленное, химическое производство и т.д.). Учитывая размеры рабочей части аэродинамической трубы (АДТ), был выбран максимально возможный из условий загромождения потока масштаб макетов 1:100. Исследуемые модели устанавливались на автоматизированный поворотный стол, расположенный в рабочей зоне аэродинамической трубы.

На стадии изготовления модели в исследуемую конструкцию был встроен шестикомпонентный силовой датчик, используемый для измерения результирующих аэродинамических сил и моментов.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальное исследование проводилось с использованием уникальной научной установки «Большая Исследовательская Градиентная Аэродинамическая Труба» (БИГАТ) Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) (рис. 2).

Порядок проведения экспериментов по определению ветровых нагрузок на модель:



Рис. 1. Модель исследуемого объекта в рабочей зоне АДТ

- 1) в аэродинамическую трубу установлен экран с размещенной на нем моделью для весовых измерений. Расположение тензочувствительных датчиков показано на рис. 3 и 4. Кабель от тензочувствительных датчиков подключается к аналого-цифровому преобразователю;
- 2) считываются «нулевые» (при отсутствии потока) показания тензочувствительных датчиков, что необходимо для учета величины начального смещения вследствие нагружения датчика весом конструкции модели;
- 3) скорость потока в трубе устанавливается равной 16,5 м/с (соответствует автомодельности по числу Рейнольдса). Считываются показания тензочувствительных датчиков и записываются два файла: а) показания нагрузок с частотой 1000 Гц, б) осредненные показания нагрузок за весь период работы записывающей программы;
- 4) при помощи поворота экрана с моделью в трубе меняется угол атаки от 0 до 180° с шагом 22,5°. Для каждого угла шаг № 3 повторяется;
- 5) по полученным значениям суммарных сил и крутящих моментов вдоль осей X , Y и Z рассчитываются значения аэродинамических коэффициентов [2]:

$$c_x = \frac{2F_x}{\rho V^2 S}; c_y = \frac{2F_y}{\rho V^2 S}; c_z = \frac{2F_z}{\rho V^2 S}; \quad (1)$$

$$c_{mx} = \frac{2F_x}{\rho V^2 SL}; c_{my} = \frac{2F_y}{\rho V^2 SL}; c_{mz} = \frac{2F_z}{\rho V^2 SL}, \quad (2)$$

где S — характерная площадь миделя модели;
 L — плечо в заданной системе координат.



Рис. 2. Уникальная научная установка БИГАТ НИУ МГСУ

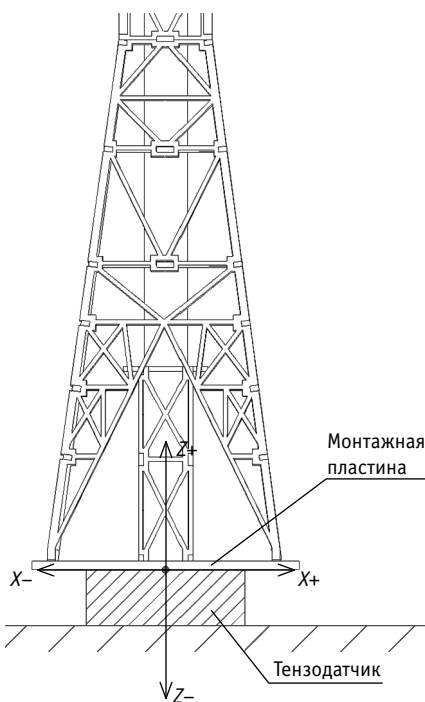


Рис. 3. Расположение силомоментного датчика на схеме исследуемого объекта

Основной цикл измерений выполнен при скорости потока $V_\infty = 16,5$ м/с, что соответствует автомодельности по числу Рейнольдса [3]. Иными словами, безразмерные аэродинамические коэффициенты масштабной модели, полученные в аэродинамической трубе, должны быть идентичны соответствующим вели-

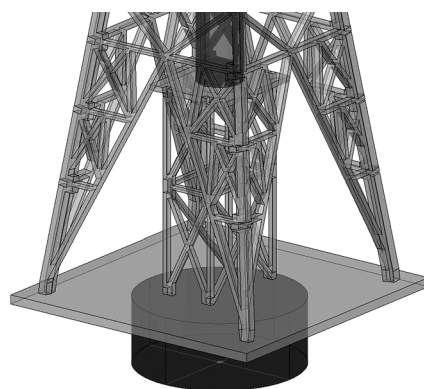


Рис. 4. Конечно-элементная модель сооружения в области основания

чинам в натуральных условиях (естественно, при соблюдении геометрического подобия модели) [1]. Направления осей при весовых измерениях, а также ориентация тензодатчиков относительно основания каждого макета показаны на рис. 5.

Полученные в ходе экспериментального исследования значения аэродинамических коэффициентов представлены на рис. 6.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СООРУЖЕНИЯ, ИСПЫТЫВАЮЩИХ ВИХРЕВОЕ РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Согласно требованиям п. 11 [1], «резонансное вихревое возбуждение и аэродинамические неустойчивые колебания не-

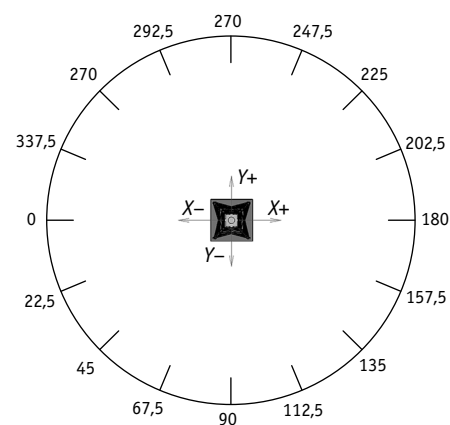


Рис. 5. Схема углов атаки ветрового потока

обходимо учитывать для зданий, сплошнотенчатых сооружений или их отдельных участков, имеющих прямолинейную (или близкую к прямолинейной) центральную ось, а также не изменяющиеся или плавно изменяющиеся формы и размеры поперечного сечения, для которых $\lambda_e > 20$, где λ_e определено в В.1.15».

Поскольку исследуемый объект является решетчатой конструкцией, данное требование СП 20.13330.2016 о проверке на резонансное вихревое возбуждение в целом на рассматриваемое сооружение не распространяется.

Тем не менее, в рамках экспериментальных исследований был проведен анализ аэродинамической нагрузки на жесткую модель решетчатой опоры мосто-

вого перехода*, а также пульсационной составляющей аэродинамического воздействия на объект с целью определения возможности возникновения аэродинамической устойчивости типа резонансного вихревого возбуждения.

Резонансное вихревое возбуждение — интенсивное нарастание амплитуд аэроупругих автоколебаний элементов конструкций поперек потока, наблюдаемое при совпадении одной из собственных частот их колебаний с частотой срыва вихрей Кармана [4]. Амплитуды этих колебаний зависят от формы поперечного сечения элементов, жесткостных и диссипативных свойств элементов конструкций в плоскости колебаний [5].

Причина возникновения данного явления — формирование устойчивой срывной дорожки вихрей Кармана с характерными частотами, совпадающими с собственной частотой колебаний конструкции [6]. Для оценки возможности возникновения резонансного вихревого возбуждения допустимо выполнять моделирование на жесткой геометрически подобной модели, моделирование динамических характеристик реального объекта требуется при необходимости определения амплитуд колебаний конструкции [7]. Следует отметить, что изготовление динамически подобной модели решетчатой конструкции является чрезвычайно трудоемким процессом и имеет такие существенные недостатки, как [8]:

- высокая стоимость и значительные сроки исследований;

- соблюдение одновременно целого ряда фундаментальных критериев подобия, что чрезвычайно сложно, а в большинстве случаев и невозможно;

- низкая точность получаемой научной информации о фактических критериях возникновения и условиях существования явлений аэроупругой неустойчивости;

- невозможность варьировать основные (массовые, жесткостные и пр.) характеристики модели при потенциальных конструктивных изменениях объекта.

* Подобная конструкция может применяться также и для башни с газотовпящим стволом станции тепловой генерации, и для снабжения электричеством удаленных тяговых подстанций железных дорог.

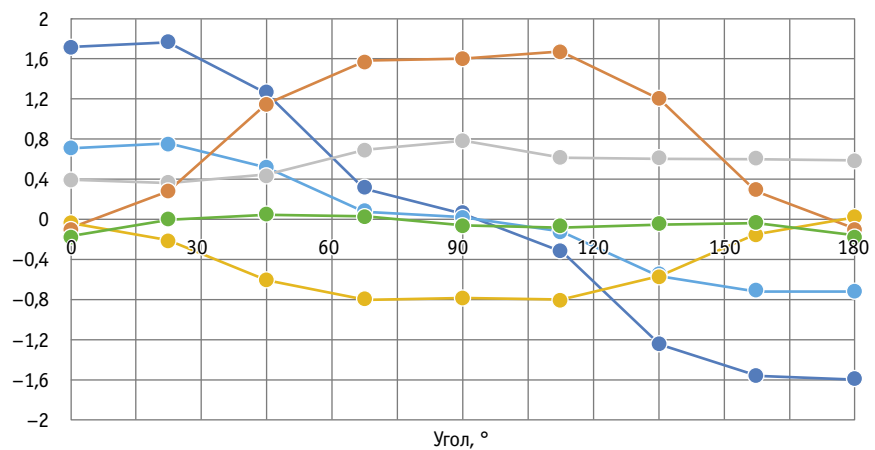


Рис. 6. График зависимости аэродинамических коэффициентов $c_{x'}$, $c_{y'}$, $c_{z'}$ и $c_{mx'}$, $c_{my'}$, c_{mz} при изменении угла атаки от 0 до 180°:

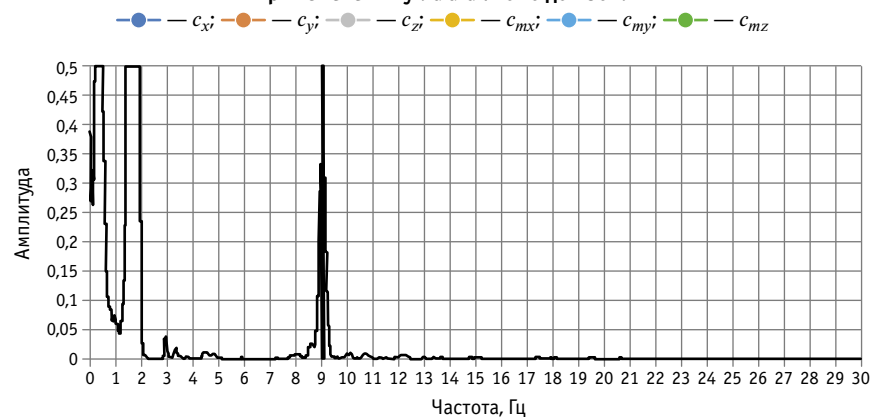


Рис. 7. Спектральная характеристика собственных частот колебаний измерительного стенда

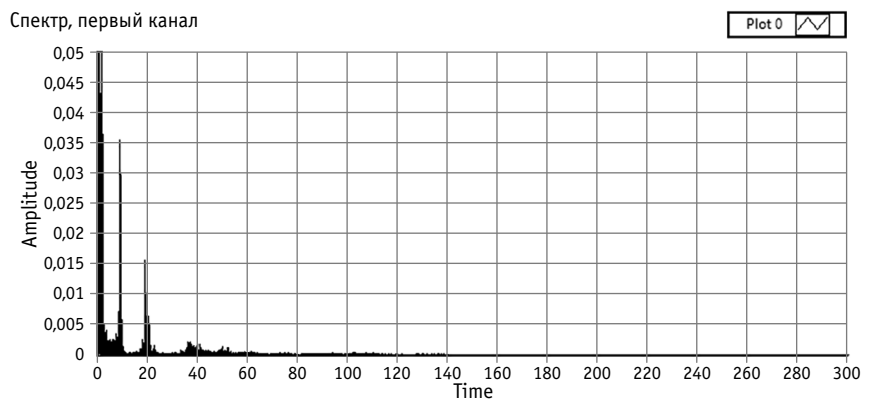


Рис. 8. Спектральная характеристика колебаний интегральной ветровой нагрузки на модели

Таким образом, целесообразно проводить исследования на жестких геометрически подобных моделях, анализ возможности возникновения резонансного вихревого возбуждения выполнять на основании оценки спектральной характеристики колебаний измерительного стенда, который содержит частоты колебаний

интегральной ветровой нагрузки на модели, а также частоты колебаний срывного потока за моделью [9].

В ходе эксперимента на всех скоростях потока были выявлены слабые колебания объекта на частотах, соответствующих собственным частотам измерительной системы (рис. 7, 8). Подобные

слабые колебания всегда возникают при проведении физических исследований из-за невозможности создания в реальности абсолютно жесткой системы и в расчет не принимаются [10]. Анализ остальной части частотного спектра не выявил возникновения характерных колебаний интегральной ветровой нагрузки на модели.

Кроме того, было проведено исследование колебаний срывного потока за моделью, которое также не выявило, как и предыдущем случае, наличие установившихся колебаний (рис. 9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При назначении аэродинамических коэффициентов и расчете ветровой нагрузки на объекты повышенного уровня ответственности допустимо использование типовых схем, приведенных в приложении В «Ветровые нагрузки» СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», в том случае, если повышенный уровень ответственности рассматриваемых сооружений обусловлен не геометрической сложностью и уникальностью конструкции, а технологическими процессами. При существенном отличии конструкции исследуемого объекта от данных типовых схем необходимо провести

Спектральная плотность

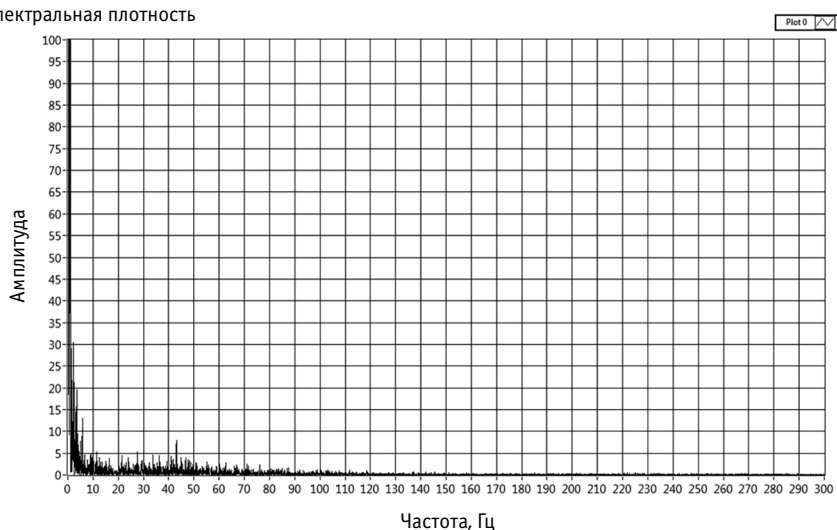


Рис. 9. Спектральная характеристика колебаний срывного потока за моделью

исследования в аэродинамических трубах и уточнить значения аэродинамических коэффициентов.

В статье рассмотрена методика таких исследований для решетчатых конструкций и приведен пример апробации методики на реальном объекте. Представленная методика позволяет не только определить значения аэродинамических коэффициентов, необходимых для расчета ветровой нагрузки на конструк-

цию в целом, но и оценить возможность возникновения вихревого резонансного возбуждения.

На основании анализа колебаний интегральной ветровой нагрузки на жесткой модели опоры с решетчатой частью и сплошной центральной колонной, а также колебаний срывного потока за моделью установлено, что исследуемое сооружение не подвержено эффектам вихревого резонансного возбуждения.

Литература

1. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. Москва : Минстрой России, 2016. 80 с.
2. Казакевич М. И. Основы расчетов сооружений на ветровые воздействия: монография. Москва : Изд-во МИСИ-МГСУ, 2019. 171 с.
3. Poddaeva O., Churin P., Gribach J. Experimental studies of the gravity-type foundation windage in a wind tunnel // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. Pp. 855–863.
4. Pomelov V., Poddaeva O., Churin P. Experimental studies of wind impact on coke chambers // MATEC Web of Conferences 251, 02034 (2018).
5. Determination of Hazardous Areas at Bridge Crossings Under Wind Impacts / O. Poddaeva, A. Loktev, A. Zavyalov, E. Sorokina // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 402 LNNS. Pp. 1026–1034.
6. Churin P. S., Gribach J. S. Experimental study of wind and snow influence on projected airport complex // Industrial and Civil Engineering. 2016. Issue 11. Pp. 24–27.
7. Churin P. S., Fedosova A. N., Egorychev O. O. Experimental study of the aerodynamic effects on the monument // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1425 (1).

References

1. Set of rules 20.13330.2016. Loads and impacts. Updated version of SNiP 2.01.07 85* [SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07–85*]. Moscow : Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation, 2016. 80 p.
2. Kazakevich M. I. Basics of calculation of constructions on wind influence [Osnovy raschetov sooruzheniy na vetrovye vozdeystviya] : monograph. Moscow : Publishing House of NRU MGSU, 2019. 171 p.
3. Poddaeva O., Churin P., Gribach J. Experimental studies of the gravity-type foundation windage in a wind tunnel // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. Pp. 855–863.
4. Pomelov V., Poddaeva O., Churin P. Experimental studies of wind impact on coke chambers // MATEC Web of Conferences 251, 02034 (2018).
5. Determination of Hazardous Areas at Bridge Crossings Under Wind Impacts / O. Poddaeva, A. Loktev, A. Zavyalov, E. Sorokina // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 402 LNNS. Pp. 1026–1034.
6. Churin P. S., Gribach J. S. Experimental study of wind and snow influence on projected airport complex // Industrial and Civil Engineering. 2016. Issue 11. Pp. 24–27.
7. Churin P. S., Fedosova A. N., Egorychev O. O. Experimental study of the aerodynamic effects on the monument // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1425 (1).



8. Математическое моделирование аэродинамического поведения антенно-мачтовых сооружений при организации связи на железнодорожном транспорте / А. А. Локтев, В. В. Королев, О. И. Поддаева [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 2. С. 77–83. ISSN 2223–9731.
9. Однопутный железнодорожный мостовой переход / А. М. Михальченко, В. В. Королев, И. В. Шишкина, В. А. Локтева // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: межвузовский сборник научных трудов. Москва : Российский университет транспорта, 2021. С. 266–272.
10. Королев В. В., Клековкина Н. А. Расчет зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение вследствие аварийной ситуации // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2018. Т. 12. № 12 (12). С. 155–157.

8. Mathematical modeling of aerodynamic behavior of antenna-mast structures when designing communication on railway transport [Matematicheskoe modelirovanie aerodinamicheskogo povedeniya antenno-machtovykh sooruzheniy pri organizatsii svyazi na zheleznodorozhnom transporte] / A. A. Loktev, V. V. Korolev, O. I. Poddaeva [et al.] // VNIIZhT Scientific Journal. 2018. Vol. 77. No. 2. Pp. 77–83. ISSN 2223–9731.
9. Single-track railway river crossing [Odnoputnyy zheleznodorozhnyy mostovoy perekhod] / A. M. Mikhalkhenkov, V. V. Korolev, I. V. Shishkina, V. A. Lokteva // Modern problems of railway transport work improvement: interuniversity collection of scientific papers. Moscow: RUT (MIIT), 2021. Pp. 266–272.
10. Korolev V. V., Klekovkina N. A. Calculation of buildings and structures on the progressive collapse due to an emergency [Raschet zdaniy i sooruzheniy na progressiruyushhee obrushenie vsledstvie avariynoy situatsii] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2018. Vol. 12. No. 12 (12). Pp. 155–157.

Объем статьи 0,65 авторских листа

УДК 656.212.6

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

Вадим Борисович Свердлов, кандидат технических наук, инспектор по сохранности вагонного парка Свердловской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия

РЕЛЯЦИОННАЯ СТРАТЕГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ ВАГОННОГО ПАРКА

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

Vadim Borisovich Sverdlov, PhD in Engineering, inspector for safety of car fleet of car service division, Sverdlovsk Infrastructure Directorate, Ekaterinburg, Russia

Relational strategy of car fleet safety assurance

Аннотация

Рассмотрено развитие вагонного хозяйства после реформирования железнодорожного транспорта и создания ОАО «РЖД». Показаны и проанализированы образовавшиеся коммерческие и производственные связи между участниками перевозочного процесса. Выявлены противоречия между участниками перевозочного процесса, приводящие к конфликтам, требующим решения. Отмечено, что к уравниванию конфликтов необходимо подходить на основе использования накопленного научного опыта по организации взаимодействия вагоноремонтного комплекса с внешней средой. Предложено решать задачу уравнивания конфликтов ОАО «РЖД» с внешней средой при помощи реляционной стратегии. Разработана капиталоецентрическая модель реляционного пространства ОАО «РЖД» относительно сохранности вагонного парка, и определены основные направления создания реляционной стратегии ОАО «РЖД» в вагонном хозяйстве.

Ключевые слова: повреждение вагона, сохранность вагонного парка, вагоноремонтный комплекс, актор, капиталоецентрическая модель, реляционная стратегия, внутрифирменная реляция.

Abstract

The paper considers development of car services after reformation of railway transport and creation of the JSC «RZD». The authors have presented and analysed commercial and production connections between participants of transportation process. They have revealed contradictions between participants of transportation process leading to conflicts that need solutions. It is noticed that for balancing of conflicts it is necessary to approach on the basis of the use of the accumulated scientific experience on organization of interaction of the car-repair complex with external environment. As a result, the authors suggest solving a task of balancing the JSC «RZD» conflicts with external environment with the use of relation strategy. They have developed a capital-centric model of the JSC «RZD» relation space with regard to safety of car fleet and have determined main directions for creating a relation strategy of the JSC «RZD» in car services.

Keywords: car damage, safety of car fleet, car-repair complex, actor, capital-centric model, relational strategy, inter-company relation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-22-27

ВВЕДЕНИЕ

До распада СССР железнодорожный транспорт находился в ведении одного собственника — государства. В части вагонного хозяйства государство владело парком вагонов, ремонтной базой, железными дорогами, по которым перемещались вагоны. Эксплуатация железнодорожного транспорта, ремонт подвижного состава находились в ведении Министерства путей сообщения (МПС). Вагонные депо занимались и ремонтом, и эксплуатацией (техническим обслуживанием) обезличенного грузового вагона, при необходимости устанавливая запасные части из общего материального склада.

Содержание путей необщего пользования на территории предприятий, таких как порты, заводы, карьеры и т.д., выполнявших грузовые операции с вагонами, и обеспечение сохранности вагонов при операциях погрузки и выгрузки тоже жестко контролировалось МПС.

Созданная в то время инспекция по обеспечению сохранности вагонного парка располагала колоссальными полномочиями. На каждой дороге интересы инспекции представлял старший инспектор управления вагонного хозяйства по сохранности вагонного парка (аббревиатура — ЦВГР). При выявленных нарушениях содержания путей необщего пользования либо нарушениях требований нормативных документов по обеспечению сохранности вагонного парка при производстве грузовых операций подача вагонов прекращалась до устранения нарушений, а это простои, срыв сроков, невыполнение плана.

В 2003 г. МПС было реорганизовано в ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»). Вагонный комплекс разделили на эксплуатационную и ремонтную составляющие. Эксплуатационная составляющая осталась в ОАО «РЖД» и в настоящее время входит в инфраструктурный комплекс (Центральную дирекцию инфраструктуры — филиал ОАО «РЖД»), а ремонт вагонов перешел к частным собственникам. Таким образом, самым существенным преобразованием вагонного комплекса стала приватизация подвижного состава. В собственности ОАО «РЖД» осталась лишь малая доля вагонов, необходимых для содержания инфраструктуры.

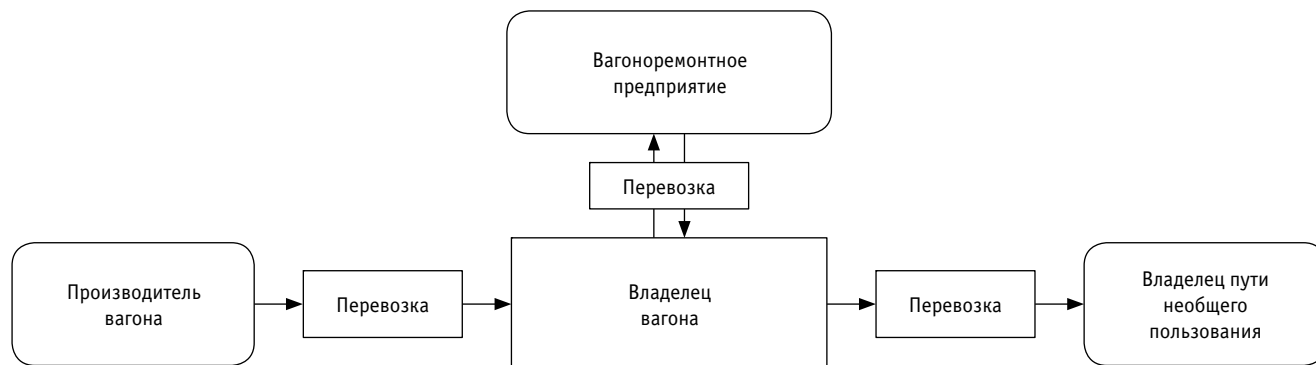


Рис. 1. Модель рыночных отношений между участниками перевозочного процесса

ИТОГИ РЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В СФЕРЕ ВАГОННОГО ХОЗЯЙСТВА

Реформирование железнодорожного транспорта проводилось в три этапа:

- первый — 2001–2002 гг.;
- второй — 2003–2005 гг.;
- третий — 2006–2010 гг.

В результате между участниками перевозочного процесса (УПП), ранее входившими в цельный комплекс вагонного хозяйства, были сформированы рыночные отношения, которые характеризуются следующими связями (рис. 1):

- изготовитель вагона — владелец вагона;
 - владелец вагона — ремонтный комплекс;
 - владелец вагона — владелец пути необщего пользования.
- Рассмотрим эти связи.

1. Изготовитель вагона — владелец вагона.

Действовавшая в МПС и СССР организация производства нового подвижного состава обеспечивала взаимодействие между изготовителями вагонов. В период реорганизации часть предприятий либо прекратила свое существование, либо переключилась на выпуск другой продукции. В настоящее время в Российской Федерации можно выделить несколько крупных производителей грузовых вагонов. Прежде всего, это научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» (УВЗ), основная промышленная площадка которой находится на Урале в Нижнем Тагиле. Далее следует назвать научно-производственную корпорацию «Объединенная Вагонная Компания» (НПК ОВК), центром которой является Тихвинский вагоностроительный завод, специализирующийся на выпуске инновационных вагонов. На третьей позиции находятся АО «Алтайвагон» с основным производством в Новоалтайске и компания «РМ Рейл» с производством грузовых специализированных вагонов на предприятии «РМ Рейл Рузхиммаш» в Рузаевке (Республика Мордовия). Всего в 2021 г. отечественные вагоностроительные предприятия поставили в Россию и страны «пространства 1520» 63,1 тыс. вагонов, что на 10,9 % больше, чем годом ранее (рис. 2).

2. Владелец вагона — ремонтный комплекс.

Наиболее полно теоретические исследования и разработка методологических основ формирования адаптивных механизмов организации вагоноремонтного комплекса, повышающих эффективность управленческих решений в процессе ремонта вагонов, представлены в [1].

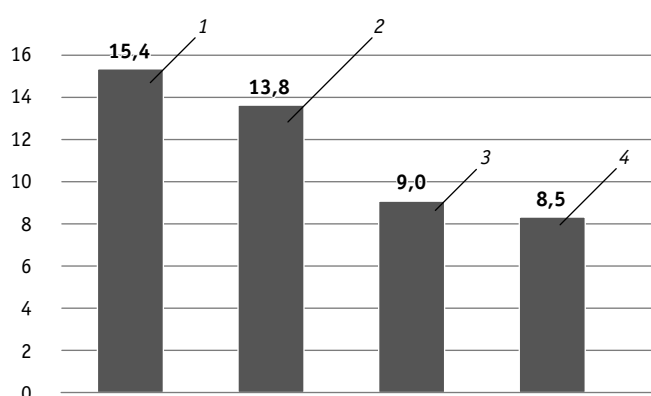


Рис. 2. Производство новых вагонов в России в 2021 г., тыс. шт.:
1 — НПК ОВК; 2 — УВЗ; 3 — АО «Алтайвагон»; 4 — «РМ Рейл»

В ходе реформирования железнодорожного транспорта произошло разделение вагонного хозяйства на эксплуатационную и ремонтную составляющую. Изначально вагоноремонтная составляющая выделена в самостоятельный комплекс с хозяйствующим субъектом — Центральной дирекцией по ремонту грузовых вагонов (ЦДРВ), состоящей из дорожных дирекций по ремонту грузовых вагонов (ДРВ).

Позже, в 2011 г., были образованы три вагоноремонтные компании (ВРК-1,2,3) — филиалы ОАО «РЖД», поделившие рынок ремонта грузовых вагонов. Но на этом реформирование вагоноремонтного комплекса не закончилось. В последние годы наметился активный переход всего рынка ремонтных услуг в частный бизнес (рис. 3).

3. Владелец вагона — владелец пути необщего пользования.

Зачастую владелец пути необщего пользования не является предприятием, выполняющим погрузочно-разгрузочные работы с вагоном. Есть компании, которые специализируются только на предоставлении услуг по перемещению вагонов от места погрузки/выгрузки к путям общего пользования ОАО «РЖД». В договорах на эксплуатацию путей необщего пользования оговаривается ответственность промышленных предприятий за сохранность вагонов при маневровых и погрузочно-разгрузочных работах со ссылкой на действующий ГОСТ 22235–2010 [2], в котором определены требования к машинам и механизмам, взаимодействующим с вагоном при грузовых операциях.

ВЗАИМООТНОШЕНИЯ ОАО «РЖД» И УЧАСТНИКОВ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА

Взаимоотношения ОАО «РЖД» с другими участниками рынка железнодорожных перевозок можно охарактеризовать наличием следующих двусторонних связей (рис. 4):

перевозка вагона, когда ОАО «РЖД» заключает соглашение с владельцем вагона;

прием вагона после операций погрузки/выгрузки от предприятия — владельца путей необщего пользования. Сегодня это называется «допуск вагона на инфраструктуру». Прием вагона после ремонта на предприятии вагоноремонтного комплекса — это тоже допуск вагона на инфраструктуру.

В МПС взаимоотношения между УПП регулировались едиными документами, обязательными для применения всеми участниками рынка железнодорожных перевозок. В современных реалиях требования к сохранности вагонного парка носят добровольный характер применения [2].

Конфликт интересов возникает, когда участники перевозочного процесса имеют разные цели для получения прибыли. Заложниками такого конфликта становятся вагон и ОАО «РЖД» — как владелец инфраструктуры, отвечающий за исправность вагона и безопасное его проследование по путям общего пользования (допуск вагона на инфраструктуру). Конфликты между участниками перевозочного комплекса можно описать следующим образом.

1. Конфликт в паре ОАО «РЖД» — собственник вагона возникает исходя из обязанностей ОАО «РЖД» обеспечить прием вагона от предприятия, производившего погрузку/выгрузку вагона и дальнейшую его эксплуатацию на путях ОАО «РЖД». Появляется ответственность ОАО «РЖД» перед собственником вагонов за пропуск поврежденного вагона в эксплуатацию либо за повреждение вагона в процессе перевозки. Судебная практика и претензионная работа ОАО «РЖД» свидетельствует, что, как правило, претензии предъявляются к колесам, когда на поверхности катания образуются ползуны и выщербины [3]. Чаще всего причиной образования односторон-

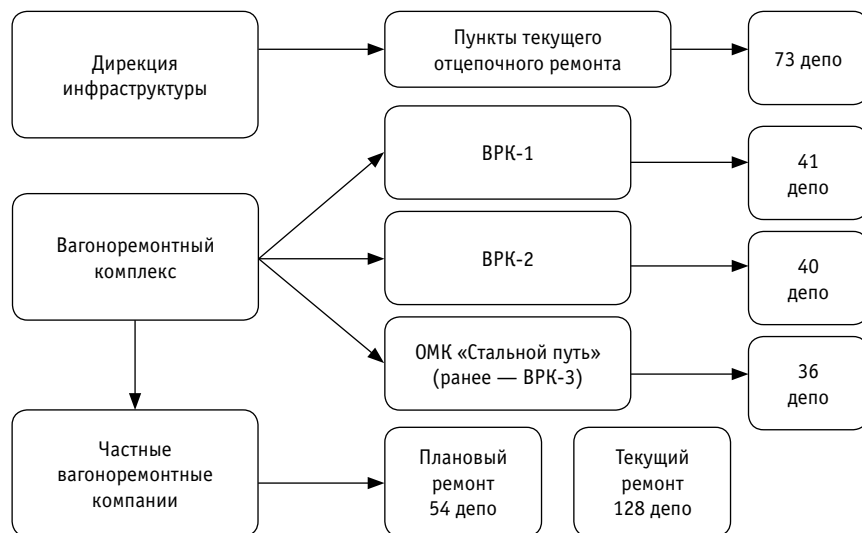


Рис. 3. Организация ремонта грузовых вагонов в Российской Федерации

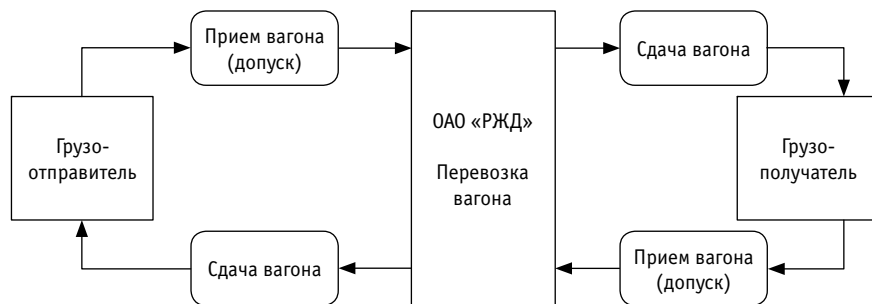


Рис. 4. Организация взаимодействия ОАО «РЖД» с участниками рынка железнодорожных перевозок

них ползунов является роспуск вагона на немеханизированной сортировочной горке, когда торможение осуществляется при помощи горочных тормозных башмаков. Позже на месте ползунов образуются выщербины. И если требования к отцепкам вагонов по односторонним ползунам ограничиваются глубиной более 1 мм, что крайне редкое событие на сортировочной горке, то, согласно требованиям [4], эксплуатация вагона с выщербиной глубиной более 10 мм и длиной более 50 мм недопустима. Об интенсивном образовании выщербин говорит тот факт, что, по данным Проектно-конструкторского бюро вагонного хозяйства [5], в 2021 г. по всей сети железных дорог было зафиксировано 15 тыс. вагонов с односторонними ползунами и 300 тыс. вагонов с выщербинами размером более допустимых величин. За повреждение колес собственник также предъявляет ОАО «РЖД» свои убытки к возмещению.

2. Конфликт в паре ОАО «РЖД» — владелец путей необщего пользования. Поскольку ОАО «РЖД» обязано запрещать выпуск на пути общего пользования поврежденного вагона, то у ОАО «РЖД» возникают претензии к грузополучателю/грузоотправителю за повреждение вагона при грузовых операциях. Документы по сохранности вагонного парка регламентируют технологии грузовых операций с вагоном. Это требования к машинам и механизмам, запрет на выгрузку вагонов рядом устройств (например, грейферами), контроль за процессом разогрева грузов (зимой грузы смерзаются, их разогревают в специальных устройствах, называемых тепляками).

Прием вагона после ремонта на предприятии вагоноремонтного комплекса — это тоже допуск на инфраструктуру. Более подробный анализ вагоноремонтного комплекса рассматривается в работах [6, 7].

КАПИТАЛОЦЕНТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОТНОШЕНИЙ УЧАСТНИКОВ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА

В решении задач по организации вагоноремонтного производства и в исследовании взаимодействия вагоноремонтного комплекса с внешней средой активное участие принимали российские ученые, поэтому данные вопросы в настоящее время наиболее изучены. В частности, для структурирования внешнего воздействия разработана модель взаимодействия вагоноремонтного комплекса с внешним окружением [8], представляющая собой ядро (микроэкономика) и внешние сферы (мини-, миди-, макро- и глобальная экономика) (рис. 5). Регулярный анализ радиальных и циклических (межсекторных) потоков денежных средств позволяет выявлять неблагоприятное влияние изменений окружающей среды.

В центре всех рассмотренных конфликтов находится ОАО «РЖД», как организация, наделенная в соответствии с российским законодательством правом и обязанностью обеспечивать безопасность федерального железнодорожного транспорта.

Задача уравнивания конфликтов между ОАО «РЖД» и внешней средой может быть решена путем разработки реляционной стратегии ОАО «РЖД» в области сохранности вагонного парка. В работах [9, 10] реляционная стратегия предприятия характеризуется как стратегия, обеспечивающая формирование реляционного пространства на основе взаимовыгодных отношений с участниками реляции. Для успешного стратегического планирования реляционную стратегию ОАО «РЖД» необходимо рассматривать не только как взаимодействие с внешней средой, но и как взаимодействие внутри ОАО «РЖД». Поэтому предлагается ввести в оборот такой термин, как актор реляционных взаимодействий. В общепринятом понимании актор — это действующий субъект (индивидуальный или коллективный), индивид, социальная группа, организация, институт, общность людей, совершающих действия, направленные на других. Термины «акторы» и «участники альянса» можно считать синонимами. То есть акторы — это участники рынка, между которыми возникают реляционные взаимодействия. Акторы объединяются в альянсы, становясь их участниками. Учитывая взаимодействие участников перевозочного процесса, к акторам предлагается относить тех из них, кто непосредственно участвует в организации реляционного пространства ОАО «РЖД». При этом следует принимать во внимание, что реляционная стратегия должна рассматривать участие не только внешнего, но и внутреннего реляционного пространства. Таким образом, акторы внешних реляций — это вагоноремонтные предприятия, владельцы путей необщего пользования, в том числе вагоноремонтные предприятия, а акторы внутренних реляций — структурные подразделения ОАО «РЖД», дочерние и зависимые общества.

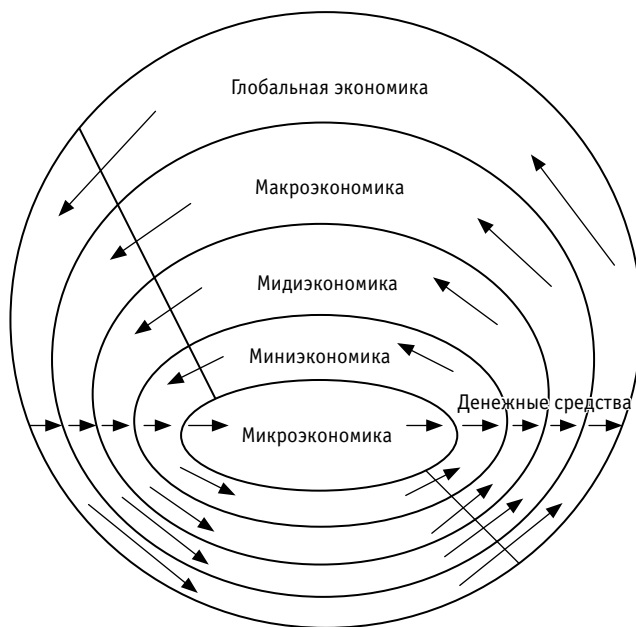


Рис. 5. Капиталоцентрическая модель вагоноремонтного предприятия

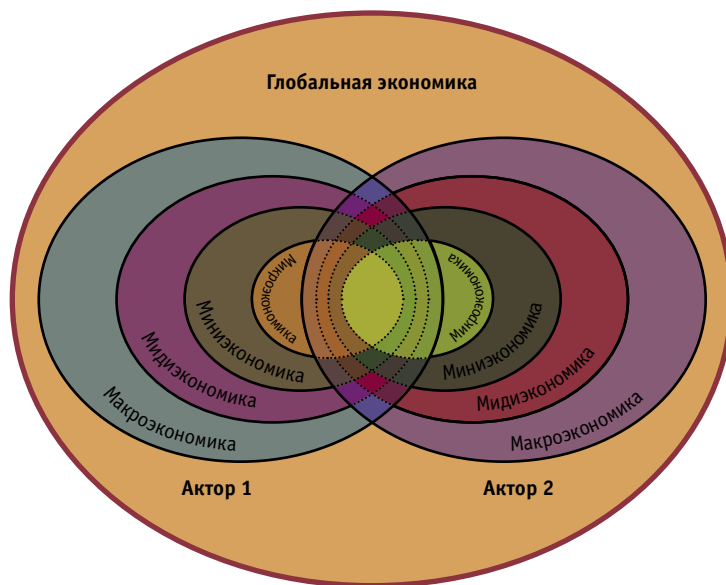


Рис. 6. Капиталоцентрическая модель реляционного пространства двух акторов

Капиталоцентрическая модель парного реляционного пространства, обусловленная взаимодействием двух акторов, представлена на рис. 6. Ядро «микроэкономика» представляет собой организацию основной деятельности предприятия. Например, для ОАО «РЖД» это перевозочный процесс, для вагоноремонтного предприятия — получение прибыли от эксплуатации вагона. В ядре определяется влияние внутренних переменных (цель, структура, задачи, технология и кадры) на каждого актора. Новые цели конкретизируются в измененных задачах. Решение этих задач требует обновления технологий, для чего необходимы обучение и переподготовка персонала.

Деятельность акторов в первой внешней сфере капиталочетической модели — это миниэкономика, т.е. ближайшее его окружение (потребители, поставщики и соисполнители, а также собственные структурные подразделения, участвующие в перевозочном процессе). Благополучие каждого актора напрямую зависит от того, как относятся потребители к предлагаемым услугам. Например, эксплуатационные вагонные депо нуждаются в запасных частях, инструментах, а также трудовых ресурсах. Рост стоимости запасных частей, цен на энергоносители, повышение заработной платы увеличивает стоимость перевозки.

Мидиэкономика — это отраслевая сфера, здесь располагаются потребители и поставщики услуг для организации перевозочного процесса, а также конкуренты ОАО «РЖД». Взаимоотношения с конкурентами необходимы для понимания предпочтений у потребителя, а также создания общих с конкурентами проектов на взаимовыгодных условиях.

Макроэкономика регулирует деятельность железнодорожного транспорта в соответствии с федеральными законами [11–13], определяющими экономические, плановые и организационные основы деятельности акторов. Закон устанавливает место и роль транспорта в экономике и социальной сфере России, регламентирует его отношения с органами государственной власти, другими видами транспорта, юридическими лицами и гражданами. При разработке реляционной стратегии следует учитывать принадлежность каждого участника перевозочного процесса к той или иной экономической группе. Например, потребитель услуг железнодорожного транспорта может иметь такую основную производственную деятельность, как металлургия.

Общей оболочкой реляционной модели является глобальная экономика — это единая система, которая имеет многоуровневую структуру и объединяет как экономику внутри страны, так и экономику различных стран мира. Например, рост темпов добычи природного сырья приводит к увеличению нагрузки на железнодорожный транспорт, следовательно, возрастает нагрузка на инфраструктуру и грузовые вагоны. Все это ведет к возрастанию роли института сохранности подвижного состава как части железнодорожного транспорта.

Для разработки реляционной стратегии по обеспечению сохранности вагонного парка важное значение имеет внутрифирменная реляция, т.е. реляционные отношения, которые складываются внутри ОАО «РЖД» и которые должны рассматриваться как самостоятельная экономическая категория. При внутрифирменной реляции необходимо учесть взаимоотношения внутри ОАО «РЖД» среди структурных подразделений общества, участвующих в перевозочном процессе и, соответственно, оказывающих влияние на уровень сохранности вагонного парка.

РАЗРАБОТКА РЕЛЯЦИОННОЙ СТРАТЕГИИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ СОХРАННОСТИ ВАГОННОГО ПАРКА

В работе [14] оценка реляционного потенциала предприятия строится на использовании четырех показателей — доверии, валентности, конгруэнтности, пертинентности.

Доверие — это совокупность социально-экономических и иных правил, определяющих нормы поведения и механиз-

мы контроля. Для акторов реляционной стратегии как внутри, так и вне ОАО «РЖД» факторы доверия должны включать: общие правила и законы, соответствующие уставу железнодорожного транспорта, правилам технической эксплуатации и другим документам, принятым для всех участников рынка железнодорожных перевозок;

общую цель, получение выгоды от реляционного взаимодействия при равноправии акторов без привязки к доле вклада каждого из них;

взаимную адаптацию бизнес-процессов.

При многофакторной модели показатель доверия определяется по формуле

$$D = w_{1d}f_{1d} + w_{2d}f_{2d} + \dots + w_{nd}f_{nd}, \quad (1)$$

где $f_{1d} \dots f_{nd}$ — факторы доверия;

$w_{1d} \dots w_{nd}$ — весовые коэффициенты, $\sum w_{id} = 1$.

Валентность — способность актора к осуществлению реляций, приводящих к улучшению характеристик каждого участника:

$$V = w_{1v}f_{1v} + w_{2v}f_{2v}, \quad (2)$$

где f_{1v} и f_{2v} — факторы валентности;

w_{1v} и w_{2v} — весовые коэффициенты, $\sum w_{iv} = 1$.

Конгруэнтность — целостность реляционного пространства каждого из акторов:

$$K = w_{1k}f_{1k} + w_{2k}f_{2k}, \quad (3)$$

где f_{1k} и f_{2k} — факторы конгруэнтности;

w_{1k} и w_{2k} — весовые коэффициенты, $\sum w_{ik} = 1$.

Пертинентность — единое информационное пространство участников реляции, его достоверность и значимость. Показатель пертинентности выявляет степень достаточности информации, необходимой для оценки эффективности реляции:

$$P = I_{\text{общ}} - I_{\text{полезная}}, \quad (4)$$

где $I_{\text{общ}}$ и $I_{\text{полезная}}$ — количество общей и полезной информации.

В формулах (1)–(3) весовые коэффициенты означают значимость того или иного фактора и могут меняться в процессе реляционных взаимодействий между акторами как во внешней, так и во внутренней реляции. Также они могут зависеть от стабильности отношений между акторами, изменяющейся внешней среды, возникающих разногласий, приводящих к отклонению установленных реляционным соглашением договоренностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенное направление в разработке реляционной стратегии обеспечения сохранности вагонного парка дает возможность упорядочить взаимоотношения между собственниками вагонов, владельцем инфраструктуры и владельцем пути общего пользования. Развитие реляционной стратегии позволяет создать модель взаимодействия структурных подразделений

ОАО «РЖД» с внешней средой (собственниками путей необщего пользования и владельцами подвижного состава) и сформировать механизм оценки сохранности вагонного парка при допуске вагонов на инфраструктуру.

2. В основу реляционной стратегии ОАО «РЖД» должен быть положен реляционный механизм, формирующий доверительные взаимоотношения между всеми сторонами — акторами. Реляционная стратегия позволит обеспечить такое распре-

деление ресурсов, при котором будет достигнута максимальная эффективность плановых показателей (инвестиций, расходов, доходов и капитала) каждого актора на всех этапах его работы.

3. Реляционная стратегия ОАО «РЖД» должна включать и внутреннюю, и внешнюю модели. Внешняя модель заключается в создании стратегических альянсов с внешней средой. Внутренняя модель (внутрифирменная реляция) описывает взаимодействие подразделений и дочерних обществ ОАО «РЖД».

Литература

1. Сирина Н. Ф. Методологические основы формирования адаптивных механизмов организации вагоноремонтного комплекса: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Екатеринбург, 2009. 295 с.
2. ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. Москва : Стандартинформ, 2011. 18 с.
3. Сильвестров М. А. О практике по судебным спорам с вагонладельцами // Бюллетень Правового департамента. 2020. № 24. С. 11–15.
4. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Москва : Инфра-М, 2019. 536 с.
5. Анализ положения с обеспечением сохранности вагонного парка. Москва : Проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства, 2022. 86 с.
6. Сирина Н. Ф., Цыганов В. В. Адаптивная организация вагоноремонтного комплекса. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2008. 152 с.
7. Смольянинов А. В., Кармацкий В. Ф., Соломенников А. А. Анализ текущего состояния, проблемы и перспективы вагоноремонтного производства в Уральском федеральном округе // Инновационный транспорт. 2020. № 4 (38). С. 37–43. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-4-37-43. ISSN 2311–164X.
8. Сирина Н. Ф. Капиталоцентрическая модель вагонного хозяйства // Проблемы транспорта Дальнего Востока: материалы шестой Международной научно-практической конференции, 5–7 октября 2005 г. Владивосток : Дальневосточное отделение Российской академии транспорта, 2005. С. 60–62.
9. Крымов С. М., Левенцов В. А., Рогачева Ж. С. Формирование реляционных стратегий на предприятиях промышленности. Санкт-Петербург : Изд-во СПбПУ, 2017. 141 с.
10. Крымов С. М., Левенцов В. А. Реляционные стратегии современных предприятий. Санкт-Петербург : Изд-во СПбПУ, 2018. 136 с.
11. О железнодорожном транспорте в Российской Федерации: Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 17-ФЗ (с изменениями от 07.07.2003 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901838120> (дата обращения: 14.02.2022).
12. О безопасности железнодорожного подвижного состава (ТР ТС-001-2011): технический регламент ТС (с изменениями от 09.12.2011 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902293438> (дата обращения: 14.02.2022).
13. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации: Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ (с изменениями от 02.07.2021 г.). URL: <https://base.garant.ru/12129475/?ysclid=l7rews9iba983182902> (дата обращения: 14.02.2022).
14. Левенцов В. А. Модель формирования реляционных стратегий на предприятии // Среднерусский вестник общественных наук. 2018. Т. 3. № 4. С. 184–203. DOI: 10.22394/2071-2367-2018-13-4-184-203. ISSN 2071–2367.

References

1. Sirina N. F. Methodological basics for creating adaptive mechanisms of organization of car-repair complex [Metodologicheskie osnovy formirovaniya adaptivnykh mekhanizmov organizatsii vagonoremontnogo kompleksa]: DSc in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2009. 295 p.
2. GOST 22235–2010. Freight cars for 1520 mm gauge main line railways. General requirements for safety in loading-unloading and shunting operations [Vagony gruzovye magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshhie trebovaniya po obespecheniyu sokhrannosti pri proizvodstve pogruchno-razgruzochnykh i manevrovnykh rabot]. Moscow : Standardinform, 2011. 18 p.
3. Silvestrov M. A. On practice of legal disputes with car owners [O praktike po sudebnym sporam s vagonovladel'tsam] // Bulletin of Legal Department. 2020. No. 24. Pp. 11–15.
4. Operating rules of the Russian Federation railways [Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii]. Moscow : Infra-M, 2019. 536 p.
5. Analysis of state of car fleet safety assurance [Analiz polozheniya s obespecheniem sokhrannosti vagonnogo parka]. Moscow : Planning and design office of car service, 2022. 86 p.
6. Sirina N. F., Tsyganov V. V. Adaptive organization of car-repair complex [Adaptivnaya organizatsiya vagonoremontnogo kompleksa]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2008. 152 p.
7. Smolyaninov A. V., Karmatskiy V. F., Solomennikov A. A. Analysis of the current state, problems and prospects of car repair production in the Ural Federal district [Analiz tekushhego sostoyaniya, problemy i perspektivy vagonoremontnogo proizvodstva v Ural'skom federal'nom okruge] // Innotrans. 2020. No. 4 (38). Pp. 37–43. DOI: 10.20291/2311–164X-2020-4-37-43. ISSN 2311–164X.
8. Sirina N. F. Capital-centric model of car services [Kapitalotsentricheskaya model' vagonnogo khozyaystva] // Transport problems of the Far East: Proceedings of 6th International scientific and practical conference, October 5–7, 2005. Vladivostok : Far East branch of Russian Academy of Transport, 2005. Pp. 60–62.
9. Krymov S. M., Leventsov V. A., Rogacheva Zh. S. Formation of relational strategies at industrial enterprises [Formirovanie relyatsionnykh strategiy na predpriyatiyakh promyshlennosti]. St. Petersburg : Publishing House of SPbPU, 2017. 141 p.
10. Krymov S. M., Leventsov V. A. Relational strategies of modern enterprises [Relyatsionnye strategii sovremennykh predpriyatiy]. St. Petersburg : Publishing House of SPbPU, 2018. 136 p.
11. On railway transport in the Russian Federation [O zheleznodorozhnom transporte v Rossiyskoy Federatsii]: Federal law of the Russian Federation dated 21.07.2005 No. 17-FZ (with additions dated 07.07.2003). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901838120> (access date: 14.02.2022).
12. On safety of railway rolling stock (TR CU-001-2011) [O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava (TR TS-001–2011)] : technical regulations (with additions dated 09.12.2011). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902293438> (access date: 14.02.2022).
13. Railway regulations of the Russian Federation [O zheleznodorozhnom transporte v Rossiyskoy Federatsii]: Federal law of the Russian Federation dated 21.07.2005 No. 18-FZ (with additions dated 02.07.2021). URL: <https://base.garant.ru/12129475/?ysclid=l7rews9iba983182902> (access date: 14.02.2022).
14. Leventsov V. A. The model of the formation of relational strategies in the company [Model' formirovaniya relyatsionnykh strategiy na predpriyatii] // Central Russian Journal of Social Sciences. 2018. Vol. 3. No. 4. Pp. 184–203. DOI: 10.22394/2071-2367-2018-13-4-184-203. ISSN 2071–2367.

УДК 656.02

Денис Жавдатович Сайфутдинов, аспирант кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Галина Адольфовна Тимофеева, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

РАСЧЕТ ГРАВИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК В РОССИИ ПО ДАННЫМ БАЗЫ О ПРОДАЖЕ БИЛЕТОВ

Denis Zhavdatovich Sayfutdinov, postgraduate student, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Galina Adolfovna Timofeeva, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Calculation of a gravity model of railway transportation in Russia according to ticket sales database

Аннотация

Исследование, представленное в статье, посвящено расчету и анализу гравитационной модели пассажирских перевозок железнодорожным транспортом между населенными пунктами России. Модель построена на основе данных, полученных в результате обработки базы автоматизированной системы управления «Экспресс» по продаже железнодорожных билетов. В статье описан авторский алгоритм частично автоматизированного скачивания данных, их последующей обработки и систематизации с целью уменьшения размерности задачи и построения гравитационной модели. Представлены результаты расчетов гравитационной модели в нескольких модификациях с различными мерами расстояния между станциями и способами сокращения размерности исходной матрицы для определения наиболее тесных связей. Приведены результаты сравнительного анализа адекватности полученных моделей.

Ключевые слова: распределение пассажиропотоков, транспортная сеть, гравитационная модель, матрица корреспонденций, функция тяготения, обработка данных, итерационный процесс.

Abstract

A study presented in the paper is dedicated to calculation and analysis of a gravity model of passenger transportation by railway transport between Russian settlements. The model is created on the basis of data gained in result of processing of a base of the automated control system for railway ticket sales «Express». The paper describes an author's algorithm of partly automated downloading of data, its processing and systematization aimed at decrease of a size of the problem and a creation of the gravity model. The paper presents results of calculation of the gravity model in various modifications with different distance measures between stations and methods of decrease of a size of an initial matrix for determination of the closest connections. The paper shows results of a comparative analysis of adequacy of gained models.

Keywords: distribution of passenger traffic, transport network, gravity model, correspondence matrix, gravity function, data processing, iterative process.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-28-33

ВВЕДЕНИЕ

Транспортная система Российской Федерации является одним из важнейших факторов, влияющих на социально-экономическое развитие. Для ее эффективного использования необходимо совершенствовать методы и алгоритмы оценки, анализа и прогнозирования пассажиропотоков. Исследование транспортных систем с помощью математических моделей и методов на сегодняшний день актуально наряду с развитием навигационно-коммуникационных технологий, которые позволяют реализовывать современные принципы управления транспортными потоками [1].

Количественное описание структуры пассажиропотоков выполняется с помощью матрицы корреспонденций, элементами которой являются объемы передвижений между каждой парой условных районов или населенных пунктов. При моделировании используются доступные демографические и социально-экономические данные о численности населения районов, основных направлениях перемещений и др. [2, 3].

Для расчета корреспонденций применяются гравитационные, энтропийные, модели конкурирующих возможностей и некоторые другие [4, 5].

ГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ НАХОЖДЕНИЯ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Идея построения гравитационной модели основана на законе тяготения. При моделировании взаимосвязей в транспортной системе в качестве тел рассматриваются населенные пункты, за массу тела принимается суммарный объем выезжающего или въезжающего потока пассажиров [6–11]. Физическое расстояние можно заменить другими видами затрат, связанными с передвижением (такими как цена проезда или длительность поездки).

В базовой форме гравитационная модель имеет вид [4, 6]

$$p_{ij} = k \frac{s_i d_j}{c_{ij}^2}, \quad i \in S, j \in D, \quad (1)$$

где p_{ij} — количество пассажиров, совершающих поездку между пунктами i и j ;

$k > 0$ — калибровочный коэффициент;

s_i — общий объем выезжающих пассажиров;

d_j — общий объем въезжающих пассажиров;

c_{ij} — удельные затраты на передвижение из пункта i в пункт j ;

S и D — множество пунктов отправления и прибытия на рассматриваемой территории.

В настоящее время систему (1), как правило, не используют из-за присущих ей существенных недостатков. Например, при увеличении объемов s_i и d_j в n раз модель приводит к увеличению корреспонденций в $2n$ раз, что не является адекватным. Поэтому вместо классической формы гравитационной модели (1) на практике применяют ее модифицированную версию в следующем виде [4]:

$$p_{ij} = \alpha_i \beta_j s_i d_j f(c_{ij}), \quad i \in S, j \in D, \quad (2)$$

где α_i и β_j — калибровочные коэффициенты, которые определяются из системы

$$\begin{cases} \alpha_i = \left[\sum_{j \in D} \beta_j d_j f(c_{ij}) \right]^{-1} \\ \beta_j = \left[\sum_{i \in S} \alpha_i s_i f(c_{ij}) \right]^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

где $f(c_{ij}) = e^{-\gamma c_{ij}}$ — функция тяготения.

При этом должно выполняться условие равенства суммарных объемов по въезду и выезду пассажиров со станций, т.е.

$$\sum_{i \in S} s_i = \sum_{j \in D} d_j. \quad (4)$$

В модели (2) и (3) исходными данными для настройки являются величины s_i , d_j , c_{ij} , которые получены на основе статистических данных о перемещениях. Параметры α_i и β_j (при известном значении γ) можно оценить с помощью метода Фратара, а для оценки γ использовать метод Хаймана [8].

Метод Фратара представляет собой итерационный процесс, в котором результаты расчета каждой предыдущей итерации служат исходными данными для следующей [9, 10]. Так, на первой итерации определяются начальные коэффициенты $\beta_j = (d_j)^{-1}$ для всех j . После этого для всех i вычисляются коэффициенты α_i подстановкой в уравнение из системы (3). Затем итерации по вычислению коэффициентов α_i и β_j путем подстановки значений в систему уравнений (3) повторяются до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность при сравнении известных значений s_i , d_j и их модельных значений.

Для оценки γ применяется метод Хаймана [8–10], который тоже основан на итерационном процессе вычислений. Перед началом итерационного процесса определяется дополнительная характеристика — средняя обобщенная стоимость поездки:

$$C^* = \frac{\sum_{i,j} p_{ij} c_{ij}}{\sum_{i,j} p_{ij}}. \quad (5)$$

На нулевой итерации задается значение $\gamma = \gamma_0 = (C^*)^{-1}$, после чего с использованием описанного выше метода Фратара вычисляются коэффициенты α_i и β_j , при помощи которых по формуле (2) определяются модельные корреспонденции p_{ij} . На основании полученной матрицы корреспонденций вычисляется модельное значение средней обобщенной стоимости поездки, соответствующее γ_0 :

$$C_0 = C(\gamma_0) = \frac{\sum_{i,j} p_{ij}(\gamma_0) c_{ij}}{\sum_{i,j} p_{ij}(\gamma_0)}. \quad (6)$$

Если $C(\gamma_0)$ находится в пределах заданной точности C^* , то параметр γ принимает значение γ_0 . В противном случае необходимо переходить к следующей итерации вычисления параметра γ :

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_0 C_0}{C^*}. \quad (7)$$

При помощи формулы (6) вычисляется $C_1 = C(\gamma_1)$ и сравнивается с C^* . Если C_1 совпадает с C^* с заданной точностью, значит, параметр γ найден, если не совпадает, то итерации поиска γ продолжаются:

$$\gamma_n = \frac{(C^* - C_{n-2})\gamma_{n-1} - (C^* - C_{n-1})\gamma_{n-2}}{C_{n-1} - C_{n-2}}. \quad (8)$$

Процесс идет до тех пор, пока $C(\gamma_n)$ и C^* не будут совпадать с заданной точностью [8–10].

ПОЛУЧЕНИЕ ДАННЫХ ПО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ПАССАЖИРСКИМ ПЕРЕВОЗКАМ

В качестве основного источника информации о железнодорожных пассажирских перевозках в наших исследованиях использовалась уникальная база данных в рамках автоматизированной системы управления (АСУ) «Экспресс» [12]. Перед основным анализом была выполнена предварительная обработка данных о пассажиропотоках между железнодорожными станциями.

Цель выгрузки состояла в получении набора данных о перемещениях пассажиров за август 2019 г. В связи с длительной выгрузкой информации с АСУ были выбраны данные за месяц. Исследования проводились на основании данных допандемийного периода, чтобы исключить влияние ограничений.

Сбор данных состоял из следующих этапов:

- 1) получение перечня всех станций, включенных в АСУ;

2) получение перечня всех станций, включенных в сервис tutu;

3) фильтрация станций, включенных в АСУ, путем сопоставления express-кодов станций из сервиса tutu;

4) скачивание данных о количестве пассажиров, выезжающих со станции или приезжающих на некоторую станцию, по каждому месяцу за 2019 г. с использованием специально разработанного бота arm_bot;

5) выбор из полученных данных 500 наиболее значимых по объему пассажиропотоков станций в Российской Федерации;

6) сопоставление полученных станций с помощью Application Programming Interface (API) сервиса tutu в пары станций, между которыми идет пассажиропоток;

7) скачивание данных о количестве пассажиров, перемещающихся между станциями за месяц, с помощью бота arm_bot.

Используемый в исследованиях бот, или робот, — это программа, которая создана, чтобы выполнять однотипные и повторяемые задачи по определенному алгоритму. В нашем случае бот представлял собой класс, написанный на языке JavaScript, с набором функций, обеспечивающих бесперебойную выгрузку данных [13]. Бот формирует HTTP-запросы с целью запроса данных с сервера «Экспресс». В процессе выгрузки данных с «Экспресс» возникали ошибки в виде внутренней ошибки сервера (500 Internal Server Error) и отправка сервером пустых параметров ответа, что значительно замедляло выгрузку. Поэтому после получения ответа сервера проверялась корректность данных. При положительном результате проверки данные записывались в память. Не прошедшие проверку данные отбрасывались, а сформированный запрос отправлялся на отложенное выполнение. После получения всех запрашиваемых данных информация записывалась в файл формата csv.

Для получения базы данных о пассажирских перевозках изначально были определены все станции, которые использовались в АСУ. Общее число всех станций составило около 37 тыс. Из-за большого количества станций с нулевыми или очень малыми значениями пассажиропотоков было принято решение использовать API сервиса tutu [14], чтобы уточнить список станций с ненулевыми значениями, для этого сравнивались уникальные коды станций формата express. После сопоставления списка станций из «Экспресс» и из tutu количество станций было сокращено до 2 тыс.

По завершении шестого этапа для выгрузки данных на седьмом этапе количество станций, между которыми есть ненулевой пассажиропоток, составило 376.

На последнем этапе скорость выгрузки данных о пассажиропотоках между парами станций составило в сутки около 5 ч работы бота на ПК. Чтобы ускорить процесс выгрузки, было принято решение применить многопоточный формат работы. Для этого количество выгружаемых станций было распределено между четырьмя ботами, что позволило сократить время выгрузки данных.

РАСЧЕТ ГРАВИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Анализ полученных данных с последующим расчетом гравитационной модели является трудоемким и времязатратным процессом. Поэтому было принято решение систематизиро-

вать данные за счет проектировки реляционной базы данных, которая была приведена к третьей нормальной форме (3NF).

После загрузки полученных данных из АСУ «Экспресс» в базу с помощью средств API сервиса tutu и РЖД cargo была получена и сохранена следующая информация по удельным затратам на перемещение: стоимость проезда (m), расстояние (r) и время движения (t) на поезде между станциями [14, 15]. Ввиду многочисленности вариантов движения между станциями показатели по каждому виду затрат были усреднены для каждой пары станций. Основные характеристики наблюдаемой матрицы корреспонденции приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики наблюдаемой матрицы корреспонденций

Количество станций	376
Общее количество пар станций	141376
Количество пар станций с ненулевым пассажиропотоком	17621
Доля нулевых пассажиропотоков, %	88
Максимальный пассажиропоток между станциями, чел.	24872
Пассажиропоток в среднем между станциями, чел.	313
Стоимость проезда в среднем, руб.	4900,7
Длина поездки в среднем, км	1765,6
Время поездки в среднем, ч	33,11

Для работы с базой данных была создана специализированная подпрограмма Gravitational, которая позволяет использовать хранящиеся данные при расчете гравитационной модели. В подпрограмме реализованы алгоритмы получения данных в удобном для вычислений формате, а также расчеты модели на основе методов Фратара и Хаймана.

Чтобы получить наилучший результат моделирования, в качестве удельных затрат на перемещение в гравитационной модели использовались стоимость проезда, расстояние и время движения на поезде между станциями. Непосредственно перед расчетом гравитационной модели все варианты удельных затрат на перемещения между станциями были проанализированы, чтобы определить их взаимосвязь. В качестве оценивающего параметра использовался коэффициент корреляции (табл. 2).

Таблица 2

Взаимосвязь удельных затрат на перемещение

Показатели затрат	Коэффициент корреляции
$m - r$	0,6375
$m - t$	0,6111
$t - r$	0,9564

Согласно полученным результатам, между временем и расстоянием существует тесная взаимосвязь. Результаты расчетов гравитационной модели с этими показателями должны демонстрировать однотипную картину. Из этого следует, что в расчетах можно использовать одну из таких удельных затрат.

При расчете гравитационной модели применялись два вида функции тяготения:

$$f_1(c_{ij}) = e^{-\gamma c_{ij}};$$

$$f_2(c_{ij}) = e^{-\gamma \ln(c_{ij})} = c_{ij}^{-\gamma}.$$

В качестве обобщенной стоимости проезда (c_{ij}) между двумя пунктами рассматривались стоимость проезда (m_{ij}), время (t_{ij}) и расстояние поездки (r_{ij}).

Для калибровки гравитационной модели (2)–(3) на основе наблюдаемой матрицы были получены векторы S и D , соответствующие суммарному количеству перемещающихся пассажиров в системе. После этого с помощью наблюдаемой матрицы были вычислены обобщенные стоимости поездки. Далее методом Хаймана рассчитаны параметр тяготения γ и модельная матрица корреспонденций $p_{ij}^{мод}$. Процесс калибровки потребовал более 10 итераций при условии, что модельная средняя обобщенная стоимость поездки отличается от наблюдаемой C^* менее чем на 0,1 ед.

В результате моделирования для каждого вида функции тяготения получены модельные матрицы корреспонденций. При анализе сходства между модельными и наблюдаемыми значениями матриц корреспонденций для каждой полученной матрицы рассчитывался коэффициент детерминации R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}, \quad (9)$$

где SS_{res} — сумма квадратов остатков наблюдаемых и модельных значений;

SS_{tot} — общая сумма квадратов отклонения от среднего значения.

Для каждого варианта модели процент объясненной дисперсии, равный коэффициенту детерминации, не превысил 60 % (табл. 3), что говорит о недостаточной точности построенных гравитационных моделей с выбранными функциями тяготения.

Далее решалась задача выделения такой матрицы корреспонденций, которая в результате расчета гравитационной модели покажет наиболее значимые взаимосвязи между наблюдаемой и модельной матрицами. Такие матрицы определялись в двух вариантах:

- 1) удаление из матрицы станций с наибольшим количеством нулевых корреспонденций;
- 2) удаление станций с менее значимыми корреспонденциями.

В каждом из вариантов рассматривалось сильное (на 88 %) и слабое (на 40 %) отсечение малозначимых корреспонденций.

Расчет гравитационной модели не показал хороших результатов при использовании метода удаления станций из матрицы по пустым корреспонденциям. Показатели коэффици-

ентов детерминации остались примерно на тех же значениях, что и исходная матрица корреспонденций, построенная для 376 станций.

Метод удаления станций с менее значимыми корреспонденциями подразумевает отсечение корреспонденций, пассажиропоток которых более некоторого граничного условия. Использование данного метода показало положительную динамику при расчете гравитационной модели (табл. 4).

Полученные коэффициенты детерминации указывают на высокую взаимосвязь наблюдаемых матриц корреспонденций с модельными. Проанализируем варианты расчета матриц корреспонденций размерностью 45×45 станций, для этого рассмотрим погрешности полученных результатов (табл. 5).

Таблица 3

Коэффициенты детерминации расчетов по каждому варианту

Параметр	m	r	t
f_1			
R^2	0,545	0,581	0,577
f_2			
R^2	0,541	0,531	0,526

Таблица 4

Коэффициенты детерминации матриц после отсечения малозначимых корреспонденций

Параметр	Условие отсечения	Размерность матрицы (количество станций)	Коэффициент детерминации для		
			m	r	t
f_1					
R^2	> 1500 чел.	226	0,843	0,878	0,875
	> 9500 чел.	45	0,982	0,998	0,996
f_2					
R^2	> 1500 чел.	226	0,842	0,857	0,875
	> 9500 чел.	45	0,998	0,998	0,998

Таблица 5

Пять наиболее высоких абсолютных погрешностей для модели с 45 станциями

Показатели затрат	$ p_{ij}^{набл} - p_{ij}^{мод} $, чел.				
f_1					
m	8374	8374	5524	5524	3298
r	2617	2231	2231	2081	2054
t	2836	2634	2634	2215	1874
f_2					
m	2372	2262	2213	2213	1813
r	2365	2262	2228	2228	1801
t	2497	2304	2296	2296	1941

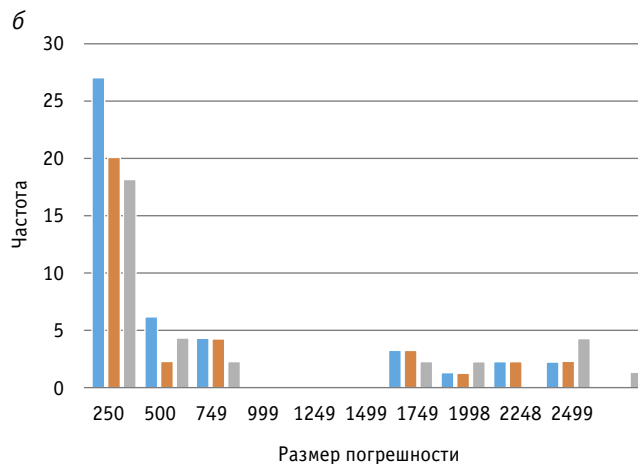
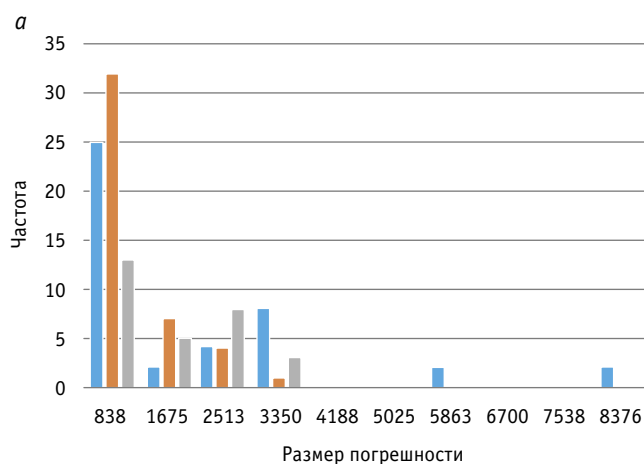


Рис. 1. Частотное распределение погрешности $|p_{ij}^{набл} - p_{ij}^{мод}|$ с вариантами функций тяготения:
 а — гравитационная модель с функцией тяготения $f_1(c_{ij})$; б — гравитационная модель с функцией тяготения $f_2(c_{ij})$;
 ■ — стоимость; ■ — расстояние; ■ — время

Из табл. 5 видно, что абсолютные погрешности модельной и наблюдаемой матриц для такого показателя, как стоимость (m), при использовании функции тяготения f_1 в несколько раз выше, чем по другим показателям. Так как общий пассажиропоток для модели с 45 станциями составляет 1082996 чел., значения погрешности являются допустимыми, но результаты моделирования для отдельных элементов матрицы показывают сильную неоднородность расхождения реальных и модельных значений перемещений. Распределение абсолютных значений разности между элементами наблюдаемой и модельной матриц представлено на рис. 1.

Анализ частотного распределения погрешностей наблюдаемой и модельной матриц показал примерно схожий вид графиков, однако значения частот различаются. Частота возникновения погрешностей по мере роста ее размера убывает по экспоненте, что говорит о близости полученных наблюдаемой и модельной матриц корреспонденций.

Наилучшие значения погрешности показали расчеты с использованием показателя r (расстояние поездки), причем для функций $f_1(r)$ и $f_2(r)$ получаются примерно одинаковые суммы погрешностей: для $f_1(r)$ суммарная погрешность больше на 3,3 тыс. чел. (рис. 2).

Выводы

Выполнен анализ использования гравитационной модели для моделирования объемов железнодорожных пассажирских перевозок между станциями. Проанализированы показательная

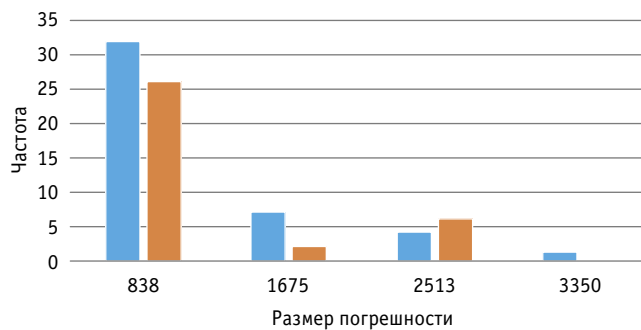


Рис. 2. Частотное распределение погрешности перемещений для гравитационных моделей с функциями $f_1(r)$ и $f_2(r)$:
 ■ — f_1 ; ■ — f_2

и степенная функции тяготения, в качестве аргумента применены усредненные показатели цены проезда между парами станций, а также время и расстояние перемещения. Показано, что при использовании полной матрицы наблюдаемых корреспонденций точность получаемой модели недостаточна. При сокращении размера матрицы корреспонденций за счет отбрасывания станций с малыми пассажиропотоками наиболее значимые взаимосвязи корректно описываются гравитационной моделью с функцией тяготения, зависящей от расстояния поездки. Адекватность такой модели подтверждается сравнением наблюдаемых и модельных значений матриц корреспонденций, а также анализом распределения погрешностей.

Литература

1. Купитман Ю. О. Моделирование движения пригородных поездов на основе матрицы корреспонденций // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 2. С. 29–38. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-29-38. ISSN 2072–9502.

References

1. Kupitman Yu. O. Modelling commuter trains using correspondence matrix [Modelirovanie dvizheniya prigorodnykh poezdov na osnove matritsy korrespondentsiy] // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics. 2021. No. 2. Pp. 29–38. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-29-38. ISSN 2072–9502.
2. Pogrebnyak E. B., Samoylenko N. I. Analysis of methods for creation of correspondence matrix for transport network of a city [Analiz metodov

2. Погребняк Е. Б., Самойленко Н. И. Анализ методов формирования матрицы корреспонденций транспортной сети города // Коммунальное хозяйство городов. 2006. № 69. С. 121–126. ISSN 0869–1231.
3. Селиверстов Я. А., Селиверстов С. А. Методы и модели построения матриц транспортных корреспонденций // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика, телекоммуникации и управление. 2015. № 2(217)–3(222). С. 49–70. DOI: 10.5862/JCSTCS.217–222.5. ISSN 1994–2354.
4. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский [и др.]; под ред. А. В. Гасникова. Москва : МФТИ, 2010. 360 с.
5. Советов Б. Я., Сикерин А. В. Гравитационная и энтропийная модели потоков при территориальном планировании развития транспортной системы // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 8. С. 21–25. ISSN 2071–8985.
6. Ильясов Э. Э., Амиров А. М. Расчет матрицы корреспонденций с использованием параллельных вычислительных технологий // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2014. № 2 (33). С. 41–46. ISSN 2073–6185.
7. Тимофеева Г. А., Ие О. Н. Применение синтетической гравитационной модели с показательно-степенной функцией тяготения для расчета расщепления пассажиропотока по разным видам общественного транспорта // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9. ISSN 1815–9400.
8. Мартыненко А. В., Филиппова Е. Г. Анализ свойств гравитационной модели пассажирских перевозок для линейной сети // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 23–28. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-23-28. ISSN 1815–9400.
9. Мартыненко А. В., Филиппова Е. Г. Моделирование пространственного распределения междугородных автомобильных поездов на основе данных сервисов карпулинга // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 33–38. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-33-38. ISSN 1815–9400.
10. Мартыненко А. В., Шевцов А. А. Оценка матрицы пассажирских корреспонденций с использованием метода наименьших квадратов для калибровки гравитационной модели // Вестник УрГУПС. 2021. № 4 (52). С. 4–13. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-4-4-13. ISSN 2079–0392.
11. Капский Д. В. Пример построения матрицы межрайонных корреспонденций // Вестник Белорусско-Российского университета. 2022. № 1 (74). С. 5–16. ISSN 2077–8481.
12. Классификация пассажиропотоков на базе АСУ «Экспресс» для определения транспортной подвижности между регионами Российской Федерации / Е. А. Макарова, К. В. Суржин, А. Г. Пиунов, А. В. Соколовский // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 3. С. 42–47. ISSN 2223–9731.
13. Что такое боты — определение и описание. URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-are-bots> (дата обращения: 18.05.2022).
14. Справочный центр Travelepayouts. URL: <https://support.travelepayouts.com/hc/ru/articles/360020147791-API-от-Tuturu> (дата обращения: 18.05.2022).
15. Сервис расчета расстояния между станциями. URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9803> (дата обращения: 18.05.2022).
- formirovaniya matritsy korrespondentsiy transportnoy seti goroda // Municipal services of cities. 2006. No. 69. Pp. 121–126. ISSN 0869–1231.
3. Seliverstov Ya. A., Seliverstov S. A. Methods and models of the construction of transport correspondence matrix [Metody i modeli postroeniya matritsy transportnykh korrespondentsiy] // St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems. 2015. No. 2(217)–3(222). Pp. 49–70. DOI: 10.5862/JCSTCS.217–222.5. ISSN 1994–2354.
4. Introduction to modeling of traffic flows on the basis of equilibrium theory [Vvedenie v modelirovanie transportnykh potokov na osnove teorii ravnovesiya] / A. V. Gasnikov, S. L. Klenov, E. A. Nurminskiy [et al.]; ed. by A. V. Gasnikov. Moscow : Moscow Institute of Physics and Technology, 2010. 360 p.
5. Sovetov B. Ya., Sikerin A. V. Gravitational and entropy models of traffic flows forecasting in terms of transportation planning [Gravitatsionnaya i entropiyaya modeli potokov pri territorial'nom planirovani razvitiya transportnoy sistemy] // Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University. 2016. No. 8. Pp. 21–25. ISSN 2071–8985.
6. Ilyasov E. E., Amirov A. M. Calculation of matrix correspondence with the use of parallel computing technologies [Raschet matritsy korrespondentsiy s ispol'zovaniem parallelnykh vychislitel'nykh tekhnologiy] // Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2014. No. 2 (33). Pp. 41–46. ISSN 2073–6185.
7. Timofeeva G. A., Ie O. N. Application of synthetic gravity model with exponential-power gravity function for calculation of passenger traffic splitting by different modes of public transport [Primenenie sinteticheskoy gravitatsionnoy modeli s pokazatel'no-stepennoy funktsiyey tyagoteniya dlya rascheta rasshhepleniya passazhipotoka po raznym vidam obshchestvennogo transporta] // Transport of the Urals. 2020. No. 4 (67). Pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9. ISSN 1815–9400.
8. Martynenko A. V., Filippova E. G. Analysis of properties of passenger traffic gravity model for linear network [Analiz svoystv gravitatsionnoy modeli passazhirsikh perevozok dlya lineynoy seti] // Transport of the Urals. 2020. No. 4 (67). Pp. 23–28. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-23-28. ISSN 1815–9400.
9. Martynenko A. V., Filippova E. G. Modeling of spatial distribution of intercity automobile trips on the basis of carpooling services data [Modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya mezhdugorodnykh avtomobil'nykh poezdok na osnove dannykh servisov karpulinga] // Transport of the Urals. 2021. No. 3 (70). Pp. 33–38. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-33-38. ISSN 1815–9400.
10. Martynenko A. V., Shevtsov A. A. Estimation of the passenger correspondence matrix using the least squares method to calibrate the gravity model [Otsenka matritsy passazhirsikh korrespondentsiy s ispol'zovaniem metoda naimen'shiikh kvadratov dlya kalibrovki gravitatsionnoy modeli] // Herald of USURT. 2021. No. 4 (52). Pp. 4–13. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-4-4-13. ISSN 2079–0392.
11. Kapsky D. V. Example of constructing a matrix of inter-district correspondence [Primer postroeniya matritsy mezhrayonnykh korrespondentsiy] // Bulletin of Belarusian-Russian University. 2022. No. 1 (74). Pp. 5–16. ISSN 2077–8481.
12. MIS Express Based Passenger Flows Classification Aimed at Determination of Interregional Travel Behaviour in the Russian Federation [Klassifikatsiya passazhipotokov na baze ASU «Ekspress» dlya opredeleniya transportnoy podvizhnosti mezhdurayonami Rossiyskoy Federatsii] / E. A. Makarova, K. V. Surzhin, A. G. Piunov, A. V. Sokolovskiy // VNIIZhT Scientific Journal. 2015. No. 3. Pp. 42–47. ISSN 2223–9731.
13. What are bots — notion and description [Chto takoe boty — opredelenie i opisaniye]. URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-are-bots> (access date: 18.05.2022).
14. Travelepayouts reference centre [Spravochniy tsentr Travelepayouts]. URL: <https://support.travelepayouts.com/hc/ru/articles/360020147791-API-ot-Tuturu> (access date: 18.05.2022).
15. Service for calculation of distance between stations [Servis rascheta rasshtoyaniya mezhdurayonami]. URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9803> (access date: 18.05.2022).

УДК 656.086.2:378.147

Игорь Львович Васильев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

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

ОБ ИЗУЧЕНИИ ИСТОРИИ АКТОВ НЕЗАКОННОГО ВМЕШАТЕЛЬСТВА ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ В СФЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Igor Lvovich Vasilyev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Kirill Maximovich Timukhin, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

On study of history of unlawful interference acts at training of specialists in sphere of train management

Аннотация

К современному специалисту в сфере управления процессами перевозок предъявляются особые требования, связанные и с освоением большого количества профессиональных компетенций, и с повышенным уровнем подготовки в области транспортной безопасности, так как железнодорожные станции и узлы — это стратегические объекты страны. Дистанционные технологии предполагают не только обучение с применением строгого контроля, но и формы образования, направленные в первую очередь на сознательное изучение материала (вовлечение, а не принуждение). Таким образом, возрастает роль факультативных занятий как дополнительного инструмента для расширения кругозора студентов высшей школы.

Акты незаконного вмешательства на транспорте часто несут угрозу большому количеству людей и потенциально наносят значительный материальный ущерб. Для профилактики и предотвращения таких инцидентов ведется подготовка профильных специалистов. Вместе с тем будущие участники транспортного процесса должны проявлять бдительность и быть осведомлены о возможных правонарушениях в сфере транспортной безопасности. Изучение исторического опыта позволяет проследить всю цепочку — от зарождения умысла до попыток сокрытия преступного деяния — и напрямую взаимодействует с такими дисциплинами, как «Транспортное право» и «Транспортная безопасность», позволяя формировать комплекс компетенций на основе полученных практических и теоретических знаний.

В статье рассмотрены исторические примеры незаконного вмешательства в деятельность транспорта, предназначенные для студентов высших учебных заведений с учетом использования дистанционных технологий. Обоснована важность и практическая применимость обучения в формате дополнительного образования, а также приведены примеры материалов для дополнительного изучения во внеучебное время.

Ключевые слова: образование, дистанционные технологии обучения, дополнительное образование, транспортная безопасность, акты незаконного вмешательства.

Abstract

Special requirements are imposed on a modern specialist in the sphere of train management. These requirements are connected with learning of a big number of professional competencies and with a higher level of training in the sphere of transport safety because railway stations and nodes are strategic objects of a country. Distance technologies suppose not only learning with the use of «strict control», but also educational forms targeted mostly on conscious study — «involvement, not coercion». Consequently, a role of facultative lessons as an additional tool to widen the outlook of students of higher school increases.

Acts of unlawful interference on transport are often dangerous for a big number of people and potentially lead to a significant material damage. In order to prevent such acts universities train profile specialists. However, future participants of the transportation process must be vigilant and must be aware of possible offence in the sphere of transport safety. Study of historical experience allows tracing the whole chain — from an origin of intent to attempts of concealment of criminal acts — and directly interacts with such disciplines as «Transport Law» and «Transport Safety», which allows forming knowledge on the basis of gained practical and theoretical information.

The paper considers historical examples of unlawful interference into transport operation intended to students of higher educational establishments with the consideration for the use of distance technologies. As a result, the authors have substantiated the importance and practical applicability of learning in the form of additional education. They have also provided examples of materials for additional studying during extracurricular time.

Keywords: education, distance learning technologies, additional education, transport safety, unlawful interference acts.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-34-39

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в условиях цифровизации и динамично изменяющихся требований к подготовке специалистов транспортной отрасли возрастает необходимость использования дистанционных технологий [1–3]. Это обусловлено не только уровнем технической грамотности обучающихся, но и динамикой изменения конъюнктуры рынка. В целом дистанционное обучение в высшей школе позволяет увеличить объем предоставляемой информации за счет снижения временных издержек в пути следования до места обучения. Таким образом повышается роль и важность факультативных занятий в облегченной форме, когда, например, студенты транспортных вузов получают полезную для их общего развития информацию в сфере транспортно-законодательства.

В частности, изучение исторических примеров актов незаконного вмешательства в деятельность транспорта позволяет не только выявить причины и следствия, но и спрогнозировать в вероятностном выражении грядущие угрозы транспортной системе [4].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об актуальности совершенствования подходов к подготовке специалистов высшей школы в сфере транспортного законодательства, а использование удаленных интерактивных режимов дает возможность увеличить объем предоставляемой информации, внося в программы подготовки исторический опыт в данной сфере.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для подготовки учебных программ с использованием исторических аспектов следует привести примеры актов незаконного вмешательства на транспорте [5]. Применительно к городскому транспорту выделим несколько эпизодов.

История 1. Взрыв автобуса в Краснодаре — террористический акт, совершенный душевнобольным Петром Волынским 14 июня 1971 г.

Петр Волынский — сирота, уроженец Краснодара. Еще в годы учебы в Кубанском медицинском институте однокурсники замечали за ним странности — он носил с собой чемодан, в котором периодически звонил будильник. Однако тогда поведение Волынского опасений не вызвало, и сообщений в органы охраны правопорядка не было.

На отклонения в поведении Волынского — тот вывешивал алюминиевые тарелки на веревке в окно — обратил внимание служащий КГБ, снимавший у него комнату. Об этих отклонениях квартирант сообщил в учебное заведение Волынского. С Волынским провели беседу, а впоследствии заведующий кафедрой психиатрии Н. А. Хромов поставил диагноз «шизофрения», и этот диагноз перечеркнул медицинскую карьеру Волынского.

Петр Волынский затаил обиду на тех, кто помешал ему стать врачом. В январе 1971 г. он предпринял попытку заминировать квартиру Н. А. Хромова: подвесил самодельное взрывное устройство, состоявшее из корпуса огнетушителя, снаряженного бездымным порохом и шариками от подшипника. Соседка Хромова выявила противоправные действия и вызвала

сотрудников милиции, которые определили данные противоправные действия как хулиганство — найти злоумышленника в тот момент оказалось невозможным.

Вторая попытка противоправных действий со стороны Волынского была предпринята в кинотеатре «Аврора», где проходило собрание городских чиновников, однако бдительный администратор не пропустила Волынского внутрь, так как у него не было пригласительного билета.

14 июня 1971 г. в автобусе, следовавшем по маршруту № 1, возле бензобака Волынский оставил самодельное взрывное устройство, набитое металлическими шариками, гвоздями и подшипниками. В 8.30 произошел взрыв — 10 человек погибли, многие пассажиры получили ранения (рис. 1). В ходе следственных действий были проанализированы схожие преступления, в том числе покушение на Н. А. Хромова, квалифицированное в свое время как хулиганство. Хромов сообщил о своих подозрениях в отношении Волынского.



Рис. 1. Последствия взрыва, произошедшего 14 июня 1971 г. в Краснодаре

В квартире, где проживал Волынский, при обысках были изъяты порожние емкости от огнетушителя, коробка, взрывчатое вещество, стальные шарики, нихромовая проволока, техническая документация к взрывным устройствам, а также портрет Наполеона I. Впоследствии Волынский был задержан, а на допросах утверждал, что мотивом к убийству пассажиров автобуса послужило принижение низкорослых людей со стороны высокорослых. Судебно-психиатрической экспертизой Волынский был признан невменяемым [6]. Как можно заметить, склонность к противоправному, а позднее и преступному поведению проявлялась у Волынского со студенческих лет, а также в первые годы работы. Осведомленность студентов и коллег о возможных последствиях такого поведения могла спасти человеческие жизни.

История 2. Захват автобуса в Новокузнецке, произошедший 14 мая 1979 г. Жертвами стали два человека, один из которых — захватчик.

Михаил Шаманаев вместе с Владимиром Бизуновым 4 мая 1979 г. осуществили захват автобуса, следовавшего в Кемерово. В ходе возмущений со стороны пассажиров пострадал один из них — освободившийся из колонии Николай Костин. Остальные 43 пассажира были взяты в заложники.

Старшина Василий Шрамко, 21-летний участковый из Прокопьевска, выступил посредником в переговорах и добился освобождения ребенка, находившегося в салоне автобуса. Захватчики потребовали, чтобы им предоставили вертолет.

Участковый Василий Шрамко заменил водителя автобуса и подвел автотранспортное средство на расстояние 12 м от вертолета. Так как захватчиками Шаманаевым и Бизгуновым заложники не были освобождены до отлета и при этом Бизгунов держал портфель с проводами, для предотвращения человеческих жертв сотрудники силовых ведомств были вынуждены открыть огонь. Шаманаев погиб на месте, Бизунов сбежал, заложники были освобождены, жертв среди мирного населения удалось избежать.

Следствием было установлено, что Шаманаев и Бизунов дружили с детства и до восьмого класса учились в одной школе. Оба вели замкнутый образ жизни. Шаманаев поступил в техникум, но оттуда его отчислили из-за «слабых знаний». Родители Шаманаева развелись в 1975 г., он жил с отцом и мачехой. Бизунов же после школы учился в техническом училище, его знания оценивались как удовлетворительные. Проживал он с матерью и со старшим братом.

Шаманаев и Бизунов восхищались американским образом жизни и мечтали попасть в США. В ходе следствия было установлено, что о планах Шаманаева и Бизунова знал их друг — студент металлургического института, но никаких обвинений студенту предъявлено не было. Подготовку к захвату автобуса Шаманаев и Бизунов вели дома и на пустыре за школой [7].

Отметим, что, так же, как и в случае с Волынским, молодые люди вели замкнутый образ жизни, а если бы их коллега-студент проявил бдительность, то преступное деяние можно было пресечь на этапе подготовки.

История 3. Расстрел на Привокзальной площади Курска. Противоправные действия организовали и совершили два солдата из воинской части внутренних войск, расквартированной в Курске, — рядовой Виктор Коршунов и ефрейтор Юрий Суровцев [8].

Юрий Суровцев, по словам знакомых, обладал повышенной возбудимостью, был впечатлительным, склонным к истерике, фантазированию, находился на лечении в психиатрической больнице с признаками психического инфантилизма. Виктор Коршунов до армии вел аморальный образ жизни, со слов коллег, был жестоким и скрытным, проявлял нетерпимость, публично высказывался о самоубийстве.

25 сентября 1968 г. солдаты совершили побег из военной части, прихватив оружие. Дезертиры направились в сторону железнодорожного вокзала, зашли в подъезд дома, окна которого выходили на Привокзальную площадь, и позвонили в одну из квартир. На тот момент в квартире находилось восемь человек, в том числе двое несовершеннолетних. Дезертирам открыла дверь женщина, они ворвались в квартиру и сразу убили пять человек. Затем, взяв в заложники несовершеннолетних, отправили женщину за алкоголем. В подъезде женщина встретила участкового, но о факте захвата заложников не сообщила. Еще до ее возвращения террористы убили несовершеннолетних. Впоследствии, увидев на Привокзальной площади большое количество народа, дезертиры открыли огонь — пострадало пять человек.

Первыми милицию вызвали жильцы квартиры, соседней с захваченной террористами. В ходе переговоров у Суровцева началась истерика, в результате которой он застрелил Коршунова и сдался. Жертвами этого преступления стали 13 погибших и 11 раненых.

Как и в предыдущих инцидентах, поведение Суровцева и Коршунова позволяло сделать вывод об их склонности к противоправным действиям, а вовремя проявленная со стороны окружающих бдительность могла бы помочь сотрудникам органов правопорядка предотвратить трагедию.

Хронология актов незаконного вмешательства на транспорте представлена на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании анализа представленных материалов можно сделать вывод, что лица, совершившие акты незаконного вмешательства на транспорте, находились в стрессовой ситуации под влиянием, по их мнению, негативной обстановки извне, некоторые из них находились на психиатрическом учете либо отбывали наказание [9–11].

Справедливым будет утверждение, что негативное влияние стрессовых ситуаций не коррелирует с потенциальной вероятностью совершения правонарушений в сфере транспортной безопасности. Вместе с тем нельзя отрицать, что лица с доминирующим преступным поведением, а также состоящие на учете в специализированных медицинских учреждениях, находясь под давлением обстоятельств, на которые они не могут воздействовать, потенциально способны совершать противоправные действия, в том числе на транспорте.

Современные подходы к образованию будущих специалистов транспортной сферы позволяют на доступном уровне познакомить студентов с историческими событиями, которые сопровождали тот или иной акт незаконного вмешательства. Дорожная карта дополнительного интерактивного курса «История транспортной безопасности» представлена на рис. 3.

Сегодня подготовка специалистов в сфере транспорта включает в себя не только изучение дисциплин, входящих в учебную программу, но и дополнительное образование. Поэтому исторические аспекты незаконного вмешательства в деятельность транспорта должны стать частью дополнительного образования, расширяя кругозор студентов в области транспортных правоотношений и повышая интерес к вопросам, связанным с транспортной безопасностью. Вместе с тем изучение этих исторических аспектов напрямую взаимодействует с такими дисциплинами, как «Транспортное право» и «Транспортная безопасность», позволяя сформировать комплекс знаний на основе исторических, практических и теоретических знаний.

ОБСУЖДЕНИЕ

Предотвращение чрезвычайных ситуаций на транспорте, вызванных актами незаконного вмешательства, является прерогативой специализированных государственных служб. В России техническое оснащение этих служб и уровень подготовки специалистов соответствует всем современным требованиям безопасности. При этом каждый участник транспортных правоотношений должен проявлять гражданскую ответственность



Рис. 2. Акты незаконного вмешательства на транспорте в 1968–1991 гг.

и бдительность, чтобы предотвращать любые попытки противоправного вмешательства в деятельность транспорта. Для формирования базовых компетенций по выявлению попыток незаконного воздействия на транспортный процесс необходимо применение различных методов и подходов к обучению.

В современных реалиях активно внедряется и совершенствуется такой инструмент подготовки специалистов высшей школы, как удаленный интерактивный режим [12, 13]. Подготовка современного специалиста в сфере транспорта включает в себя не только изучение обязательных дисциплин, важную роль играет и самообразование [14]. Проведенные опросы студентов показывают заинтересованность обучающихся в дополнительном образовании. При этом факультативные занятия не могут строиться по формам лекционных и практических занятий, поскольку внедряются в совершенно другой процесс усвоения и запоминания материала. Если непосредственно учебный процесс — это четко структурированные, формально определенные положения, для восприятия которых студенту надлежит полностью сфокусироваться на теме занятия, то дополнительное образование, самообразование — это процесс, включающий в себя и обучение, и отдых от основной деятельности. Занятия в формате факультативов должны проводиться в легкодоступной интерактивной форме, без обязательного контроля, с использованием инструмента «вовлечение, а не принуждение», что позволяет воспринимать информацию не как урок, а как интересное познание.

Выводы

Изучение исторического опыта, а также детальный разбор трагических ситуаций, вызванных незаконным вмешательством в деятельность транспорта, дает возможность не только показать важность соблюдения положений транспортной безопасности, но и создать логические цепочки

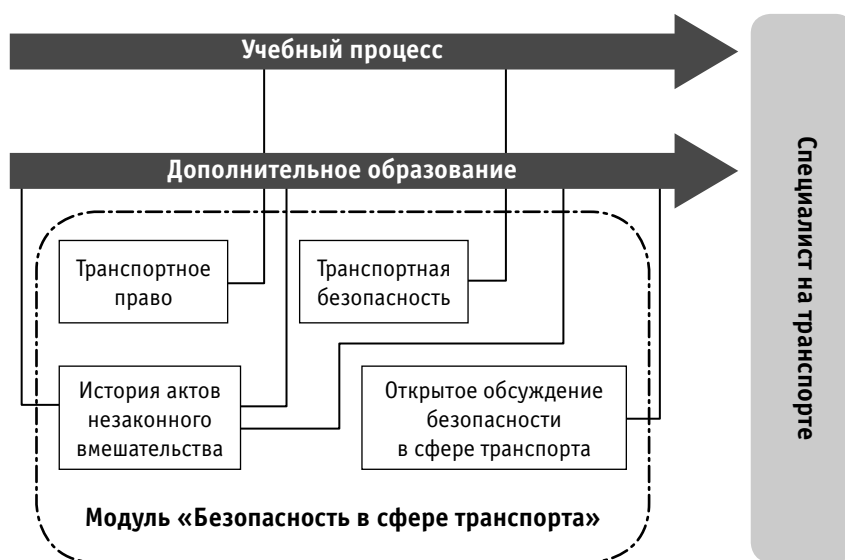


Рис. 3. Дополнительный интерактивный курс «История транспортной безопасности»

по выявлению потенциальных угроз. Несмотря на то что деятельность по обеспечению транспортной безопасности возлагается на соответствующие органы правопорядка, это не освобождает граждан от обязанности быть бдительными и обращаться в органы правопорядка при возникновении угроз транспортной безопасности вне зависимости от статуса гражданина (пассажир, перевозчик). Специфика транспортных правоотношений заключается в том, что возникновение чрезвычайных ситуаций ставит под угрозу жизни множества людей и наносит значительный материальный ущерб, связанный не только с разрушением инфраструктуры, но и с нарушением процесса доставки генеральных грузов. Ситуация с введением ограничений, вызванных коронавирусной инфекцией, и последующими негативными эффектами как для экономики, так и для отдельно взятых граждан является стресс-фактором. Повышение бдительности граждан — актуальная задача не только для государственных органов, но и для учебных заведений (наравне с противодействием телефонным мошенникам и иным формам преступной деятельности).

Вместе с тем современные технологии позволяют реализовать потребности студентов вузов в дополнительном образовании. Подготовка учебных материалов в легкодоступной научно-популярной форме создает контент, направленный на просвещение молодых специалистов без чрезмерной на них нагрузки. Изучение исторических аспектов дает возможность показать важность соблюдения транспортной безопасности, а также раскрывает причинно-следственную связь противоправного поведения. Именно поэтому включение в учебный процесс транспортных вузов интерактивного курса «История транспортной безопасности» является необходимым при освоении профессиональных компетенций.

Факультативные занятия по профилактике актов противоправного вмешательства станут эффективным дополнительным инструментом подготовки специалистов для транспорта, позволяющим не только расширить компетенции обучающихся в профильных вузах, но и повысить уровень гражданской ответственности в обществе.

Литература

1. Research trends in the use of augmented reality in science education: Content and bibliometric mapping analysis / F. Arici, P. Yildirim, Ş. Caliklar, R. M. Yilmaz // Computers & Education. 2019. Vol. 142. 103647. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103647>.
2. Building an online educational platform to promote creative and affective thinking in special education / Ch. Tu, Ye. Nurymov, Z. Umirzakova, A. Berestova // Thinking Skills and Creativity. 2021. Vol. 40. 100841. ISSN 1871–1871, <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2021.100841>.
3. Evaluating E-learning systems success: An empirical study / D. Al-Fraihat, M. Joy, R. Masa'deh, J. Sinclair // Computers in Human Behavior. 2020. Vol. 102. Pp. 67–86. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.08.004>.
4. Le Coze J. Ch. Safety as strategy: Mistakes, failures and fiascos in high-risk systems // Safety Science. 2019. Vol. 116. Pp. 259–274. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.023>.
5. Global Terrorism Database. URL: <https://www.start.umd.edu/gtd/> (дата обращения: 15.08.2021).
6. Чайка В. Одного из первых террористов СССР до сих пор содержат в кубанской спецклинике. URL: <https://www.kuban.kp.ru/daily/26347/3229771/> (дата обращения: 05.09.2021).
7. Служение Отечеству. 1917–2005 гг.: В 2-х кн. Кн. 2. 1945–2005 гг. Кемерово : Летопись, 2005. 889 с.
8. Теракт на Привокзальной площади Курска: как это было. URL: <http://www.dddkursk.ru/number/619/new/003665/print/> (дата обращения: 23.09.2021).
9. The Aviation Safety Network. Site materials: <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=19770710-0> (дата обращения: 13.12.2020).
10. Вор и бродяга захватили самолет в Петрозаводске. URL: <https://dni.ru/society/2017/7/30/375856.html> (дата обращения: 20.04.2021).
11. Kapat sovjetiskt plan i Finland. URL: <https://svenska.yle.fi/a/7-884229> (дата обращения: 10.02.2021).
12. Mozahem N. A. The online marketplace for business education: An exploratory study // The International Journal of Management Education. 2021. Vol. 19. Issue 3. 100544. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2021.100544>.
13. Guri-Rosenblit S. E-Teaching in Higher Education: an Essential Prerequisite for E-Learning // Journal of New Approaches in Educational Research. 2018. Vol. 7. No. 2. Pp. 93–97. <https://doi.org/10.7821/naer.2018.7.298>.
14. Тушин Н. А., Тимухин К. М. Проблемы подготовки специалистов транспортной логистики // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 20–24. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-20-24. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,76 авторских листа

References

1. Research trends in the use of augmented reality in science education: Content and bibliometric mapping analysis / F. Arici, P. Yildirim, Ş. Caliklar, R. M. Yilmaz // Computers & Education. 2019. Vol. 142. 103647. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103647>.
2. Building an online educational platform to promote creative and affective thinking in special education / Ch. Tu, Ye. Nurymov, Z. Umirzakova, A. Berestova // Thinking Skills and Creativity. 2021. Vol. 40. 100841. ISSN 1871–1871, <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2021.100841>.
3. Evaluating E-learning systems success: An empirical study / D. Al-Fraihat, M. Joy, R. Masa'deh, J. Sinclair // Computers in Human Behavior. 2020. Vol. 102. Pp. 67–86. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.08.004>.
4. Le Coze J. Ch. Safety as strategy: Mistakes, failures and fiascos in high-risk systems // Safety Science. 2019. Vol. 116. Pp. 259–274. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.023>.
5. Global Terrorism Database. URL: <https://www.start.umd.edu/gtd/> (access date: 15.08.2021).
6. Чайка V. One of the first terrorists of the USSR is still kept in the Kuban special clinic [Odnogo iz pervykh terroristov SSSR do sikh por soderzhat v kubanskoj spetsklinike]. URL: <https://www.kuban.kp.ru/daily/26347/3229771/> (access date: 05.09.2021).
7. Serving the Fatherland. 1917–2005 [Sluzhenie Otechestvu. 1917–2005 gg.]: In 2 books. Book 2. 1945–2005. Kemerovo : Letopis, 2005. 889 p.
8. Terrorist attack on the railway station square of Kursk: how it happened [Terakt na Privokzal'noy ploshhadi Kurska: kak eto bylo]. URL: <http://www.dddkursk.ru/number/619/new/003665/print/> (access date: 23.09.2021).
9. The Aviation Safety Network. URL: <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=19770710-0> (access date: 13.12.2020).
10. A thief and a tramp hijacked a plane in Petrozavodsk [Vor i brodyaga zakhvatili samolet v Petrozavodske]. URL: <https://dni.ru/society/2017/7/30/375856.html> (access date: 20.04.2021).
11. Kapat sovjetiskt plan i Finland. URL: <https://svenska.yle.fi/a/7-884229> (access date: 10.02.2021).
12. Mozahem N. A. The online marketplace for business education: An exploratory study // The International Journal of Management Education. 2021. Vol. 19. Issue 3. 100544. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2021.100544>.
13. Guri-Rosenblit S. E-Teaching in Higher Education: an Essential Prerequisite for E-Learning // Journal of New Approaches in Educational Research. 2018. Vol. 7. No. 2. Pp. 93–97. <https://doi.org/10.7821/naer.2018.7.298>.
14. Tushin N. A., Timukhin K. M. Problems of transport logistics specialists training [Problemy podgotovki spetsialistov transportnoy logistiki] // Transport of the Urals. 2018. No. 3 (58). Pp. 20–24. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-20-24. ISSN 1815–9400.

УДК 629.4.027.4: 656.2

Андрей Сергеевич Космодамианский, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (МИИТ), РОАТ РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Владимир Иванович Воробьев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,

Олег Васильевич Измеров, соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,

Дмитрий Николаевич Шевченко, ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (МИИТ), РОАТ РУТ (МИИТ), Москва, Россия

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОЛЕСНО-МОТОРНЫХ БЛОКОВ ТЕПЛОВЗОВ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Andrey Sergeevich Kosmodamianskiy, DSc in Engineering, Professor, Head of Traction Rolling Stock Department, Russian Open Academy of Transport, Russian University of Transport (MIIT), ROAT RUT (MIIT), Moscow, Russia,

Vladimir Ivanovich Vorobyev, PhD in Engineering, Associate Professor, Rolling Stock of Railways Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,

Oleg Vasilyevich Izmerov, PhD student, Rolling Stock of Railways Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,

Dmitriy Nikolaevich Shevchenko, Assistant Lecturer, Traction Rolling Stock Department, Russian Open Academy of Transport, Russian University of Transport (MIIT), ROAT RUT (MIIT), Moscow, Russia

Modernization of wheels and motors units for diesel locomotives in conditions of import substitution

Аннотация

Рассмотрены проблемы импортозамещения комплектующих для колесно-моторных блоков грузовых и маневровых тепловозов с диаметром колес 1050 и 1250 мм, а также задача модернизации технически устаревших узлов. В результате проведенного анализа выявлена необходимость: 1) разработки нового узла моторно-осевых подшипников с использованием отечественных комплектующих; 2) создания новой конструкции подвески тягового электродвигателя (ТЭД) для замены пружинной подвески, имеющей изнашиваемые детали; 3) поиска решений для перспективных тепловозов, которые предназначены эксплуатироваться на Восточном полигоне. Для тепловозов с диаметром колес 1050 мм предложены конструкции опорно-рамного тягового привода, оснащенные плоскими резинометаллическими элементами, и тягового привода с жестким опиранием ТЭД на колесные центры за счет использования отечественных подшипников. Вместо пружинной рекомендуется использовать подвески с плоскими резиновыми элементами и сферическими резинометаллическими шарнирами, что обеспечит взаимозаменяемость тележек с доработанными и недоработанными ТЭД. Для перспективных тепловозов с диаметром колес 1250 мм предложены конструкции двухосных тележек, оснащенных высокомоментными коллекторными электродвигателями и тяговым приводом с опорно-рамной подвеской электродвигателя и осевым редуктором.

Ключевые слова: тяговый привод локомотива, надежность, конструирование, импортозамещение.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-40-48

Abstract

The paper considers problems of import substitution of parts for wheels and motors units for freight and shunting diesel locomotives with 1050 and 1250 mm wheels and it also considers a task of modernization of technically outdated assemblies. In result of the analysis the authors revealed that it is necessary to: 1) develop a new assembly of motor support bearings with the use of domestic parts; 2) create a new design of an electric traction motor suspension for the substitution of a spring suspension that has wearable parts; 3) organize a search for solutions for perspective diesel locomotives that are intended to operate on the Eastern polygon. For diesel locomotives with 1050 mm wheels the authors propose designs of a frame support traction drive equipped with flat rubber-metal elements and a traction drive with rigid support of an electric traction motor on wheel centres by the use of domestic bearings. Instead of the spring suspension the authors recommend to use suspensions with flat rubber elements and spherical rubber-metal mounting, which will provide interoperability of bogies with modified and unmodified electric traction motors. For perspective diesel locomotives with 1250 mm wheels the authors propose designs of two-axle bogies equipped with high-torque commutator motors and a traction drive with a frame support suspension of a traction motor and an axial gearbox.

Keywords: locomotive traction drive, reliability, designing, import substitution.

ВВЕДЕНИЕ

В период 2000–2020 гг. в отечественном железнодорожном машиностроении широко применялась практика заимствования зарубежных технических решений — как в форме сотрудничества с иностранными фирмами, так и путем копирования конструкций зарубежных производителей. Это увеличило использование импортных комплектующих, в частности колесно-моторных блоков (КМБ) локомотивов — одного из наиболее сложных в проектировании и производстве узлов. Сегодня на серийно производимых российских электровозах используются КМБ, разработанные фирмами Siemens и Alstom, а на грузовых тепловозах применяется конструкция КМБ, сходная с конструкцией фирм США и требующая импортных моторно-осевых подшипников (МОП).

Как выясняется, в условиях импортозамещения простое повторение зарубежных аналогов затруднительно, поскольку они, как правило, конструктивно сложны, требуют высокой точности обработки и ориентированы на специальную технологическую базу, принадлежащую мировым фирмам-лидерам. Фактически для иностранных компаний такой подход к конструированию защищает продукцию от копирования. С другой стороны, в течение 1970–1980-х гг. в нашей стране шел поиск конструктивных решений, изначально адаптированных к ограничениям по материалам и комплектующим изделиям продукции гражданского назначения, существовавшим в СССР. При этом проблема заключается в том, что в настоящее время нет методик по выбору рациональных решений тяговых приводов применительно к условиям импортозамещения либо по поиску новых конструктивных решений для данных условий, хотя изменения в конструкции создают благоприятные возможности для замены устаревших узлов колесно-моторного блока.

Наконец, необходимость импортозамещения заставляет пересмотреть критерии к выбору конструкции тягового привода перспективных тепловозов, предназначенных для работы на Восточном полигоне, поскольку в новых экономических условиях требуются не только перспективные, но и быстро реализуемые в производственных условиях решения.

Предлагаемая статья является попыткой разрешить эту проблему применительно к тяговым приводам магистральным тепловозов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

На большинстве отечественных тепловозов с 1940-х гг. применяются КМБ с колесами диаметром 1050 мм. Это обусловлено следующими объективными факторами:

мощность тяговых электродвигателей (ТЭД) у тепловозов меньше, чем у электровозов, из-за ограничений по мощности автономной силовой установки;

при диаметре колеса 1050 мм меньше длина и масса распространенной на тепловозах трехосной тележки, что вызвано необходимостью размещать топливный бак между тележками; меньше изгибающие моменты в главной раме при продольных усилиях.

В 1970-е гг. в нашей стране была обоснована целесообразность использования колес диаметром 1220–1250 мм для пер-

спективных тепловозов, что создавало возможности размещать более мощные ТЭД и повышать осевые нагрузки. В настоящее время серийно изготавливаются пассажирские тепловозы ТЭП70 и их модификации. Ранее небольшой серией были выпущены грузовые тепловозы с диаметром колес 1250 мм, имеющие трех- и четырехосные тележки, которые подтвердили возможность повышения тяговых свойств за счет увеличения осевых нагрузок.

Рассмотрим конструкцию современного КМБ с колесами диаметром 1050 мм для грузовых и маневровых тепловозов на примере КМБ тепловоза 2ТЭ25А с асинхронным приводом (рис. 1).

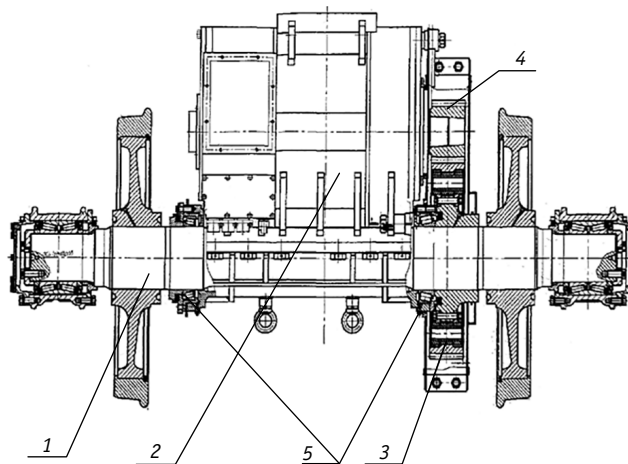


Рис. 1. КМБ тепловоза 2ТЭ25А:

- 1 — колесная пара; 2 — ТЭД;
3 — упругое самоустанавливающееся зубчатое колесо (УСЗК);
4 — ведущая шестерня; 5 — осевые подшипники

Основное отличие этого КМБ от ранее выпущенных — моторно-осевые подшипники (МОП) качения (рис. 2) в виде радиально-упорных однорядных конических роликоподшипников 4 и 5 производства фирмы Timken (США), установленных в растяжку в корпусе 3 в виде неподвижной трубы, прикрепленной к корпусу ТЭД. Подшипники фиксируются между ступицей зубчатого колеса 2 и лабиринтным кольцом 6 при осевом зазоре 0,05–0,15 мм. Осевой зазор после посадки подшипников и лабиринтного кольца обеспечивается за счет выемки состоящего из двух половин кольца 7, последующей его шлифовки на величину зазора, установкой на стакан 8 роликоподшипника 5 и закреплением подшипниковых узлов.

Замена подшипников требует распрессовки колесных пар. Подобная конструкция, применяемая на тепловозах Североамериканских железных дорог, отличается надежностью и длительным периодом работы без обслуживания. Недостатки конструкции — усложнение монтажа подшипникового узла из-за необходимости регулировать зазоры в конических подшипниках. На разработанном Брянским механическим заводом маневровом тепловозе ТЭМ23 с асинхронным ТЭД тоже применены МОП качения. В КМБ тепловоза 2ТЭ25А используется подвеска, представляющая собой тягу с двумя резинометаллическими шарнирами (РМШ) отечественного производства.

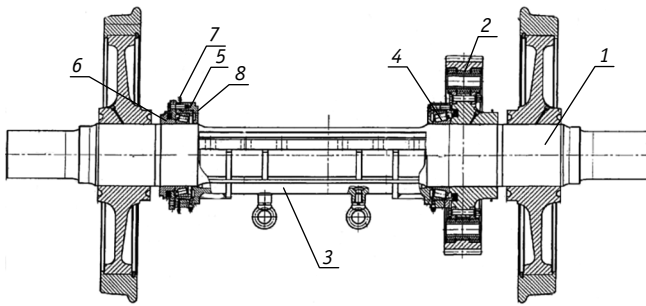


Рис. 2. Расположение МОП на тепловозе 2ТЭ25А:

- 1 — колесная пара; 2 — УСЗК; 3 — корпус подшипников;
 4 — МОП со стороны УСЗК; 5 — МОП со стороны колесного центра;
 6 — лабиринтное кольцо; 7 — регулировочное кольцо;
 8 — стакан подшипника

С 2017 г. МОП качения внедряются также на серийно выпускаемых грузовых магистральных тепловозах с коллекторными ТЭД (2ТЭ25КМ и др.) и на маневровых тепловозах ТЭМ18ДМ.

Тепловозы с коллекторными ТЭД оборудованы модернизированной бесчелюстной трехосной тележкой, в которой сложно применять подвеску типа «серьга». Именно поэтому на таких тепловозах до сих пор используется пружинная подвеска (рис. 3), один из недостатков которой — изнашиваемые плоские поверхности, не закрываемые кожухами от загрязнений.

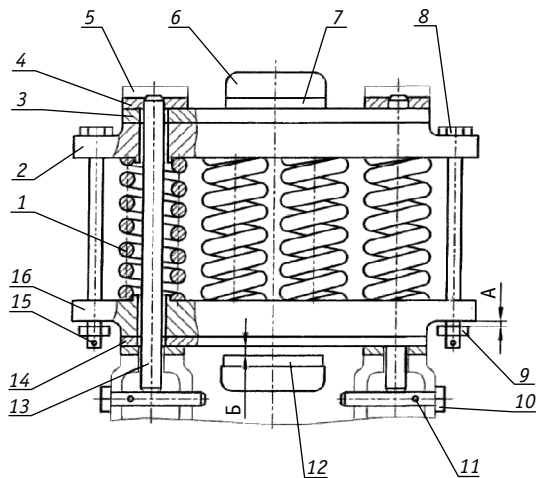


Рис. 3. Пружинная подвеска

тягового электродвигателя тепловоза 2ТЭ25КМ:

- 1 — пружина; 2, 16 — обоймы; 3, 4, 7, 12, 14 — накладки;
 5 — кронштейн подвески на раме тележки; 6 — носик верхний тягового электродвигателя; 8 — болт; 9 — гайка; 10 — валик;
 11, 15 — шпильки; 13 — стержень; А — зазор между обоймой и гайкой;
 Б — зазор между накладками нижней обоймы и нижнего носика

Таким образом, основная задача для КМБ отечественных тепловозов — необходимость создания конструкции с МОП российского производства и с более совершенной, чем пружинная, подвеской. Рассмотрим возможные варианты решения проблемы, которые можно реализовать в сложившихся условиях без проведения длительных исследований.

ОПОРНО-РАМНЫЙ ПРИВОД С ПОЛЫМ КАРДАННЫМ ВАЛОМ

Передаточное число тяговой передачи при опорно-рамном приводе и ТЭД ЭД-900 составляет 3,4, что близко к передаточному числу тепловоза 2ТЭ25А (3,65). На тихоходной части привода подшипники используются только для опоры колеса и воспринимают только реакции на оси в тяговой передаче.

Благодаря этому в зависимости от модификаций привода для разных серий тепловозов применяются либо два радиальных однорядных роликовых подшипника с буртами для восприятия осевых нагрузок, либо дополнительный шарикоподшипник.

К достоинствам данного тягового привода относится то, что он в целом и его узлы достаточно хорошо изучены, они могут быть изготовлены на той же технологической базе, что и опорно-осевые приводы серийно выпускаемых отечественных тепловозов.

Применение радиальных роликоподшипников упрощает сборку и ремонт привода. Производство резинокордных муфт (РКМ) не требует сложной оснастки и при необходимости может быть налажено непосредственно на самом локомотивостроительном заводе.

Чтобы упростить замену РКМ в депо, они выполнены из отдельных сегментов, которые демонтируются и монтируются без распрессовки колесной пары (рис. 4). Неровности пути не вызывают значительных динамических моментов в валопроводах привода. В силу перечисленных особенностей привод с РКМ вполне подходит для замены опорно-осевых приводов, оборудованных импортными подшипниками.

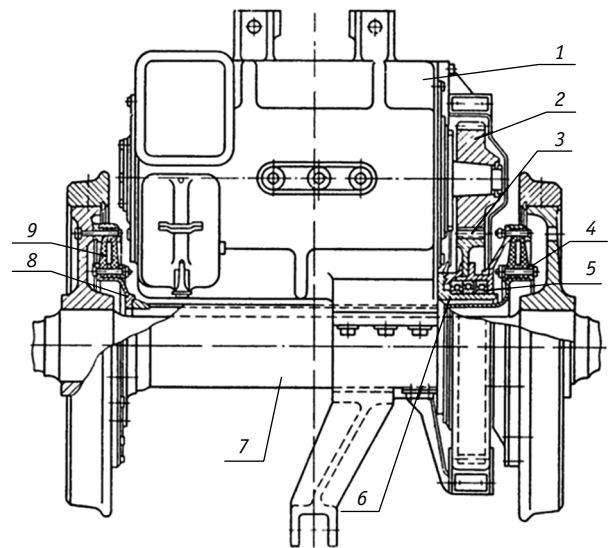


Рис. 4. Опорно-рамный привод с РКМ (вариант для локомотива колеи 1435 мм):

- 1 — ТЭД; 2 — малое зубчатое колесо; 3 — большое зубчатое колесо;
 4, 8 — фланцы полого вала; 5 — подшипниковый узел; 6 — опора подшипников узла; 7 — полый вал; 9 — упругая муфта

Следует отметить, что при эксплуатации макетного образца тепловоза ТЭ120 были зафиксированы разрывы упругих муфт тягового привода, чего не наблюдалось на тепловозах ТЭ125

и ТЭП150. Причина разрывов — высокие динамические моменты (в 6–8 раз больше номинальных), которые возникали в передаче тепловоза ТЭ120 при аварийных режимах работы преобразователя частоты [1], что обусловлено неудачной конструкцией устройства защиты, впоследствии измененного [2]. Кроме того, система управления инвертором напряжения не предусматривала использование широко-импульсной модуляции. Поэтому возникала значительная пульсация крутящего момента при пуске, которая тоже могла приводить к перегреву муфт (из-за переменной составляющей деформации кручения) и к их последующему разрыву. Этот недостаток был устранен на тепловозе 2ТЭ25а.

Другим недостатком привода, также связанным с тем, что он проектировался для экспортных тепловозов на колею 1435 мм, стало уменьшение ширины зубчатых колес. Если привод использовать только для тепловозов колеи 1520 мм, то ширина зубчатых колес может быть принята той же, что и для грузовых локомотивов.

Поскольку тепловоз 2ТЭ25а рассчитан на большую осевую силу тяги в длительном режиме, чем ТЭ120 (65 кН против 42,5 кН), необходима проверка резинокордных элементов по нагрузочной способности. Согласно [3], резинокордные элементы 760×435 мм, изготовленные из вискозной кордной ткани 17В, были рассчитаны на максимальный крутящий момент при трогании 50 кНм, что соответствует силе тяги 95 кН, и существенно выше, чем момент при трогании с места тепловоза 2ТЭ25а, равный 73,6 кН. Кратковременная несущая способность элементов ограничена по условию сцепления резины с арматурой муфты по внутренней арматуре. Несущая способность РКМ может быть повышена за счет мер по оптимизации муфты, ранее описанных авторами и запатентованных [4, 5].

Как следует из изложенного, основные проблемы, связанные с применением данного типа привода на грузовых тепловозах, можно считать решенными. Чтобы сделать окончательные выводы о целесообразности использования такого привода в условиях импортозамещения, необходимо провести опытно-конструкторские работы по определению

возможности компоновки выпускаемых асинхронных ТЭД при требуемом передаточном отношении. При использовании коллекторных ТЭД такой привод может применяться для создания пассажирского или грузопассажирского варианта тепловоза (из-за меньшего крутящего момента на валу коллекторных ТЭД в длительном режиме тяги [6]).

ТЯГОВЫЕ ПРИВОДЫ С ОПОРНО-РАМНЫМ ТЭД БЕЗ ПЕРЕДАТОЧНОГО МЕХАНИЗМА

В ОАО «ВНИКТИ» создан и испытан тяговый привод с опорно-рамным ТЭД, не содержащий передаточного механизма [7]. Его достоинство — отсутствие МОП и простота модернизации экипажной части, что делает этот тип конструкции одним из возможных направлений развития тяговых приводов локомотивов. Недостатком [7] является изменение расстояния между осями зубчатых колес тяговой передачи при вертикальных перемещениях колесной пары относительно рамы тележки, поэтому такой привод применим только для железнодорожных экипажей с малоинтенсивной эксплуатацией.

Как показал проведенный авторами анализ известных конструкций, для устранения указанного недостатка обычно используются дополнительные зубчатые колеса, что усложняет конструкцию привода. В связи с этим нами разработана конструкция тягового привода с опорно-рамным ТЭД без передаточного механизма с постоянным межосевым расстоянием в тяговой передаче (рис. 5).

В предложенной конструкции ТЭД подвешен на раме тележки с возможностью перемещения вдоль пути и связан корпусом тяговой передачи с осью колесной пары. Корпус колесной пары опирается на подшипники, воспринимающие только составляющую усилий в передаче, которая направлена радиально по отношению к зубчатым колесам и составляет примерно треть от радиальной нагрузки в передаче. Вследствие этого можно использовать подшипники значительно меньшей грузоподъемности, чем в приводе, показанном на рис. 1. При вертикальном перемещении колесной пары корпус передачи перемещается ТЭД в продольном направлении, причем межосевое расстояние для колес зубчатой передачи остается постоянным. На конструкцию привода подана заявка на получение патента.

Из-за отсутствия опыта по проектированию и производству опорно-рамных приводов без передаточного механизма имеет смысл рассматривать их только как возможный путь развития тяговых приводов железнодорожных экипажей в перспективе.

ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ПРИВОДА С ЖЕСТКИМ ОПИРАНИЕМ ТЭД НА КОЛЕСНУЮ ПАРУ

Основной проблемой конструкций опорно-осевого привода с МОП качения, в которых использовались подшипники отечественного производства (например, [8–10]), были ограниченные габариты между корпусом ТЭД и осью колесной пары при диаметре колеса 1050 мм.

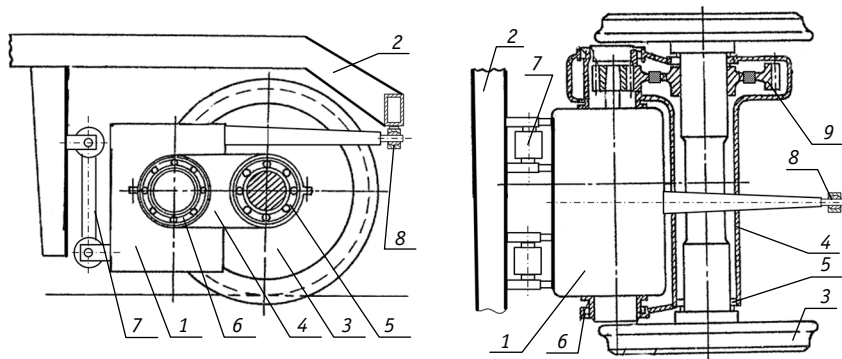


Рис. 5. Схема опорно-рамного привода без передаточного механизма:

- 1 — ТЭД; 2 — рама тележки; 3 — колесная пара; 4 — корпус тяговой передачи; 5, 6 — подшипники; 7 — подвеска ТЭД; 8 — шарнир; 9 — зубчатое колесо (упругое, самоустанавливающееся)

Для решения этой проблемы в ОАО «ВНИКТИ» среди прочих вариантов был предложен и запатентован КМБ с МОП качения, размещенными за пределами осевых габаритов корпуса ТЭД [11]. Среди достоинств конструкции следует отметить возможность увеличения наружного диаметра подшипников при относительной простоте их монтажа и регулировки. Недостатком являются ограниченные осевые габариты для размещения подшипника со стороны упругого зубчатого колеса (УЗК). Кроме того, восприятие значительных боковых усилий буртами роликовых подшипников сокращает срок их службы.

На электровозе 2ЭС10 с диаметром колеса 1250 мм был использован тяговый привод, в котором со стороны зубчатой передачи установлен роликовый подшипник больших размеров с цилиндрическими роликами, а со стороны колесного центра — шариковый [12]. Недостатками данного тягового привода являются технологическая сложность, отмеченная в [13], и необходимость применения импортных комплектующих.

В связи с этим авторами был предложен усовершенствованный вариант разработанного ОАО «ВНИКТИ» тягового привода, в котором УЗК опирается на колесный центр (рис. 6). Как видно из рис. 6, крепление УСЗК на колесном центре позволяет освободить пространство для размещения роликового подшипника больших габаритов. На противоположном колесном центре установлен шариковый подшипник, воспринимающий как радиальные, так и осевые нагрузки. Поскольку подшипниковые узлы расположены вне габаритов ТЭД, рассмотренный тяговый привод может быть использован для тепловозов как с асинхронными, так и с коллекторными ТЭД. На предложенное решение подана заявка на получение патента.

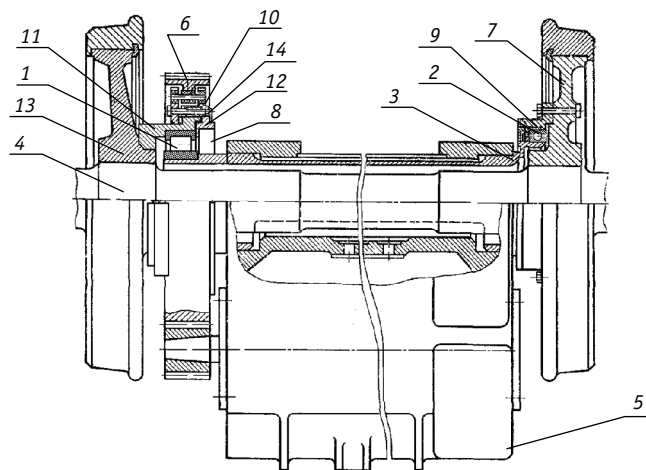


Рис. 6. Тяговый привод с опорами качения, вынесенными за пределы ТЭД:

- 1 — роликовый подшипник со стороны большого зубчатого колеса;
- 2 — роликовый подшипник со стороны колесного центра;
- 3 — полая труба; 4 — ось колесной пары; 5 — ТЭД;
- 6 — большое зубчатое колесо; 7 — колесный центр, удаленный от большого зубчатого колеса; 8, 9 — корпуса подшипников качения;
- 10 — отверстия под резинометаллические элементы;
- 11 — ступица большого зубчатого колеса — часть корпуса подшипника;
- 12 — фланец корпуса подшипника; 13 — колесный центр со стороны большого зубчатого колеса; 14 — болтовое соединение

Из изложенного следует, что создание тягового привода с использованием МОП качения отечественных производителей принципиально возможно для грузовых тепловозов и с асинхронными, и с коллекторными ТЭД. Для выбора наиболее рационального варианта применительно к технологической базе конкретного предприятия необходимо проведение проектно-конструкторских работ.

МОДЕРНИЗАЦИЯ УЗЛА ПОДВЕШИВАНИЯ

Основное требование, предъявляемое к модернизации узла подвешивания ТЭД, — обеспечить подкатку под тепловоз тяговых электродвигателей, рассчитанных на пружинную подвеску. Из числа ранее созданных и исследованных конструктивных вариантов следует отметить резинометаллическую траверсу, созданную ОАО «ВНИКТИ» и АО «Лугансктепловоз» [14] (рис. 7).

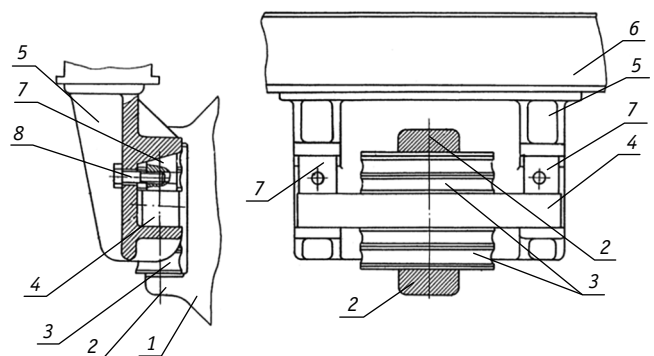


Рис. 7. Резинометаллическая траверса ВНИКТИ:

- 1 — ТЭД; 2 — носики; 3 — резинометаллические элементы;
- 4 — траверса; 5 — кронштейн; 6 — рама тележки; 7 — клинья; 8 — болт

Основное достоинство траверсы — ее совместимость с существующими узлами пружинной подвески. Конструкция не имеет пар трения, является простой и технологичной. При необходимости изготовление плоских резинометаллических элементов может быть организовано на самом локомотивостроительном заводе. В результате проведенных натурных испытаний установлено, что использование в приводе упругого зубчатого колеса не приводит к увеличению динамических нагрузок в узлах колесно-моторного блока [15].

Другой путь решения проблемы создания совместимых конструкций — применение сферических резинометаллических шарниров [16]. Авторами предложен ряд решений, основанных на трехшарнирной схеме подвески (рис. 8).

В конструкциях, изображенных на рис. 7, поперечное перемещение ТЭД обеспечивается за счет скольжения одного или двух шарниров по валику. Чтобы снизить износ, трущиеся поверхности можно закрыть кожухами (на рис. 7 не показаны). Демонтаж подвески производится за счет откручивания болтов на планках, предохраняющих оси от выпадения, и выбивания осей из шарниров. На данные варианты получены патенты на полезные модели [17, 18].

Недостаток подвески, представленной на рис. 8, — наличие изнашиваемых элементов. Авторами предложены варианты подвески, представляющей собой модернизацию резино-

металлической траверсы ОАО «ВНИКТИ» (рис. 9а, б), которые отличаются от прототипа большей простотой монтажа.

В траверсе, показанной на рис. 9а, используются два сферических шарнира, в траверсе, изображенной на рис. 9б, — один трехсегментный сферический шарнир, предварительная деформация которого достигается за счет раздвигания трех сегментов внутренней втулки во время ее перемещения по конической оси при затягивании болта. По этим конструкциям получен патент к полезной модели [19], а также подана заявка на получение патента.

Представленные выше варианты подвески ТЭД рассчитаны на применение с КМБ, оснащенным упругим зубчатым колесом. В то же время на российских железных дорогах эксплуатируются тепловозы ЧМЭЗ производства завода ČKD Praha (Чехия) с жесткой зубчатой передачей.

Для модернизации таких тепловозов авторами разработана подвеска (рис. 10) с двумя комплектами резинометаллических амортизаторов и центральным шарниром, размещенным между выступами на остовах ТЭД. На конструкцию подвески подана заявка на получение патента.

ТЯГОВЫЙ ПРИВОД И ЭКИПАЖНАЯ ЧАСТЬ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕПЛОВОЗА ВОСТОЧНОГО ПОЛИГОНА

Особенность требований, предъявляемых к тепловозам, предназначенным для эксплуатации на Восточном полигоне, — необходимость длительной эксплуатации без захода в депо для экипировки. Так как на российских железных дорогах не допускается повышение осевой нагрузки для магистральных грузовых тепловозов до 32 т, в АО «Трансмашхолдинг» был разработан проект тепловоза 2ТЭ30а с диаметром колес 1250 мм и четырехосным бустерным танкерным модулем для топлива, обеспечивающим безэкипировочный пробег по топливу до 4000 км.

Тепловоз такой мощности нецелесообразно использовать в путевом хозяйстве, на малодейственных направлениях или в маневровом движении, поэтому его движение одной секцией будет ограничено перемещением по заводским путям, соответственно запас топлива на секция вне бустерной может быть ограничен

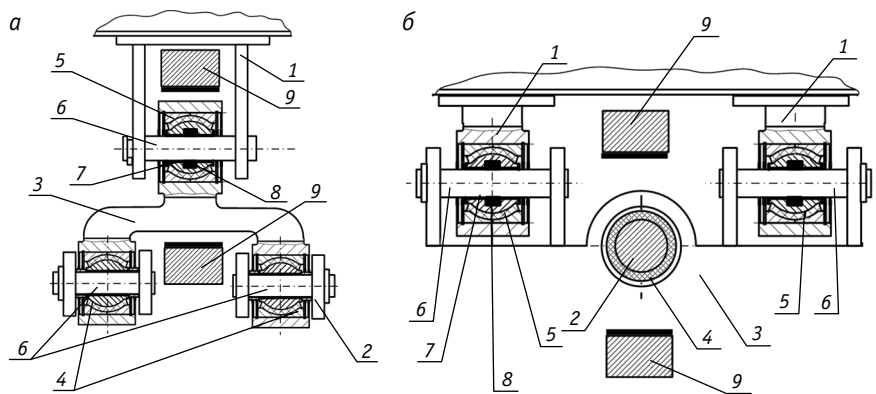


Рис. 8. Трехшарнирная подвеска ТЭД на шарнирах с параллельными (а) и перпендикулярными (б) осями:

1 — кронштейн крепления к раме тележки; 2 — кронштейн крепления к ТЭД; 3 — траверса подвески; 4 — неподвижный резинометаллический шарнир; 5 — подвижный резинометаллический шарнир; 6 — оси; 7 — смазывающая жидкость с ферромагнитными наночастицами; 8 — постоянные магниты; 9 — приливы на остовах ТЭД

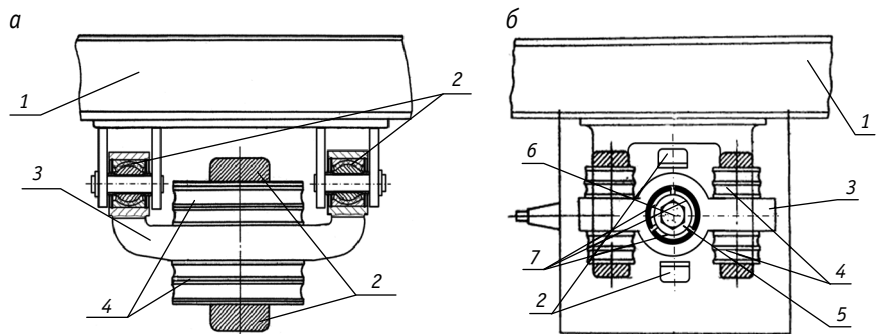


Рис. 9. Варианты подвески ТЭД без пар трения:

а — с двумя шарнирами; б — с трехсегментным шарниром;
 1 — рама тележки; 2 — приливы на остовах ТЭД; 3 — траверса;
 4 — резинометаллические элементы; 5 — шайба; 6 — болт; 7 — сегменты шарнира

баком небольшой емкости, размещенным в произвольной части кузова. Это позволяет использовать осевую формулу 2о-2о-2о вместо 3о-3о, т.е. применять двухосные тележки.

Как было показано авторами [20], в таком случае можно использовать конструкции, спроектированные на базе уже освоенных отечественным производством тележек электровоза ЭП1, созданных в расчете на российские комплектующие детали. Схема возможного расположения тележек на проектом тепловозе 2ТЭ30а представлена на рис. 11 и 12. Такое решение позволит упростить освоение тепловоза производством и использовать уже существующую технологическую базу обслуживания экипажной части.

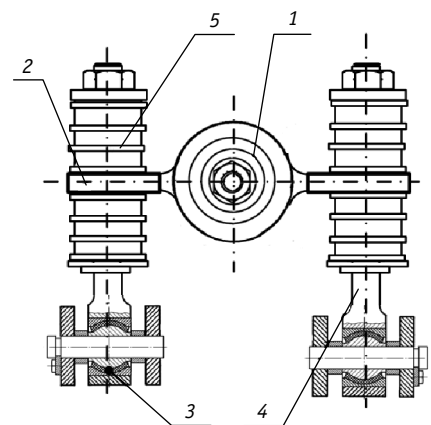


Рис. 10. Упругая подвеска ТЭД:

1 — центральный шарнир; 2 — траверса; 3 — сферический шарнир; 4 — тяга; 5 — резинометаллический элемент

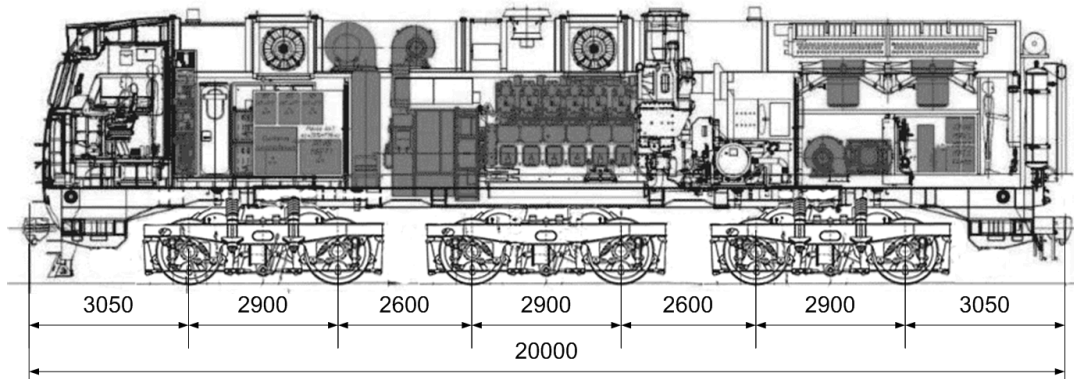


Рис. 11. Схема возможного расположения двухосных тележек электровоза ЭП1 на проектном тепловозе 2ТЭ30а (наклонные тяги не показаны)

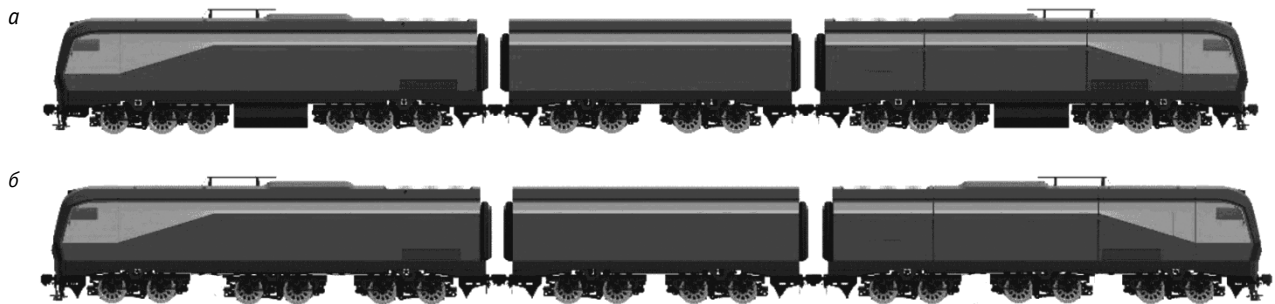


Рис. 12. Общий вид тепловоза с бустерным танкерным модулем на трехосных (а) и двухосных (б) тележках

Кроме того, несмотря на относительно небольшую базу (порядка 3 м), двухосные тележки электровозов дают возможность с помощью коллекторных ТЭД реализовать на каждой из осей силу тяги около 64 кН. В 1970-е гг. в нашей стране были созданы проекты восьми- и шестиполусных электровозных коллекторных ТЭД мощностью до 1300 кВт [21], что превышает мощность современных асинхронных ТЭД отечественных грузовых электровозов. Масса таких ТЭД, согласно проекту, составляла 4800 кг, т.е. немногим больше массы ТЭД 1АЛ-4741FLT электровоза ЧС200, развивавшего скорость до 200 км/ч. Это дает основание предполагать, что двухосные тележки с ТЭД такой массы при увеличенной до 265 кН осевой нагрузкой обеспечат допустимое воздействие локомотива на путь в прямых и кривых участках при конструкционной скорости локомотива 120 км/ч. Габариты тележки электровоза ЭП1 позволяют разместить ТЭД диаметром 1125 мм, как и у проектных ТЭД [21] (рис. 13).

Применение коллекторных ТЭД с поосным регулированием силы тяги позволяет существенно снизить стоимость локомотива по сравнению с использованием асинхронных ТЭД, а также дает возможность реализовать преобразовательную часть на основе отечественной комплектации. С другой стороны, чтобы обеспечить надежность коллекторных ТЭД большой мощности и ограничить неподрессоренную массу локомотива, необходимо, как было показано в [19], использовать привод с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором, где в качестве передаточного механизма применены две зуб-

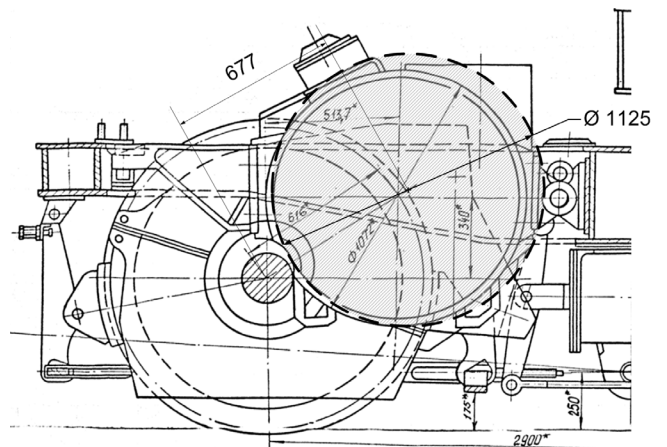


Рис. 13. Схема возможного размещения коллекторного ТЭД с наружным диаметром 1125 мм (заштриховано) на тележке электровоза ЭП1

чатые муфты (данный вариант по предложению авторов прорабатывался в ОАО «ВНИКТИ»), при этом ТЭД максимально защищен от динамических воздействий. Следует отметить, что в нашей стране накоплен значительный опыт проектирования и производства приводов такого типа, а их динамические свойства всесторонне исследованы ОАО «ВНИКТИ» еще в 1980-х гг. Поскольку конструкция привода с осевым редуктором накладывает ограничения на осевые габариты ТЭД, более целе-

сообразно применять восьмиполосный коллекторный ТЭД. Такой ТЭД несколько сложнее в изготовлении, но так как у него меньшие вылеты лобовых частей обмоток, то при той же длине пакета железа он имеет меньшие осевые габариты. При восьмиполосном ТЭД (аналогичном описанному в [20]), имеющем крутящий момент на валу в продолжительном режиме 17,7 кНм, требуется передаточное число редуктора, равное 2,714, а число зубьев малого колеса редуктора — 35 (при модуле 10 мм), что позволяет увеличить долговечность осевого редуктора по сравнению с вариантами, использующими асинхронные высокооборотные ТЭД.

На основании изложенного авторы считают, что необходимо провести технико-экономический анализ целесообразности создания для Восточного полигона тепловоза, оснащенного тележками электропоездов, восьмиполосным коллекторным ТЭД с моментом на валу в режиме продолжительной тяги около 18 кНм и опорно-рамным тяговым приводом с осевым редуктором.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Установлено, что в условиях импортозамещения для КМБ грузовых и маневровых тепловозов с колесами диаметром 1050 мм необходимо решить две ключевые задачи: разработать техническое решение узла моторно-осевых подшипников на основе использования отечественных комплектующих (для тепловозов с коллекторными и асинхронными ТЭД) и создать новую конструкцию подвески ТЭД для замены пружинной подвески, имеющей изнашиваемые детали.

2. По результатам проведенного анализа в качестве вариантов для замены подшипниковых узлов, оснащенных коническими роликоподшипниками фирмы Timken (США), предложено использовать опорно-рамный привод с кольцевыми резинокордными муфтами и разработанный авторами привод с жестким опиранием ТЭД на колесные центры. В обоих приводах применяются радиальные роликовые и шариковые

подшипники, приводы могут быть изготовлены на технологической базе отечественных предприятий.

Для опорно-рамного привода с кольцевыми резинокордными муфтами известные недостатки к настоящему времени устранены. Авторами предложены способы повысить несущую способность резинокордных муфт за счет придания им равнопрочности. Привод целесообразно использовать для грузовых тепловозов с асинхронными ТЭД и для пассажирских или грузопассажирских тепловозов с коллекторными ТЭД.

Чтобы заменить пружинную подвеску коллекторных ТЭД грузовых тепловозов и обеспечить совместимость с конструкцией ТЭД эксплуатируемых локомотивов, предложено использовать разработанную ОАО «ВНИКТИ» и АО «Лугансктепловоз» подвеску, имеющую плоские резинометаллические элементы, опытный образец которой уже дал положительные результаты при натурных испытаниях. Помимо этого, предложен ряд вариантов подвески с использованием сферических резинометаллических шарниров.

Авторы считают целесообразным проведение опытно-конструкторских работ для определения наиболее рациональных вариантов узлов моторно-осевых подшипников и подвески ТЭД применительно к конкретным технологическим особенностям предприятия-изготовителя.

3. На основании результатов ранее выполненных авторами работ предлагается провести технико-экономические исследования о целесообразности разработки варианта перспективного для Восточного полигона тепловоза, в экипажной части которого используются двухосные тележки магистральных электропоездов, восьмиполосный ТЭД с моментом на валу в режиме продолжительной тяги около 18 кНм и опорно-рамный тяговый привод.

4. На предложенные авторами решения по теме статьи получены патент и авторское свидетельство на изобретения, пять патентов на полезные модели, поданы две заявки на получение патента.

Литература

1. Будницкий А. А., Строков В. С., Мельман П. Ш. Тягово-энергетические характеристики макетного тепловоза ТЭ120 с электропередачей переменного тока // Труды ВНИИТ. 1980. Вып. 51 : Совершенствование электрических передач тепловозов. С. 23–26.
2. Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов / А. Д. Степанов, В. И. Андерс, В. А. Пречисский, Ю. И. Гусевский. Москва : Транспорт, 1982. 254 с.
3. Повышение надежности экипажной части тепловозов / А. И. Беляев, Б. Б. Бунин, С. М. Голубятников [и др.]; под ред. Л. К. Добрынина. Москва : Транспорт, 1984. 248 с.
4. Оболочка резинокордная для высокоэластичной муфты / В. И. Воробьев, О. В. Измеров, О. В. Дорофеев, С. Н. Злобин : патент на полезную модель 157519 Российская Федерация. № 2015119063/11; заявл. 20.05.2015; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34.
5. Компенсационная муфта тягового привода локомотива / В. И. Воробьев, Д. Я. Антипин, О. В. Измеров [и др.] : патент на полезную модель 173560 Российская Федерация. № 2017105539; заявл. 20.02.2017; опубл. 30.08.2017, Бюл. № 25.
6. Возможности унификации грузовых и пассажирских тепловозов широкой колеи / Д. Я. Антипин, М. И. Борзенков, В. И. Воро-

References

1. Budnitskiy A. A., Strokov V. S., Melman P. Sh. Traction and energy characteristics of TE 120 diesel locomotive mockup with alternating current electric transmission [Tyagovo-energeticheskie kharakteristiki maketnogo teplovoza TE 120 s elektroperedachey peremennogo toka] // Proceedings of VNIIT. 1980. Issue 51 : Improvement of electric transmissions of diesel locomotives. Pp. 23–26.
2. Alternating current electric transmissions for diesel and gas turbine locomotives [Elektricheskie peredachi peremennogo toka teplovozoв i gazoturbovozoв] / A. D. Stepanov, V. I. Anders, V. A. Prechisskiy, Yu. I. Gusevskiy. Moscow : Transport, 1982. 254 p.
3. Increase of reliability of diesel locomotive underframe [Povyshenie nadezhnosti ekipazhnoy chasti teplovozoв] / A. I. Belyaev, B. B. Bunin, S. M. Golubyatnikov [et al.]; ed. by L. K. Dobrynin. Moscow : Transport, 1984. 248 p.
4. Rubber-cord casing for highly elastic coupling [Obolochka rezinokordnaya dlya vysokoelastichnoy mufty] / V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov, O. V. Dorofeev, S. N. Zlobin : patent for utility model 157519 Russian Federation. No. 2015119063/11; filed 20.05.2015; publ. 10.12.2015, Bulletin No. 34.
5. Expansion coupling of locomotive traction drive [Kompensatsionnaya mufta tyagovogo privoda lokomotiva] / V. I. Vorobyev, D. Ya. Antipin,

- бьев [и др.] // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 4 (67). С. 40–49. ISSN 2073–7432.
7. Беляев А. И., Кондратов В. А., Родова Л. И. Опорно-рамный тяговый привод // Труды ВНИТИ. 1980. Вып. 52 : Исследование узлов и агрегатов тепловозов. С. 69–73.
 8. Колесно-моторный блок / В. С. Коссов, Ю. В. Мещерин, Г. И. Михайлов [и др.] : патент 2323117 Российская Федерация. № 2006136605/11; заявл. 18.10.2006; опубл. 27.04.2008, Бюл. № 12.
 9. Колесно-моторный блок / В. В. Лускатов, С. А. Гоков, А. А. Сачков: патент на полезную модель 184320 Российская Федерация. № 2018127628; заявл. 26.07.2018; опубл. 22.10.2018, Бюл. № 30.
 10. Колесно-моторный блок с опорно-осевым подвешиванием тягового электродвигателя / Д. А. Юровский, А. А. Сачков : патент на полезную модель 188827 Российская Федерация. № 2019101752; заявл. 22.01.2019; опубл. 24.04.2019, Бюл. № 12.
 11. Моторно-осевой подшипниковый узел колесно-моторного блока с упругой зубчатой передачей железнодорожного транспортного средства / К. С. Сдобин, В. Г. Небылицын, А. И. Беляев [и др.] : авторское свидетельство 564194 СССР. № 2135730; заявл. 23.05.1975; опубл. 05.07.1977, Бюл. № 25.
 12. Осинцев И. А., Логинов А. А. Устройство и эксплуатация электровазона ЭЭС10. Москва : ОАО «Российские железные дороги», 2015. 333 с.
 13. Воробьев В. И., Стриженко А. Г., Измеров О. В. Поиск новых конструктивных схем редукторного и безредукторного тягового привода локомотива с частичным обрессориванием масс // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 1 (49). С. 16–21. ISSN 1999–8775.
 14. Узел крепления к раме тележки железнодорожного транспортного средства тягового электродвигателя / А. В. Петров, В. А. Безбожный, В. А. Березницкий [и др.] : авторское свидетельство 925718 СССР. № 2963676; заявл. 25.07.1980; опубл. 07.05.1982, Бюл. № 17.
 15. Исследование динамики тягового электродвигателя с упругой резинометаллической подвеской на тепловозе 2ТЭ116 : отчет о НИР / ВНИТИ. Коломна, 1980. 46 с. № ГР 79017846. Инв. № 72–80.
 16. Способ сборки сферического резинометаллического шарнира / В. С. Коссов, А. И. Кокорев, В. А. Лысак [и др.] : авторское свидетельство 1493807 СССР. № 4272700; заявл. 04.05.1987; опубл. 15.07.1989, Бюл. № 26.
 17. Узел подвешивания тягового электродвигателя / Д. Я. Антипин, В. И. Воробьев, О. В. Измеров [и др.] : патент на полезную модель 176843 Российская Федерация. № 2017120584; заявл. 13.06.2017; опубл. 30.01.2018, Бюл. № 4.
 18. Узел подвешивания тягового электродвигателя / В. И. Воробьев, Д. Я. Антипин, А. А. Пугачев [и др.] : патент на полезную модель 186173 Российская Федерация. № 2018114136; заявл. 17.04.2018; опубл. 11.01.2019, Бюл. № 2.
 19. Узел подвешивания тягового электродвигателя / В. И. Воробьев, Д. Я. Антипин, С. О. Копылов [и др.] : патент на полезную модель 176873 Российская Федерация. № 2017120583; заявл. 13.06.2017; опубл. 30.01.2018, Бюл. № 4.
 20. Поиск путей повышения тяговых свойств тепловозов и конструкция тягового привода / В. И. Воробьев, А. А. Пугачев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 12 (109). С. 48–59. ISSN 1999–8775.
 21. Курбасов А. С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей. Москва : Транспорт, 1977. 223 с.
 22. O. V. Izmerov [et al.]: patent for utility model 173560 Russian Federation. No. 2017105539; filed 20.02.2017; publ. 30.08.2017, Bulletin No. 25.
 23. Unification of freight and passenger diesel-electric locomotives [Vozmozhnosti unifikatsii gruzovykh i passazhirskikh teplovozzov shirokoy kolei] / D. Ya. Antipin, M. I. Borzenkov, V. I. Vorobyev [et al.] // World transport and technological machinery. 2019. No. 4 (67). Pp. 40–49. ISSN 2073–7432.
 24. Belyaev A. I., Kondratov V. A., Rodova L. I. Frame support traction drive [Oporno-ramniy tyagoviy privod] // Proceedings of VNIIT. 1980. Issue 52 : Study of assemblies and units for diesel locomotives. Pp. 69–73.
 25. Wheels and motors unit [Kolesno-motorniy blok] / V. S. Kossov, Yu. V. Meshcherin, G. I. Mikhaylov [et al.] : patent 2323117 Russian Federation. No. 2006136605/11; filed 18.10.2006; publ. 27.04.2008, Bulletin No. 12.
 26. Wheels and motors unit [Kolesno-motorniy blok] / V. V. Luskatov, S. A. Gokov, A. A. Sachkov : patent for utility model 184320 Russian Federation. No. 2018127628; filed 26.07.2018; publ. 22.10.2018, Bulletin No. 30.
 27. Wheels and motors unit with axial support of traction motor [Kolesno-motorniy blok s oporno-osevym podveshivaniem tyagovogo elektrodvigatelya] / D. A. Yurovskiy, A. A. Sachkov : patent for utility model 188827 Russian Federation. No. 2019101752; filed 22.01.2019; publ. 24.04.2019, Bulletin No. 12.
 28. Motor support bearing assembly for wheels and motors unit with elastic gearwheel of railway vehicle [Motorno-osevoy podshpnikoviy uzol kole-sno-motornogo bloka s uprugoy zubchatoy peredachey zheleznodorozhnogo transportnogo sredstva] / K. S. Sdobin, V. G. Nebylitsyn, A. I. Belyaev [et al.] : inventor's certificate 564194 USSR. No. 2135730; filed 23.05.1975; publ. 05.07.1977, Bulletin No. 25.
 29. Osintsev I. A., Loginov A. A. Design and operation of 2ES 10 electric locomotive [Ustroystvo i ekspluatatsiya elektrovoza 2ES 10]. Moscow : JSC «Russian Railways», 2015. 333 p.
 30. Vorobyev V. I., Strizhenok A. G., Izmerov O. V. Search of new design schemes of geared and direct-drive traction mechanism of locomotive with mass partial springing [Poisk novykh konstruktivnykh skhem reduktornogo i bezreduktornogo tyagovogo privoda lokomotiva s chastichnym obressorivaniem mass] // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2016. No. 1 (49). Pp. 16–21. ISSN 1999–8775.
 31. Assembly for mounting of electric motor to bogie frame of railway vehicle [Uzel krepleniya k rame telezhki zheleznodorozhnogo transportnogo sredstva tyagovogo elektrodvigatelya] / A. V. Petrov, V. A. Bezbozhniy, V. A. Berezniyskiy [et al.] : inventor's certificate 925718 USSR. No. 2963676; filed 25.07.1980; publ. 07.05.1982, Bulletin No. 17.
 32. Study of dynamics of electric traction motor with elastic rubber-metal suspension on 2TE 116 diesel locomotive [Issledovanie dinamiki tyagovogo elektrodvigatelya s uprugoy rezinometallicheskoj podveskoj na teplovoze 2TE 116] : research report 79017846 / VNIIT. Kolomna, 1980. 46 p.
 33. Installation method of spherical rubber-metal mounting [Sposob sborki sfericheskogo rezinometallicheskogo sharnira] / V. S. Kossov, A. I. Kokorov, V. A. Lysak [et al.] : inventor's certificate 1493807 USSR. No. 4272700; filed 04.05.1987; publ. 15.07.1989, Bulletin No. 26.
 34. Electric traction motor mounting [Uzel podveshivaniya tyagovogo elektrodvigatelya] / D. Ya. Antipin, V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov [et al.] : patent for utility model 176843 Russian Federation. No. 2017120584; filed 13.06.2017; publ. 30.01.2018, Bulletin No. 4.
 35. Electric traction motor mounting [Uzel podveshivaniya tyagovogo elektrodvigatelya] / V. I. Vorobyev, D. Ya. Antipin, A. A. Pugachev [et al.] : patent for utility model 186173 Russian Federation. No. 2018114136; filed 17.04.2018; publ. 11.01.2019, Bulletin No. 2.
 36. Electric traction motor mounting [Uzel podveshivaniya tyagovogo elektrodvigatelya] / V. I. Vorobyev, D. Ya. Antipin, S. O. Kopylov [et al.] : patent for utility model 176873 Russian Federation. No. 2017120583; filed 13.06.2017; publ. 30.01.2018, Bulletin No. 4.
 37. Search for ways to improve the traction properties of locomotives and traction drive design [Poisk putey povysheniya tyagovykh svoystv teplovozzov i konstruksiya tyagovogo privoda] / V. I. Vorobyev, A. A. Pugachev, O. V. Izmerov, E. V. Nikolaev // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2021. No. 12 (109). Pp. 48–59. ISSN 1999–8775.
 38. Kurbasov A. S. Increase of performance of electric traction motors [Povyshenie rabotosposobnosti tyagovykh elektrodvigatelye]. Moscow : Transport, 1977. 223 p.

Объем статьи 1,2 авторских листа

УДК 621.391

Руслан Рифович Юсупов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,

Алексей Сергеевич Хохрин, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ПРИЕМНИК С КВАДРАТУРНЫМИ КАНАЛАМИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ТИПА АЛСН

Ruslan Rifovich Yusupov, PhD in Engineering, Associate Professor, Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,

Alexey Sergeevich Khokhrin, postgraduate student, Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia

Correlation receiver with quadrature channels for continuously working automatic cab signalling

Аннотация

Повышение достоверности приема сигналов автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) до настоящего времени остается актуальной задачей. Один из возможных способов ее решения — усовершенствование существующих либо разработка новых приемных устройств АЛСН с повышенной помехоустойчивостью. В статье представлен корреляционный приемник сигналов АЛСН с квадратурными каналами. Рассмотрены его функциональная схема и имитационная модель, разработанная в среде Simulink. Предварительные результаты, полученные на имитационной модели, показали, что приемник в принципе является работоспособным. В дальнейшем результаты выполненного исследования могут быть использованы при разработке новых или совершенствовании существующих микропроцессорных приемных устройств канала АЛСН.

Ключевые слова: автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа, корреляционный приемник, поэлементный прием, квадратурный канал, имитационная модель.

Abstract

Increase of reception validity of continuously working automatic cab signalling (CWACS) signals is still an actual task. One of the possible ways of its solution is to improve existing CWACS receivers or to develop new ones with increased noise immunity. The paper presents a correlation receiver of CWACS signals with quadrature channels. The authors have considered its functional scheme and a simulation model developed in the Simulink environment. Preliminary results gained with the use of the simulation model showed that the receiver is workable. Results of the study can be used at development of new or at improvement of existing microprocessor receivers of CWACS channel.

Keywords: continuously working automatic cab signalling, correlation receiver, elementwise reception, quadrature channel, simulation model.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-49-54

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения безопасности движения поездов на магистральных железных дорогах России и некоторых стран СНГ используется автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа (АЛСН). Она передает информацию, в частности, о свободности (занятости) участков пути в кабину машиниста поездного локомотива через кодовые комбинации (КК) числового кода. С ростом массы поездов и широким внедрением современного тягового подвижного состава, оснащенного асинхронным тяговым электроприводом переменного тока с частотным регулированием, электромагнитная обстановка в каналах автоматической локомотивной сигнализации АЛСН и АЛС-ЕН ухудшается. Это особенно проявляется в низкочастотном канале АЛСН, что выражается в высокой доле сбоев второй категории, согласно принятой в [1] классификации (одиночные сбои с неустановленной причиной при исправном состоянии локомотивных и путевых устройств АЛС).

Причинами сбоев второй категории, в частности, являются низкая помехоустойчивость локомотивного приемника сигналов АЛСН при воздействии импульсных и гармонических помех, а также несовершенство алгоритма дешифрации кодовых комбинаций АЛСН. В современных микроэлектронных локомотивных устройствах безопасности (таких, например, как КЛУБ-У — комплексное локомотивное устройство безопасности, БЛОК — безопасный локомотивный объединенный комплекс, ДКСВ-М — дешифратор микропроцессорный) все операции приема сигналов АЛСН выполняет специализированное программное обеспечение [2, 3]. Использовать более сложные алгоритмы приема, чем применяемое в настоящее время линейное амплитудное детектирование огибающей амплитудно-манипулированного сигнала АЛСН, позволяет цифровая обработка сигналов.

В связи с этим цель исследования, представленного в данной статье, заключалась в разработке функциональной схемы цифрового приемника сигналов АЛСН с потенциально более высокой помехоустойчивостью, чем у приемника с линейным амплитудным детектированием, и в создании имитационной модели для дальнейшего экспериментального изучения процесса его функционирования.

Согласно поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) анализ способов оптимального приема дискретных сигналов со случайными существенными параметрами и выбор способа, наиболее подходящего для применения в приемнике сигналов АЛСН;
- 2) разработка функциональной схемы приемника, реализующей выбранный способ приема;
- 3) разработка на основе полученной функциональной схемы модели приемника для проведения с ее помощью экспериментальных исследований, направленных на оценку качества функционирования приемника в различных условиях.

Решение первых двух задач связано с поиском и анализом литературы, в которой изучаются вопросы оптимального приема дискретных сигналов. Поскольку рассматриваемый приемник сигналов АЛСН физически не существует, в качестве наиболее подходящего метода исследования выбрано имитационное моделирование.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЕМА ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ СО СЛУЧАЙНЫМИ СУЩЕСТВЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Согласно теории оптимального приема, оптимальное приемное устройство (ОПУ) вычисляет функцию взаимной корреляции $q(\lambda_i)$ для всех дискретных сообщений λ_i и выдает оценку передаваемого сообщения $\hat{\lambda}$ в соответствии с каким-либо алгоритмом (например, максимального правдоподобия [4, 5]). Именно поэтому в ОПУ используются приемно-фильтрующее и решающее устройства. В простейшем случае решающее устройство представляет собой пороговое устройство, осуществляющее сравнение величины $q(\lambda_i)$ с некоторым пороговым значением.

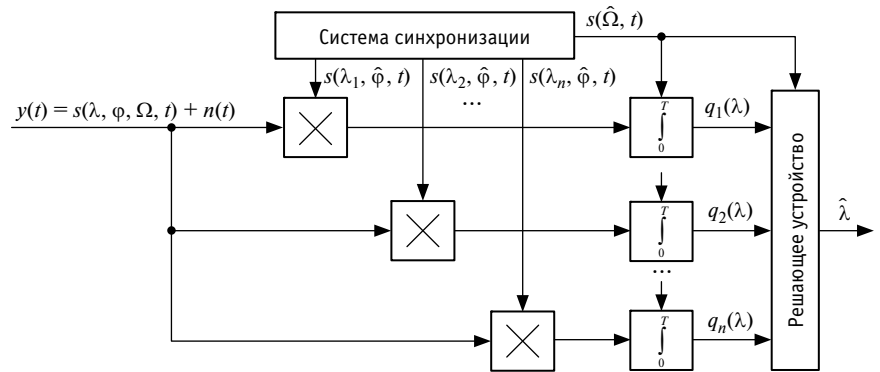


Рис. 1. Структурная схема многоканального корреляционного ОПУ с системой синхронизации

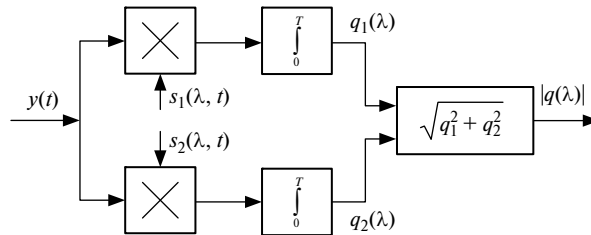


Рис. 2. Структурная схема коррелятора с квадратурными каналами

В реальных условиях существенные для корреляционного приема параметры принимаемого сигнала (частота и фаза несущего колебания) являются случайными величинами, что вызывает необходимость использовать в ОПУ системы синхронизации.

Структурная схема многоканального корреляционного ОПУ с системой синхронизации показана на рис. 1. Система синхронизации осуществляет оценку неизвестных существенных параметров несущей сигнала: фазы ϕ и частоты Ω .

Корреляционное ОПУ с системой синхронизации при использовании в канале АЛСН будет обладать таким недостатком: в процессе движения локомотива при каждом переходе на следующий путьевой участок со смежной рельсовой цепью (РЦ) может нарушаться синхронизм, а следовательно, и процесс приема сигналов АЛСН. Это чревато полным прекращением приема сигнала, например, при движении по железнодорожному пути с короткими рельсовыми цепями. Система синхронизации не будет успевать синхронизировать частоту и фазу колебаний опорных сигналов.

Отмеченный недостаток может быть устранен при использовании коррелятора с квадратурными каналами (рис. 2).

В данном случае в корреляционном ОПУ организуются два канала с опорными сигналами $s_1(\lambda, t)$ и $s_2(\lambda, t)$, сдвинутыми по фазе на 90° . Однако проблема несовпадения частот несущих колебаний принимаемого и опорных сигналов остается и будет вызывать биения значений функции взаимной корреляции $q(\lambda)$ на выходе коррелятора. При этом система синхронизации осуществляет оценку только одного неизвестного существенно параметра несущей сигнала — частоты Ω , которая в процессе приема сигнала АЛСН изменяется в гораздо меньших пределах и значительно медленнее, чем фаза ϕ . Отсюда требования к быстродействию и точности синхронизации значительно снижаются, что приведет к упрощению системы синхронизации.

Проанализируем потенциальные возможности оптимального корреляционного приема сигналов АЛСН при использовании коррелятора с квадратурными каналами. Поскольку систему синхронизации частоты опорного колебания с частотой несущего колебания принимаемого сигнала будем считать идеальной, то вопросы ее точности и быстродействия не рассматриваем — это предмет отдельного исследования.



ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ АЛСН

Корреляционный приемник будет выполнять поэлементный прием сигнала АЛСН, т.е. задача приемника — выделить огибающую принимаемого сигнала АЛСН $|q(\lambda)|$ и сформировать последовательность элементов сообщения λ для его дальнейшего дешифрирования. Поэтому нет необходимости использовать в нем каналы с шестью эталонными опорными сигналами, соответствующими кодовым комбинациям АЛСН с различной длительностью кодового цикла. Достаточно сформировать два опорных колебания $s_1(t)$ и $s_2(t)$ с требуемой частотой, равной частоте несущей принимаемого сигнала, и различающихся по фазе на 90° .

На рис. 3 показана функциональная схема корреляционного приемника АЛСН с квадратурными каналами, осуществляющего поэлементный корреляционный прием (КПКК).

КПКК содержит:

опорный генератор (ОГ), вырабатывающий два опорных непрерывных гармонических колебания $s_1(t)$ и $s_2(t)$ с одинаковой частотой и различающейся на 90° начальной фазой;

квадратурный коррелятор (КК), рассчитывающий по входному сигналу АЛСН $y(t)$ мгновенные значения огибающей $X(t)$;

пороговое решающее устройство (РУ), принимающее решение s о наличии импульса кодового сигнала АЛСН, если огибающая $X(t)$ превышает порог срабатывания РУ $h(t)$, либо решение n о его отсутствии, если огибающая $X(t)$ ниже порога срабатывания РУ $h(t)$.

Квадратурный коррелятор, в свою очередь, имеет:

перемножители « \times » входного сигнала и опорных колебаний в квадратурных каналах;

фильтры нижних частот (ФНЧ1 и ФНЧ2), формирующие квадратурные составляющие $X_1(t)$ и $X_2(t)$ огибающей сигнала $X(t)$;

блоки возведения в квадрат X^2 ;

сумматор «+»;

блок вычисления квадратного корня (БВК), рассчитывающий выражение $X(t) = \sqrt{X_1^2(t) + X_2^2(t)}$ и тем самым формирующий огибающую сигнала на выходе КК.

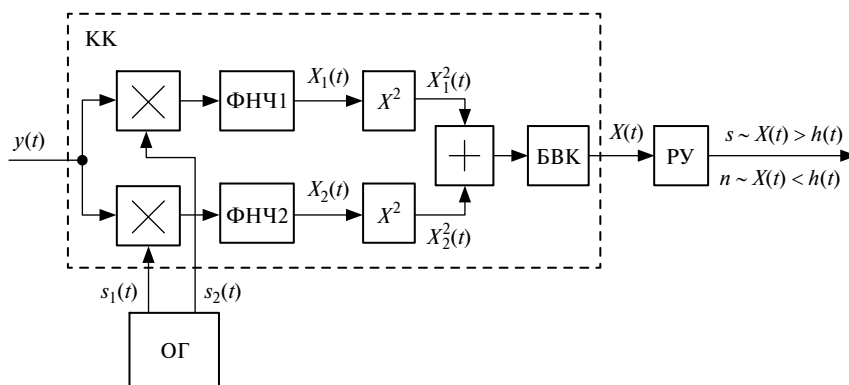


Рис. 3. Функциональная схема корреляционного приемника АЛСН с квадратурными каналами

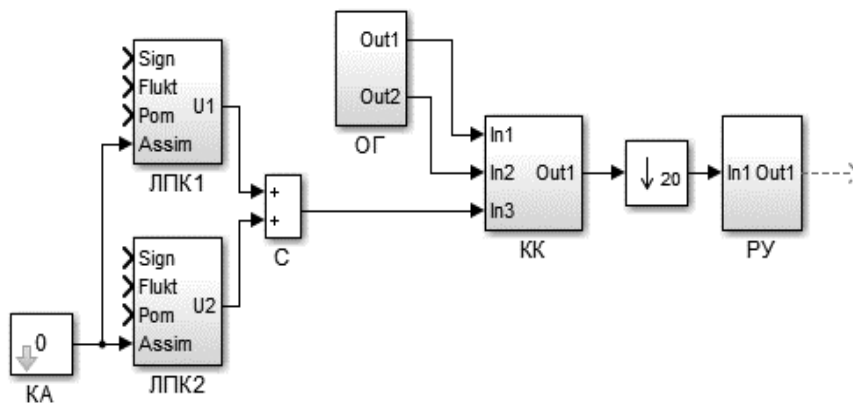


Рис. 4. Блок-схема имитационной модели КПКК

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИЕМНИКА С КВАДРАТУРНЫМИ КАНАЛАМИ

На основе представленной функциональной схемы (см. рис. 3) в среде имитационного моделирования Simulink [6] построена имитационная модель КПКК, позволяющая экспериментально исследовать процесс его функционирования в различных условиях.

В имитационной модели все сигналы формируются и обрабатываются с частотой дискретизации 2 кГц, принятой в существующем приемнике канала АЛСН в комплексном локомотивном устройстве безопасности КЛУБ-У. Модель построена для обработки сигнала АЛСН с частотой несущей 50 Гц. Для иной частоты несущей сигнала (25 или 75 Гц) модель требует незначительной перенастройки.

Блок-схема имитационной модели КПКК представлена на рис. 4.

Модель КПКК содержит следующие блоки:

блок КА, в котором пользователь может вручную задавать в относительных единицах коэффициент асимметрии приемного тракта канала АЛСН. Асимметрия приемного тракта включает в себя продольную асимметрию рельсовой линии, асимметрию электрических и магнитных параметров локомотивных приемных катушек ПК1 и ПК2, а также асимметрию их расположения относительно рельсов, обусловленную несимметрией их подвеса на локомотиве и колебаниями кузова локомотива в процессе движения [7];

модели локомотивных приемных катушек ЛПК1 и ЛПК2, в которых учитывается согласное включение катушек для сигнала АЛСН и встречное — для помех, индуцируемых тяговым током; сумматор (С); опорный генератор (ОГ); квадратурный коррелятор (КК); пороговое решающее устройство (РУ).

Блок-схема имитационной модели ОГ представлена на рис. 5.

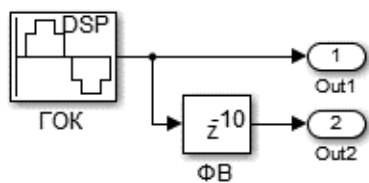


Рис. 5. Блок-схема имитационной модели опорного генератора

Модель ОГ имеет следующие блоки: генератор опорного гармонического колебания (ГОК), формирующий опорное колебание с частотой 50 Гц и амплитудой 1 В в первом квадратурном канале; фазовращатель (ФВ), формирующий опорное колебание с частотой 50 Гц и амплитудой 1 В во втором квадратурном канале с начальной фазой, сдвинутой на 90° относительно начальной фазы колебания в первом квадратурном канале. Сдвиг фазы осуществляется путем задержки опорного колебания с выхода ГОК на 10 дискретных отсчетов (с учетом частоты дискретизации 2000 Гц и частоты опорного колебания 50 Гц); порты вывода сигналов Out1 и Out2.

Блок-схема имитационной модели КК представлена на рис. 6.

Имитационная модель КК содержит следующие блоки: порты ввода опорных колебаний In1 и In2, а также входного сигнала приемника In3; перемножители П1, П2 первого и второго квадратурного каналов, осуществляющие умножение входного сигнала приемника на первое и второе опорное колебание соответственно;

фильтры нижних частот (ФНЧ1, ФНЧ2), выделяющие низкочастотные квадратурные составляющие огибающих на выходах перемножителей П1 и П2 соответственно; блоки возведения в квадрат (БВК1, БВК2); сумматор (С); блок вычисления квадратного корня (БВКК).

ФНЧ1 и ФНЧ2 представляют собой цифровые фильтры 256-го порядка с конечной импульсной характеристикой. Используется фильтрующее окно Кайзера с параметром окна $\beta = 3,4$. Частота среза для обоих ФНЧ составляет 12 Гц

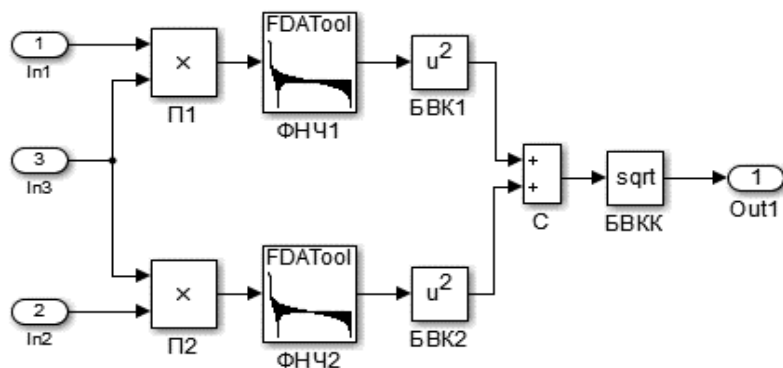


Рис. 6. Блок-схема имитационной модели квадратурного коррелятора

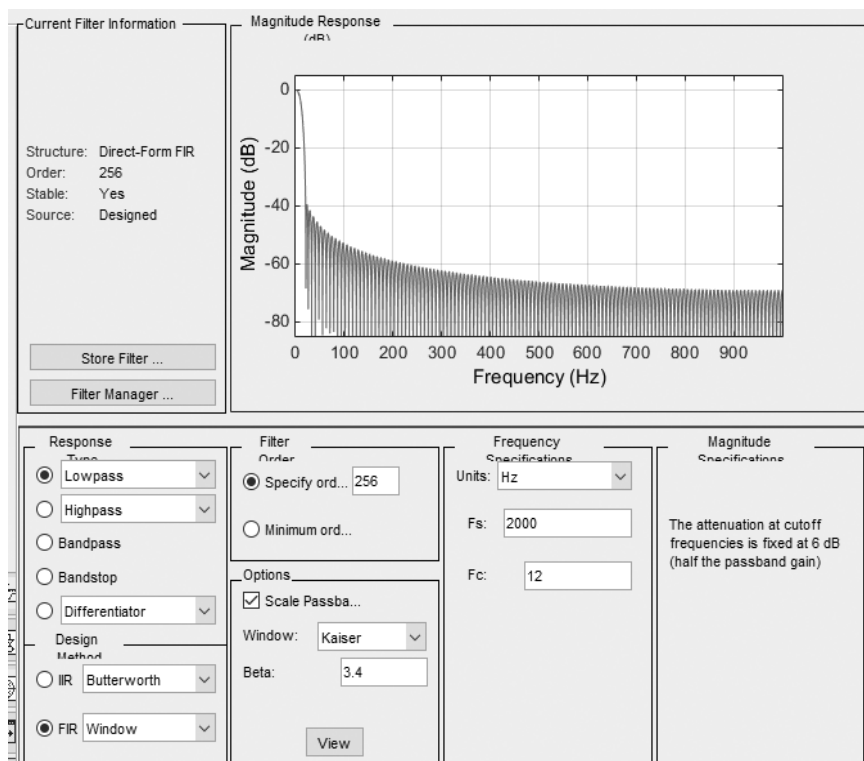


Рис. 7. Окно настройки параметров ФНЧ

(рис. 7). Уровень первого бокового лепестка не превышает -40 дБ по отношению к уровню главного лепестка.

Таким образом, на выходе КК формируются мгновенные значения функции $X(t)$, представляющей собой огибающую принимаемого кодового сигнала АЛСН.

На рис. 8а-г представлены осциллограммы*, полученные на имитационной модели КПКК при приеме сигнала кодо-

вой комбинации «3» АЛСН для случая, когда опорное колебание в первом канале КК отличается от колебания несущей сигнала АЛСН по начальной фазе на 30°.

Осциллограммы рис. 8 иллюстрируют особенность работы квадратурного коррелятора, которая заключается в том, что амплитуда выделенной огибающей кодового сигнала на его выходе в два раза меньше амплитуды сигнала на входе при-

*На всех осциллограммах рис. 8, а также рис. 10 значения по оси абсцисс — модельное время, с; значения по оси ординат — напряжение сигналов на входах или выходах блоков модели, В.

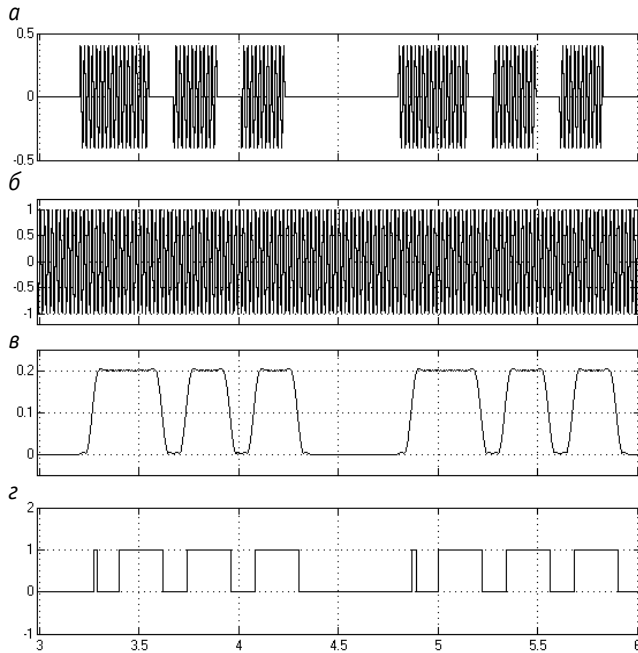


Рис. 8. Осциллограммы, демонстрирующие работу КПКК:

а — сигнал АЛСН на входе КПКК; б — опорное колебание в первом квадратурном канале; в — сигнал на выходе КК (выделенная огибающая сигнала АЛСН); г — сигнал на выходе РУ

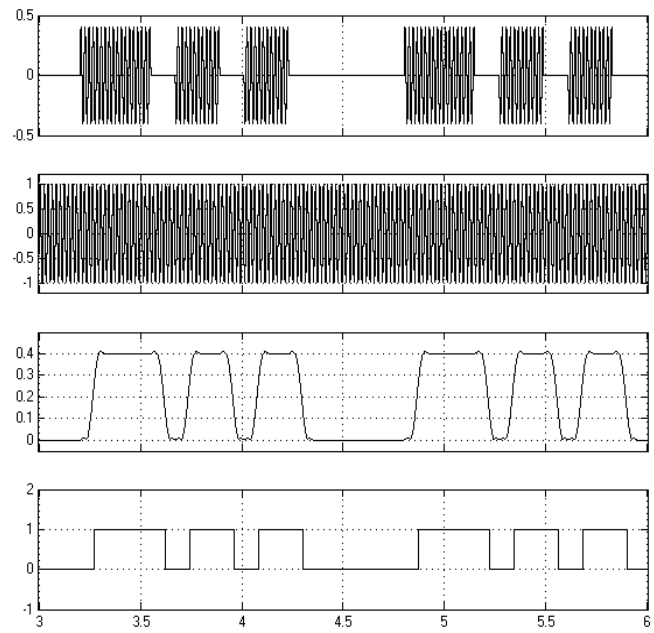


Рис. 10. Осциллограммы, демонстрирующие работу КПКК с усилителем

На рис. 10 показаны осциллограммы, аналогичные представленным на рис. 8, но с тем отличием, что две нижние осциллограммы получены для КПКК с усилителем в КК. Из нижней осциллограммы рис. 10 видно, что добавление усилителя в КК нормализует прием сигнала, устраняя дробление первого импульса принимаемой кодовой комбинации. Кроме того, длительности импульсов и интервалов в кодовой комбинации приближаются к нормативным значениям, что в конечном счете будет положительно сказываться на достоверности дешифрации кодовой комбинации.

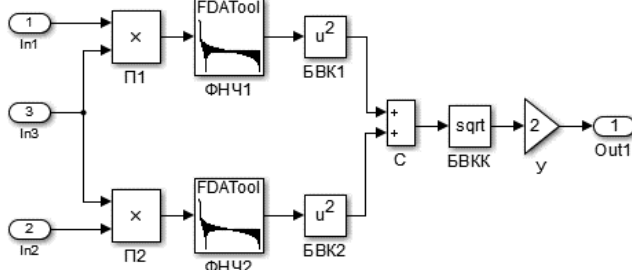


Рис. 9. Блок-схема имитационной модели КК с усилителем

емника. Это вызывает снижение порога принятия решения в РУ ниже уровня чувствительности КПКК и, как следствие, приводит к дроблению первого импульса в огибающей сигнала, а также к значительным отклонениям длительностей импульсов и интервалов кодового сигнала от номинальных величин. Соответственно возникает необходимость восстановить чувствительность приемника. Сделать это можно, если компенсировать снижение амплитуды выделенной в КК огибающей за счет добавления на выходе КК усилителя с коэффициентом усиления, равным двум. Полученная таким образом блок-схема имитационной модели КК с усилителем (У) представлена на рис. 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительные результаты, полученные на имитационной модели корреляционного приемника с квадратурными каналами, показали, что в принципе он работоспособен. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку качества функционирования приемника при возмущающих воздействиях, таких как нестабильность частоты и фазы опорного генератора, помехи различного характера, а также на совершенствование алгоритма его работы и оптимизацию параметров отдельных функциональных узлов.

Результаты представленного в статье исследования могут быть использованы при разработке новых или усовершенствовании существующих микропроцессорных приемных устройств канала АЛСН.

Литература

1. Положение о порядке служебного расследования, учета и анализа сбоев в работе устройств автоматической локомотивной сигнализации и систем автоматического управления торможением поезда: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.05.2016 г. № 1011р. URL: https://base.garant.ru/71448318/#block_1000 (дата обращения: 09.02.2022).
2. Астрахан В. И., Зорин В. И., Кисельгоф Г. К. Унифицированное комплексное локомотивное устройство безопасности (КЛУБ-У). Москва : УМЦ ЖДТ, 2008. 177 с.
3. Микропроцессорный дешифратор АЛС ДКСВ-М : руководство по эксплуатации РЭ 36465-000-00 / ОАО «НИИАС». Москва, 2011. 56 с.
4. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте / Г. В. Горелов, А. Ф. Фомин, А. А. Волков, В. К. Котов. Москва : Транспорт, 2001. 415 с.
5. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. Москва : Радио и связь, 1983. 320 с.
6. Стефанова И. А. Моделирование систем телекоммуникаций в системе MATLAB + Simulink. Самара : Изд-во ПГУТИ, 2018. 112 с.
7. Юсупов Р. Р. Цифровое устройство обработки сигналов автоматической локомотивной сигнализации повышенной помехозащищенности: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара, 2003. 162 с.

Объем статьи 0,68 авторских листа

References

1. Statement on order of internal investigations, recording and analysis of failures in operation of devices of automatic cab signalling and the system for automatic control of train braking [Polozhenie o porядke sluzhebного rassledovaniya, ucheta i analiza sboev v rabote ustroystv avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii i sistem avtomaticheskogo upravleniya tormozheniem poezda]: approved by the Order of the JSC RZD dated 30.05.2016 No. 1011r. URL: https://base.garant.ru/71448318/#block_1000 (access date: 09.02.2022).
2. Astrakhan V. I., Zorin V. I., Kiselgof G. K. Unified complex locomotive safety device (KLUB-U) [Unifitsirovannoe kompleksnoe lokomotivnoe ustroystvo bezopasnosti (KLUB-U)]. Moscow : UMTs ZhDT, 2008. 177 p.
3. Microprocessor decoder ALS DKSV-M: operating manual RE 36465-000-00 [Mikroprotsessornyy deshifrator ALS DKSV-M : rukovodstvo po ekspluatatsii RE 36465-000-00] / JSC NIIAS. Moscow, 2011. 56 p.
4. Theory of signals transmission on railway transport [Teoriya peredachi signalov na zheleznodorozhnom transporte] / G. V. Gorelov, A. F. Fomin, A. A. Volkov, V. K. Kotov]. Moscow : Transport, 2001. 415 p.
5. Tikhonov V. I. Optimal reception of signals [Optimal'nyy priem signalov]. Moscow : Radio and communications, 1983. 320 p.
6. Stefanova I. A. Modeling of telecommunication systems in MATLAB + Simulink [Modelirovanie sistem telekommunikatsiy v sisteme MATLAB + Simulink]. Samara : Publishing House of PSUTI, 2018. 112 p.
7. Yusupov R. R. Digital device for processing of signals of automatic cab signalling with increased noise immunity [Tsifrovoe ustroystvo obrabotki signalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii povyshennoy pomekhozashchishhennosti] : PhD in Engineering Thesis. Samara, 2003. 162 p.

УДК 533.6.071.5

Алексей Алексеевич Локтев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Вадим Вадимович Королев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Ирина Викторовна Шишкина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Ольга Игоревна Поддаева, кандидат технических наук, доцент, заведующая Учебно-научно-производственной лабораторией аэродинамических и аэроакустических испытаний строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия,

Юлия Сергеевна Грибач, аспирант Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Alexey Alexeevich Loktev, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Vadim Vadimovich Korolev, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Irina Viktorovna Shishkina, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Olga Igorevna Poddaeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Educational, Scientific and Production Laboratory of Aerodynamic and Aeroacoustic Tests of Building Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,

Yuliya Sergeevna Gribach, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Study of river crossing of high-speed railway at aerodynamic influence

Аннотация

В статье рассмотрено влияние ветровой нагрузки на железнодорожный мост, входящий в состав высокоскоростной магистрали. Дано описание физического моделирования ветрового воздействия на уменьшенную модель моста с поездом в аэродинамической трубе. Приведены полученные данные безразмерных коэффициентов подъемной силы C_D и лобового сопротивления C_L . Сделан вывод об изменении коэффициентов аэродинамического сопротивления в зависимости от положения высокоскоростного поезда на мосту.

Ключевые слова: аэродинамика, ветровое воздействие, высокоскоростная железная дорога, мостовые сооружения, экспериментальное моделирование, элементы инфраструктуры.

Abstract

High-speed traffic affects nearby infrastructure. The paper considers influence of wind load on a railway bridge that is a part of a high-speed railway. The paper presents a description of physical modeling of wind influence on the reduced bridge model with a train in a wind tunnel. The authors show gained data of dimensionless coefficients of lifting force C_D and front resistance C_L . As a result, the authors have made a conclusion on the change of aerodynamic resistance coefficients according to location of a high-speed train on the bridge.

Keywords: aerodynamics, wind influence, high-speed railway, bridge constructions, experimental modeling, infrastructure elements.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-55-59

Развитие и эксплуатация высокоскоростных магистралей (ВСМ) является сегодня одним из актуальных направлений [1]. Согласно проекту «Программа организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения Российской Федерации» до 2030 г., предусмотрено создание ряда железнодорожных маршрутов высокоскоростного типа, которые соединят с Москвой такие города, как Санкт-Петербург, Екатеринбург, Адлер [2].

Вместе с тем способность высокоскоростного железнодорожного транспорта превышать скорости движения 200 км/ч приводит к необходимости решать ряд сложных задач, связанных с обеспечением комфорта для пассажиров и с безопасностью поездов и объектов инфраструктуры: такое движение оказывает воздействие на расположенную рядом инфраструктуру (ограждения, тоннели, мосты и т.д.), а также на людей, находящихся на платформах, и пассажиров поезда [3].

К наиболее опасным объектам железнодорожной сети относятся мосты. Их конструкции являются плохо обтекаемыми: под воздействием потока воздуха за ними

образуются вихри. Чем больше и интенсивнее вихри, тем больше сила сопротивления моста ветровому потоку. В трудах М. И. Казакевича указано, что оценка аэродинамической нагрузки играет определяющую роль для обеспечения прочности и устойчивости сооружений [4].

Отсутствие достаточного количества данных для проектирования и расчета конструкций мостов на высокоскоростных магистралях вызывает необходимость исследовать поведение и изменение ветрового потока вблизи таких сооружений [5]. Согласно Градостроительному кодексу Российской Федерации, объекты капитального строительства инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования относятся к особо опасным, технически сложным и уникальным объектам, т.е. изучение ветрового воздействия на такие объекты должно подтверждаться экспериментально [6].

Нами проведены экспериментальные исследования, посвященные изменению воздействия ветрового потока на однопролетный железнодорожный мост арочного типа при различном положении высокоскоростного поезда на путях.

Основная задача заключалась в изучении влияния ветровой нагрузки на железнодорожный мост, входящий в состав ВСМ. Исследуемая конструкция представляла собой однопролетную металлическую арку с ездой понизу и с расчетным пролетом 55 м. Мост находился в кривых радиусом 800 м на переменном уклоне 5,6 ‰. В поперечном сечении арка состояла из двух коробчатых элементов, объединенных между собой распорками. Длина моста 300 м (рис. 1).

Исследование изменения воздействия ветрового потока на мостовые конструкции проводилось на базе малой аэродинамической трубы (МАДТ) в Учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета. В качестве модели принят концептуальный проект высокоскоростного поезда Vilago Rus+, максимальная скорость которого достигает 400 км/ч. Для эксперимента были изготовлены модели моста и поезда (рис. 2) в масштабе 1:210.

Были рассмотрены три ситуации: 1 — мостовая конструкция без поезда; 2 — поезд находится на мосту и занимает 1/2 часть железнодорожного пути моста; 3 — поезд находится на мосту и занимает всю длину железнодорожного пути моста.

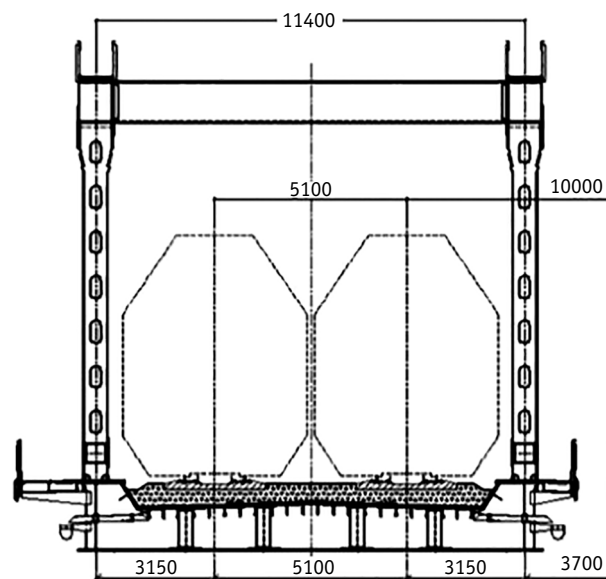


Рис. 1. Пролетное строение моста

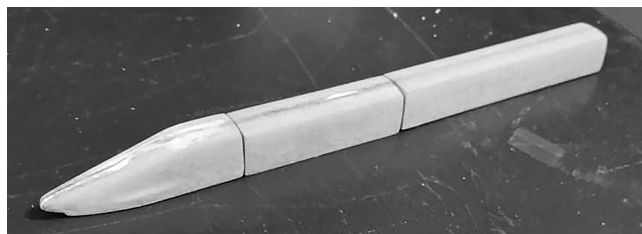


Рис. 2. Модель высокоскоростного поезда

Для получения значений аэродинамических сил и моментов на модели моста, возникающих от воздействия потока воздуха при различных расчетных ситуациях, использовались тензометрические весы [7], которые вместе с моделью прикрепляли к нижней плоскости рабочей части аэродинамической трубы. Модель размещали перпендикулярно направлению ветрового потока. После того как модель моста и весы были прикреплены к рабочей части трубы, устанавливали анемометр (рис. 3).

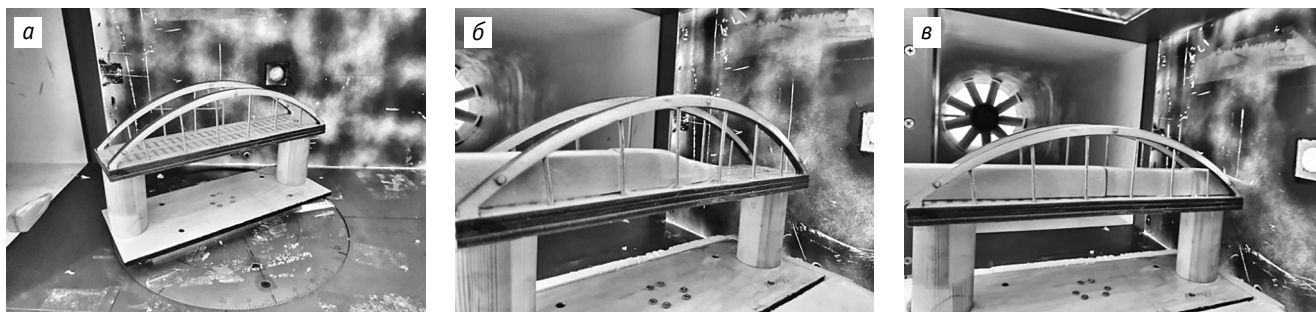


Рис. 3. Исследуемый объект в рабочей зоне для расчетных случаев:
а — № 1 (модель моста); б — № 2 (локомотив, занимающий 1/2 часть моста);
в — № 3 (локомотив и вагон, занимающие всю длину железнодорожного пути моста)



Первый обдув был выполнен с моделью моста без поезда (расчетный случай № 1). Запустив трубу, определяли скорость потока на первом шаге. После установления скорости потока производилась запись файлов с показаниями аэродинамических шестикомпонентных весов, которые передавали специальной системе обработки данных National Instruments значения сил и моментов. Показания записывались в течение 15–20 с. Далее мощность аэродинамической трубы постепенно повышалась на 5 %, что приводило к увеличению скорости потока воздуха, и процедура записи показаний повторялась. По завершении эксперимента на модель моста устанавливали закрепленную двусторонним скотчем модель поезда: локомотив, занимающий 1/2 часть моста (расчетный случай № 2), и локомотив, занимающий всю длину пути (расчетный случай № 3). Измерения проводили аналогичным образом, описанным выше.

Имитационное моделирование ветрового обтекания подвижного состава также имеет существенное значение. К тому же натурные эксперименты дорогостоящи и требуют изготовления опытного экземпляра модели или целого экипажа. Поэтому представляется перспективным заменить натуральный эксперимент численным и исследовать аэродинамику поезда на стадии проектирования [8]. Для этого необходимо подобрать математическую модель, а учитывая, что скорости движения экипажа невысоки по сравнению со скоростью звука и составляют примерно треть ее часть, то можно использовать модель несжимаемой жидкости.

Задача обтекания тела вращения (которое моделирует вагон подвижного состава) под нулевым углом атаки может быть решена с помощью метода конечных элементов. В таком случае она сводится к отысканию потенциала скорости $\Phi = \Phi(x_1, x_2, x_3)$ — гармонической функции вне обтекаемого тела T :

$$\Delta\Phi = 0; \tag{1}$$

$$\left. \frac{\partial\Phi}{\partial n} \right|_{\partial T} = 0; \tag{2}$$

$$\text{grad}\Phi \rightarrow \vec{V}_\infty \text{ при } |x| \rightarrow \infty, \tag{3}$$

где n — внутренняя нормаль к телу;

∂T — граница тела T ;

V_∞ — скорость потока в бесконечности;

$|x|$ — длина вектора (x_1, x_2, x_3) .

Можно предположить, что скорость на бесконечности $\vec{V}_\infty = (1, 0, 0)$.

Как окончательный выход алгоритма интересен не только потенциал скорости, но также давление и вектор скорости, особенно на поверхности обтекаемого тела. Давление можно определить по формуле, вытекающей из интеграла Бернулли:

$$p\rho^{-1} + \frac{1}{2}V^2 = p_\infty\rho^{-1} + \frac{1}{2}V_\infty^2, \quad \vec{V} = \text{grad}\Phi,$$

где p — давление на бесконечности;

ρ — плотность;

V, V_∞ — модули скорости.

При замене в уравнениях (1)–(3) $\Phi = x_1 - \Phi_1$ можно увидеть, что Φ гармонична в области $\Omega = R_3 \setminus T$:

$$\frac{\partial\Phi_1}{\partial n} = \cos(n, x_1); \tag{4}$$

$$\Phi_1 \rightarrow 0 \text{ при } |x| \rightarrow \infty. \tag{5}$$

Представлять подобную задачу удобнее с помощью криволинейной системы координат (r, θ, φ) , которая связана с традиционной следующими соотношениями:

$$x_1 = v(r, \theta)\cos\varphi; x_2 = v(r, \theta)\sin\varphi; x_3 = u(r, \theta). \tag{6}$$

Новую систему координат можно считать ортогональной, если выполняются условия Коши — Римана

$$\frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta}, \quad \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}.$$

В такой системе координат лапласиан скалярной функции может быть определен как

$$\Delta\Phi = \frac{r}{v\omega^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r v \frac{\partial\Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial\Phi}{\partial \theta} \right) \right] + \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2\Phi}{\partial\varphi^2},$$

$$\omega^2 = (\partial v / \partial \theta)^2 + (\partial u / \partial \theta)^2.$$

Если представить отдельный вагон подвижного состава в виде эллипсоида вращения

$$\frac{x_1^2}{b^2} + \frac{x_2^2}{b^2} + \frac{x_3^2}{a^2} - 1 = 0,$$

то можно использовать следующие соотношения для искомых величин:

$$u(r, \theta) = \frac{1}{2} \left((a-b)r + \frac{a+b}{r} \right) \cos\theta;$$

$$v(r, \theta) = \frac{1}{2} \left((a-b)r - \frac{a+b}{r} \right) \sin\theta;$$

$$\omega^2 = \frac{1}{4} \left((a-b)r + \frac{(a+b)^2}{r} \right)^2 \sin^2\theta +$$

$$+ \frac{1}{4} \left((a-b)r - \frac{(a+b)^2}{r} \right)^2 \cos^2\theta;$$

$$f_1(\theta, \varphi) = a \sin\theta \cos\varphi;$$

$$F(r, \theta, \varphi) = a \frac{r \cos\varphi}{\omega^2 v} \left[(b-a)\sin^2\theta + \frac{1}{2} \left((b-a)r + \frac{a+b}{r} \right) \cos^2\theta \right] + \frac{r \sin\theta \cos\varphi}{v^2}.$$

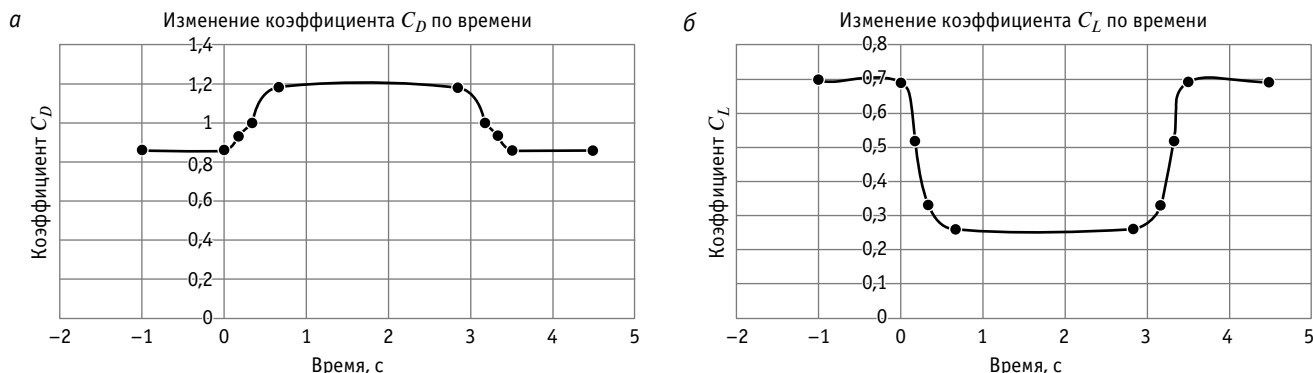


Рис. 4. Изменение коэффициентов сопротивления по времени: а — подъемной силы C_D ; б — лобового сопротивления C_L

Если параметр Φ_2 определен, то для эллипсоида имеет место равенство $\Phi = v(r, \theta) \cos \varphi - \Phi_1(r, \theta, \varphi)$.

Для дискретизации сформулированной краевой задачи необходимо дискретизировать дифференциальное уравнение, зависящее от параметра k

$$\frac{r}{v\omega^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(rv \frac{\partial \Phi_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial \Phi_2}{\partial \theta} \right) \right] - \frac{k^2}{v^2} \Phi_2, \quad k = 0, 1, \dots, L-1, \quad (7)$$

с учетом условий (4), (5), при этом m — число узлов сетки по r , n — число узлов сетки по θ .

Для дискретизации выражения (7) выберем по θ сетку, состоящую из n узлов:

$$\theta_v = \frac{\pi}{2} (x_v + 1), \quad x_v = \cos \chi_v, \quad \chi_v = \frac{(2v-1)\pi}{2n}, \quad v = 1, 2, \dots, n,$$

и применим интерполяционную формулу

$$f(\theta) = \sum_{v=1}^n \frac{T_n(x) f_v}{n \frac{(-1)^{v-1}}{\sin x_v} (x - x_v)}, \quad x = \frac{1}{\pi} (2\theta - \pi), \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow f_v = f(\theta_v), \quad v = 1, 2, \dots, n;$$

$$\Leftrightarrow \Leftrightarrow T_n(x) = \cos(n \arccos(x)).$$

Производные, входящие в (7), получим дифференцированием соотношения (8).

По r выбираем сетку, состоящую из m узлов:

$$r_v = \frac{1}{2} (y_v + 1), \quad y_v = \cos \alpha_v, \quad \alpha_v = \frac{(2v-1)\pi}{2m}, \quad v = 1, 2, \dots, m.$$

Оценку погрешности построенной дискретизации можно получить стандартными средствами. Для дискретизации предлагается использовать интерполяцию решения многочленами [9]. Такое представление увеличивает точность, если приближаемая функция соответствует большим условиям гладкости.

В результате эксперимента были получены средние значения сил и моментов для каждой рассматриваемой расчетной ситуации при различных скоростях потока воздуха. Для анализа воздействия ветрового потока на модели железнодорожного моста и высокоскоростного поезда вычислялись безразмерные коэффициенты подъемной силы C_D и лобового сопротивления C_L :

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho(T) u^2 A}; \quad C_L = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho(T) u^2 A},$$

где F_x, F_z — сила сопротивления, действующая на тело, Н; $\rho(T)$ — плотность воздуха (1,204 кг/м³ для температуры 20 °С);

A — площадь сечения модели моста (0,014277 м²).

Реальная ширина моста равна 15 м, время прохождения ветрового потока, перпендикулярного мосту, на скорости 15 м/с в несколько раз меньше, чем полное время прохождения поезда по мосту, поэтому его влияние на проходящий поезд будет существенным. Скорость поезда при прохождении по мосту учитывалась равной 300 км/ч. Общее время нахождения поезда на мосту 3,5 с. Определено, что при изменении положения модели поезда коэффициенты C_D и C_L значительно меняются (рис. 4).

Таким образом, по результатам исследования можно сделать вывод о том, что при изменении положения высокоскоростного поезда на мосту коэффициенты аэродинамического сопротивления значительно изменяются (более 30 %), следовательно, изменяется и значение ветровой нагрузки [10]. Неоднократные перепады коэффициентов сопротивления при изменении положения поезда могут вызывать в конструкциях железнодорожных мостов дополнительные нагрузки и напряжения, а также быть причиной возникновения опасных явлений аэродинамической неустойчивости типа резонанса, галопирования и пр. [3]. Поэтому, в связи с тем что конструкции моста гибкие и ветровое воздействие оказывает на них достаточно сильное влияние, уточнение аэродинамических коэффициентов может сыграть значительную роль для более надежного проектирования мостовых конструкций.

Литература

1. Комкова Н. В., Суворова А. А., Суворова С. Д. Векторы развития высокоскоростного железнодорожного транспорта в России // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. № 12–4 (51). С. 234–238. ISSN 2500–1000.
2. Перспективные конструкции мостовых переходов на транспортных магистралях / А. А. Локтев, В. В. Королев, Д. А. Локтев [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 6. С. 331–336. ISSN 2223–9731.
3. Космин В. В., Меркин В. Е. Аэродинамика движения высокоскоростных поездов в тоннеле: некоторые результаты проведенных в мире исследований // Метро и тоннели. 2021. № 1. С. 29–33. ISSN 1726–6165.
4. Казакевич М. И. Основы расчетов сооружений на ветровые воздействия : монография / 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во МИСИ-МГСУ, 2020. 190 с.
5. Особенности работы пролетного строения мостового перехода при смещении оси рельсошпальной решетки / В. В. Королев, А. А. Локтев, И. В. Шишкина, Е. А. Гридасова // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 3. С. 127–138. ISSN 2223–9731.
6. Локтев А. А., Королев В. В., Шишкина И. В. Особенности оценки состояния и поведения низководных мостов // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80. № 6. С. 334–342. ISSN 2223–9731.
7. Королев В. В. Моделирование стрелочных переводов на плитном основании // Наука и техника транспорта. 2019. № 3. С. 77–87. ISSN 2074–9325.
8. Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V. High Frequency Vibrations in the Elements of the Rolling Stock on the Railway Bridges // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032019>.
9. Perspective Constructions of Bridge Crossings on Transport Lines / A. Loktev, V. Korolev, I. Shishkina [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 209–218. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_20.
10. Designing a Single-Way Metal Crossing for Railway Transport / A. Loktev, V. Korolev, I. Shishkina [et al.] // Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_35.

Объем статьи 0,5 авторских листа

References

1. Komkova N. V., Suvorova A. A., Suvorova S. D. Features of development of high-speed railway transport in Russia [Vektory razvitiya vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta v Rossii] // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2020. Vol. 12–4 (51). Pp. 234–238. ISSN 2500–1000.
2. Perspective constructions of bridge overpasses on transport main lines [Perspektivnye konstruksii mostovykh perekhodov na transportnykh magistralyakh] / A. A. Loktev, V. V. Korolev, D. A. Loktev [et al.] // VNIIZhT Scientific Journal. 2018. Vol. 77. No. 6. Pp. 331–336. ISSN 2223–9731.
3. Cosmin V. V., Merkin V. E. Aerodynamics of high-speed trains in the tunnel: some results of the worldwide research [Aerodinamika dvizheniya vysokoskorostnykh poezdov v tonnele: nekotorye rezul'taty provedeniykh v mire issledovaniy] // Metro and tunnels. 2021. No. 1. Pp. 29–33. ISSN 1726–6165.
4. Kazakevich M. I. Basics of calculation of constructions on wind influence [Osnovy raschetov sooruzheniy na vetrovye vozdeystviya] : monograph / 2nd edition, revised and expanded. Moscow : Publishing House of MISI-MGSU, 2020. 190 p.
5. Features of the bridge span performance when shifting the axis of the rail-sleeper grid [Osobennosti raboty proletnogo stroeniya mostovogo perekhoda pri smeshhenii osi rel'soshpal'noy reshetki] / V. V. Korolev, A. A. Loktev, I. V. Shishkina, E. A. Gridasova // VNIIZhT Scientific Journal. 2020. Vol. 79. No. 3. Pp. 127–138. ISSN 2223–9731.
6. Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V. Features of assessing the condition and behavior of low-water bridges [Osobennosti otsenki sostoyaniya i povedeniya nizkovodnykh mostov] // VNIIZhT Scientific Journal. 2021. Vol. 80. No. 6. Pp. 334–342. ISSN 2223–9731.
7. Korolev V. V. Modelling of switches on the slab base [Modelirovanie strelochnykh perevodov na plitnom osnovanii] // Science and technology in transport. 2019. No. 3. Pp. 77–87. ISSN 2074–9325.
8. Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V. High Frequency Vibrations in the Elements of the Rolling Stock on the Railway Bridges // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032019>.
9. Perspective Constructions of Bridge Crossings on Transport Lines / A. Loktev, V. Korolev, I. Shishkina [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 209–218. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_20.
10. Designing a Single-Way Metal Crossing for Railway Transport / A. Loktev, V. Korolev, I. Shishkina [et al.] // Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_35.

УДК 62–144.3

Леонид Валерьевич Плотников, доктор технических наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,

Илья Александрович Калинин, аспирант кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,

Владимир Андреевич Следнев, бакалавр кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,

Владислав Александрович Шурупов, бакалавр кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВПУСКА С РАЗНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ КАНАЛА В ГОЛОВКЕ БЛОКА ЦИЛИНДРОВ В АВТОМОБИЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Leonid Valeryevich Plotnikov, DSc in Engineering, Professor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,

Ilya Alexandrovich Kalinin, postgraduate student, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,

Vladimir Andreevich Slednev, bachelor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,

Vladislav Alexandrovich Shurupov, bachelor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia

Gas dynamic analysis of admission process in automobile engine with various designs of channel in head of cylinder block

Аннотация

Поршневые двигатели остаются преобладающими силовыми установками для многих изделий транспортного машиностроения. Цель данной статьи заключается в исследовании структуры потоков воздуха во впускной системе и цилиндре автомобильного двигателя при разных конструкциях каналов в головке блока цилиндров на основе физико-математического моделирования. Результаты моделирования качественно подтверждаются экспериментальными данными термограмм, полученных с помощью метода тепловизуализирующей съемки. В статье приводится описание математической модели и методики проведения лабораторных опытов. Показано, что применение квадратных и треугольных каналов вызывает существенное изменение газодинамики потока в системе впуска, в частности, происходит формирование вихревых структур в профилированных каналах головки блока. Установлено, что использование профилированных каналов в системе впуска приводит к образованию крупномасштабной турбулентности в цилиндре двигателя. Совместное влияние указанных газодинамических явлений может незначительно снизить гидравлическое сопротивление в системе впуска, а также улучшить процессы смесеобразования и сгорания в цилиндре поршневого двигателя.

Ключевые слова: автомобильный двигатель, процесс впуска, канал в головке блока, качество газообмена, поля скоростей в цилиндре, математическое моделирование, верификация данных.

Abstract

Piston engines remain main power installation for many products of transport mechanical engineering. The aim of the paper is to study a structure of air flows in an admission system and a cylinder of an automobile engine at various designs of channels in a head of a cylinder block on the basis of physical and mathematical modeling. Results of modeling are qualitatively confirmed by experimental data of thermograms gained with the use of a thermal imaging photography method. The paper presents description of a mathematical model and a method of conducting laboratory experiments. The paper shows that the application of square and triangle channels leads to significant change of dynamics of flow in the admission system. In particular, in profiled channels of the cylinder head vortex structures are formed. It is established that the use of profiled channels in the admission system leads to large-scale turbulence in the engine cylinder. Common influence of mentioned gas dynamics phenomena may insignificantly decrease hydraulic resistance in the admission system and also may enhance processes of mixture formation and combustion in the cylinder of the piston engine.

Keywords: automobile engine, admission process, channel in cylinder head, gas exchange quality, velocity contour in cylinder, mathematical modeling, data verification.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-60-66

ВВЕДЕНИЕ

Очевидно, что сегодня поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС) остаются основными силовыми установками для многих изделий транспортного машиностроения, несмотря на попытки заменить их альтернативными источниками энергии (в частности, аккумуляторными батареями и электрическим приводом). Массовое применение ПДВС объясняется тем, что они обладают высокими удельными показателями и эффективностью, хорошими эксплуатационными качествами и технологичностью, а также достаточно автономны и мобильны [1]. При этом поршневые двигатели не исчерпали потенциал повышения технико-экономических и экологических характеристик, в том числе для автомобильного и грузового транспорта [2].

Один из эффективных способов улучшения показателей рабочего цикла заключается в совершенствовании процессов в системе газообмена ПДВС [3]. Например, модернизация конструкции впускной системы приводит к увеличению массового расхода рабочего тела через двигатель и/или улучшению процессов смесеобразования и сгорания за счет создания газодинамических явлений (закрутки потока, турбулентных и вихревых структур и др.) в цилиндре двигателя.

Рассмотрим современные научно-технические результаты по совершенствованию систем газообмена поршневых двигателей различного назначения. Наиболее распространенный способ улучшения эксплуатационных и экологических показателей ПДВС — это модернизация конструкции тех или иных деталей и узлов впускной и выпускной систем [4–7]. В частности, Darzi и др. [6] смогли повысить КПД двигателя на 8,3 % и увеличить мощность почти на 5 % путем доводки конфигурации систем газообмена с помощью искусственного интеллекта. Deng и др. [7] добились сокращения выбросов NOx в отработавших газах на 13 % за счет оптимизации процессов газообмена в роторном двигателе. Согласование режимов работы ПДВС и конструкции впускной системы также может улучшить технико-экономические показатели энергоустановки, как показано в [8–10]. Эта мера способна снизить удельный расход топлива до 4 %, повысить эффективную мощность до 7 % и значительно уменьшить концентрацию вредных веществ в отработавших газах. Особенно актуально совершенствование процесса впуска в гоночных автомобилях, когда массовое количество рабочего тела в цилиндре (качество наполнения цилиндра) определяет удельную мощность болида [11, 12]. Следует выделить исследования по созданию инновационных способов совершенствования процессов в системах газообмена на основе впрыска воды (во впускной коллектор или непосредственно в цилиндр) [13] или применение электромагнитных клапанов (для оперативного управления фазами газораспределения ПДВС) [14]. Отдельные направления исследований заключаются в изучении газодинамики и теплообмена потоков в основных элементах газозооного тракта поршневых двигателей с помощью математического моделирования или экспериментальных методов. Например, ученые оценивают влияние конструкции дроссельного узла на наполнение цилиндра [15, 16], определяют газодинамические и теплообменные

параметры потоков во впускной системе [17, 18] и распределение потока воздуха в цилиндре двигателя [19]. Эти работы направлены на подробное исследование структуры потоков и интенсивность теплообмена, что во многом определяет расходные характеристики двигателя, качество наполнения цилиндра и совершенство процессов смесеобразования и сгорания.

Таким образом, можно констатировать, что совершенствование рабочего цикла поршневого двигателя за счет модернизации систем газообмена приводит к существенному улучшению технико-экономических и экологических показателей ПДВС и остается актуальной задачей в развитии поршневого двигателестроения и транспортного машиностроения.

Цель данного исследования заключалась в изучении газодинамических явлений (структуры потоков воздуха) во впускной системе и цилиндре автомобильного двигателя при разных конфигурациях каналов в головке блока цилиндров (ГБЦ) на основе физико-математического моделирования. Эта работа является естественным продолжением исследований, результаты которых опубликованы в [20]. Отличия заключаются в том, что ранее изучалось влияние конструкции впускного коллектора на процесс наполнения цилиндра, а в данном случае — конфигурация каналов в ГБЦ.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для исследования газодинамики и структуры потоков при течи газа в системе впуска и цилиндре разработан ряд численных моделей на основе CFD-метода (Computational Fluid Dynamics). На рис. 1 показаны исследуемые конфигурации впускной системы ПДВС, имеющие разные формы каналов в ГБЦ (круг, квадрат и треугольник). Следует отметить, что седло клапана во всех случаях имело круглую форму, т.е. канал в ГБЦ плавно менял свою конфигурацию от квадрата или треугольника (впускное окно в головке блока) до круга (седло клапана). Диаметр базового (круглого) окна в ГБЦ равнялся 32 мм, а посадочный диаметр впускного клапана — 30,5 мм. Геометрические размеры квадратного и треугольного канала выбирались исходя из равенства эквивалентных гидравлических диаметров для всех конструкций, т.е. сторона квадратного окна составляла 32, треугольного — 55 мм. Длина канала в ГБЦ равнялась 110 мм. Общая длина исследуемой впускной системы (канал и коллектор) составляла 260 мм. Диаметр цилиндра — 82 мм, его высота — 71 мм.

В математической модели рабочей средой был сухой воздух, двигающийся в турбулентном режиме со средней скоростью w от 10 до 100 м/с. Величина w задавалась как граничное условие на входе в модель, выход определялся давлением чуть ниже барометрического (0,085–0,09 МПа). Для моделирования турбулентного течения использовалась k - ϵ -модель турбулентности. Задача решалась в стационарной постановке.

Для верификации результатов моделирования проводились экспериментальные исследования наполнения цилиндра воздухом на основе метода тепловизиализирующей съемки (тепловизионная диагностика газовых потоков). Для этого была создана лабораторная установка (рис. 2).

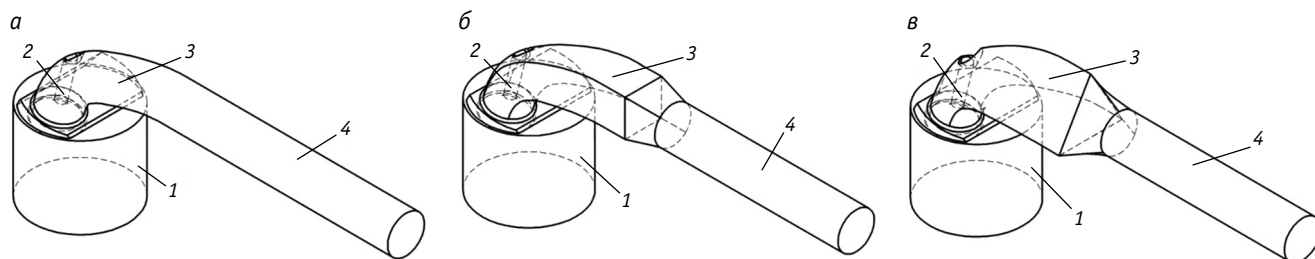


Рис. 1. Общий вид исследуемых систем впуска с круглым (а), квадратным (б) и треугольным (в) каналами в ГБЦ: 1 — цилиндр; 2 — клапан; 3 — канал в головке цилиндров; 4 — впускная труба

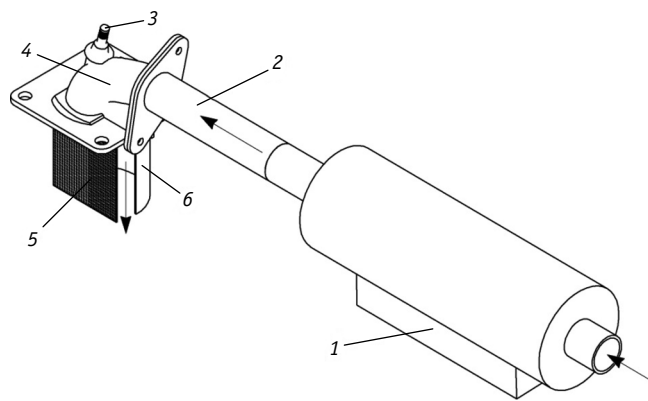


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки для исследования процесса заполнения цилиндра воздухом в автомобильном двигателе:

1 — нагреватель; 2 — впускная труба; 3 — впускной клапан; 4 — канал в головке блока цилиндров; 5 — сетка; 6 — цилиндр (стрелками показано направление движения воздуха в системе впуска)

Метод тепловизуализирующей съемки заключается в размещении тепловизуализирующей сетки из полимерных нитей в потоке и основан на анализе полей дисперсии температуры, получаемых с помощью тепловизионной съемки [21]. Соответственно для получения термограмм было необходимо предварительно нагревать воздух до температуры 60–70 °С с помощью канального нагревателя (см. рис. 2). При этом в цилиндре по оси впускного клапана размещалась сетка (с величиной ячеек около 1 мм), термограммы с которой использовались для сравнения с результатами численного моделирования. Тепловизуальная съемка проводилась с помощью тепловизора Testo 890–2. Следует подчеркнуть, что верификация осуществлялась для базовой впускной системы, имеющей круглые впускной коллектор и канал ГБЦ (геометрические размеры в математической модели и экспериментальной установке были идентичными).

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сравнение результатов моделирования (поле скоростей) и экспериментальных данных (термограммы) показано на рис. 3.

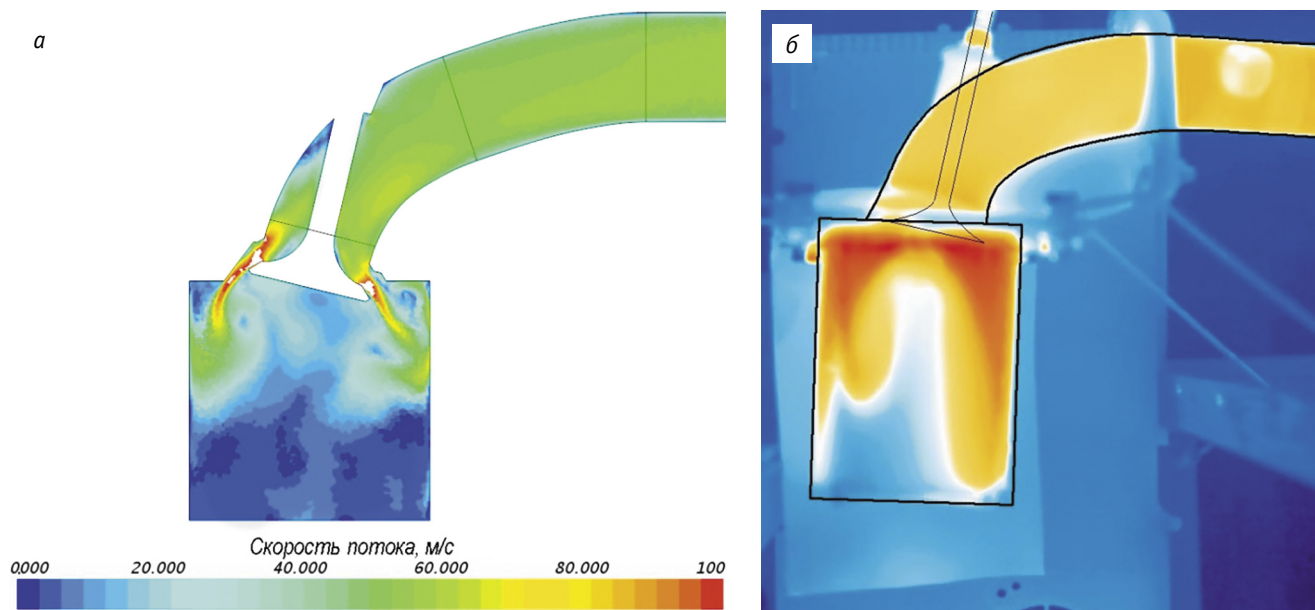


Рис. 3. Расчетное поле скоростей (а) и экспериментальная термограмма (б) процесса заполнения цилиндра воздухом через круглый канал в ГБЦ при начальной скорости потока 50 м/с

Из рис. 3 видно, что экспериментальные данные качественно подтверждают результаты моделирования. В частности, наблюдаются два ярко выраженных вихря в верхней части цилиндра на выходе потока из клапанной щели, которые затухают вниз по потоку, не воздействуя на течение в центре. Соответственно можно предположить, что разработанная математическая модель вполне достоверно прогнозирует течение воздуха и может быть использована для оценки влияния конструкции канала в ГБЦ на газодинамические характеристики в системе впуска и цилиндре двигателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Далее рассмотрим результаты физико-математического моделирования газодинамики в системе впуска и цилиндре поршневого двигателя. На рис. 4 показаны изображения изотопов и касательных векторов скорости потока в сечении, расположенном примерно в середине канала ГБЦ.

Из рис. 4а видно, что в базовой впускной системе при течении воздуха в канале наблюдается равномерное распределение касательных векторов скорости по всему сечению без образования вихревых структур, а изотопы скорости имеют овальную форму со смещением к изгибу канала. В свою очередь, при течении потока через профилированные каналы в ГБЦ появляются ярко выраженные вихревые структуры вблизи углов квадрата и треугольника. При этом максимальные изотопы скорости в профилированных каналах имеют меньшую величину по сравнению с базовой впускной системой, что свидетельствует о более равномерном распределении потока по сечению. Соответственно можно констатировать, что применение квадратного и треугольного каналов в ГБЦ оказывает заметное влияние на газодинамику и структуру потока в системе впуска.

На рис. 5 также показаны изображения изотопов и касательных векторов скорости потока в сечении, расположенном вблизи клапана, для впускных систем с разными конфигурациями каналов ГБЦ.

Как видно из рис. 5, касательные вектора скорости в рассматриваемом сечении имеют практически идентичное распределение при всех конфигурациях канала, что свидетельствует о снижении интенсивности вихревых структур. Однако изотопы скорости и их величины существенно видоизменяются в зависимости от конфигурации канала ГБЦ. Так, базовая впускная система имеет выраженные изотопы сверху и снизу сечения справа от стержня клапана, в которых значения скорости достигают 33 м/с (рис. 5а). В то же время в профилированных каналах распределение изотопов по сечению более равномерное и максимальные величины скорости не превышают 28 м/с (рис. 5б и 5в). Потенциально это указывает на то, что профилированные каналы будут иметь меньшие значения гидравлического сопротивления, а соответственно и лучшие расходные характеристики по сравнению с базовой впускной системой.

Влияние профилирования каналов в ГБЦ на поля скоростей потока в продольном сечении цилиндра (по оси впускного клапана) можно проследить по рис. 6, из которого видно, что применение квадратного канала не оказывает заметного

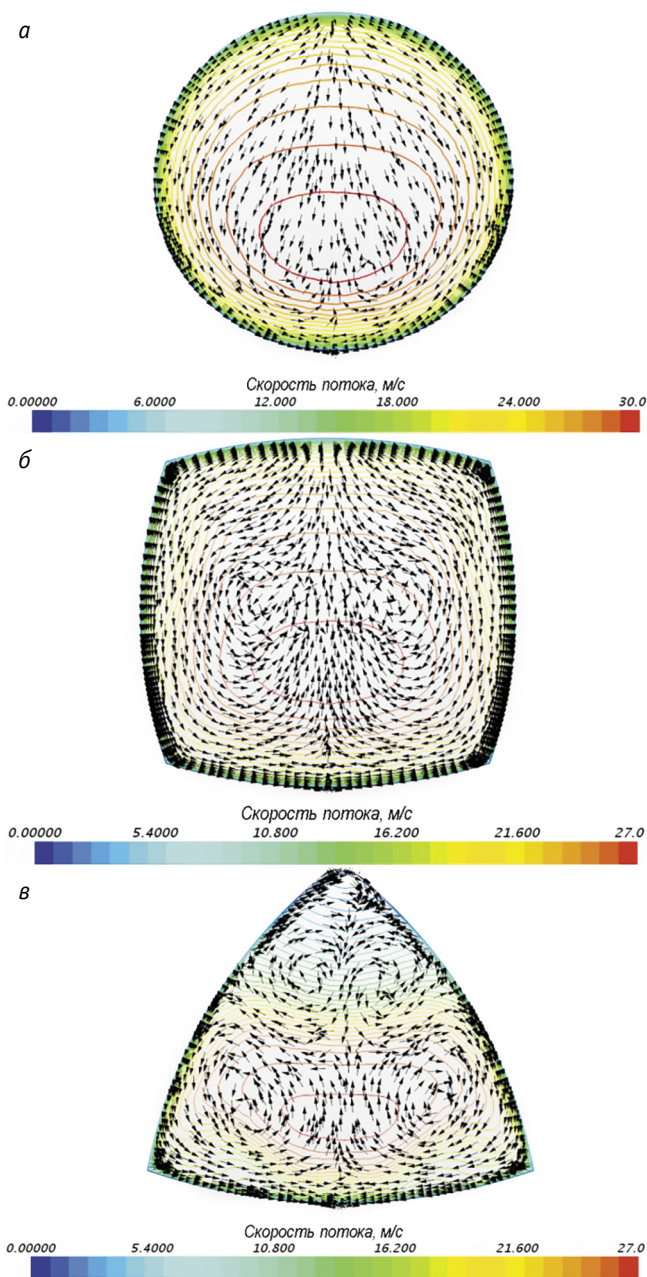


Рис. 4. Изображения касательных векторов и изотопах скорости потока воздуха в каналах ГБЦ, имеющих разное поперечное сечение (а — круг, б — квадрат, в — треугольник), при начальной скорости потока 25 м/с

влияния на поле скоростей в цилиндре ПДВС. В обоих случаях (круглый канал и квадратный) наблюдаются максимальные скорости потока в клапанной щели, в правом верхнем углу цилиндра образуется застойная зона, распределения поля скоростей в центре идентичны (рис. 6а, б). Незначительные изменения в поле скоростей имеют место при использовании треугольного канала ГБЦ в системе впуска (рис. 6в): застойная зона в углу цилиндра существенно уменьшается, видоизменяется поле скоростей в центре цилиндра и вблизи тарелки клапана.

Структура потока в поперечном сечении цилиндра для системы впуска с разными каналами ГБЦ показана на рис. 7. Из сравнения рис. 7а и 7в видно, что применение треугольного канала в ГБЦ приводит к существенному изменению структуры потока внутри цилиндра. Следует отметить, что максимальные значения изотак скорости в треугольной системе впуска

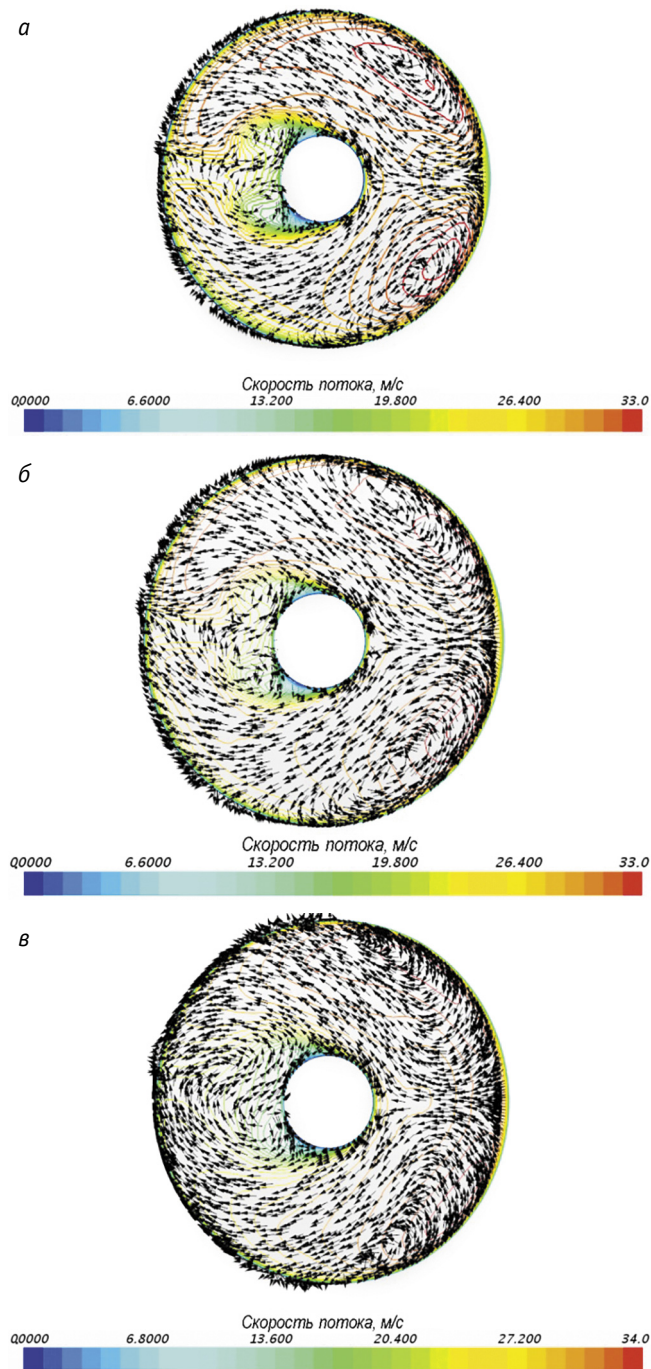


Рис. 5. Изображения касательных векторов и изотак скорости потока воздуха вблизи клапанной щели в системе впуска с каналами разного поперечного сечения (а — круг, б — квадрат, в — треугольник) в ГБЦ при начальной скорости потока 25 м/с

не превышают 30 м/с по сравнению с 41–43 м/с в системах с квадратным и круглым каналом. При этом касательные вектора скорости в цилиндре с треугольным каналом имеют более динамичное распространение по рассматриваемому сечению. Указанные факторы означают формирование крупномасштабной турбулентности в цилиндре, что потенциально окажет положительное влияние на процесс смесеобразования топливно-воздушной смеси в ПДВС.

ВЫВОДЫ

1. На основе CFD-метода разработаны математические модели для исследования системы впуска с каналами в головке блока, имеющими разные поперечные сечения (круг, квадрат, треугольник).

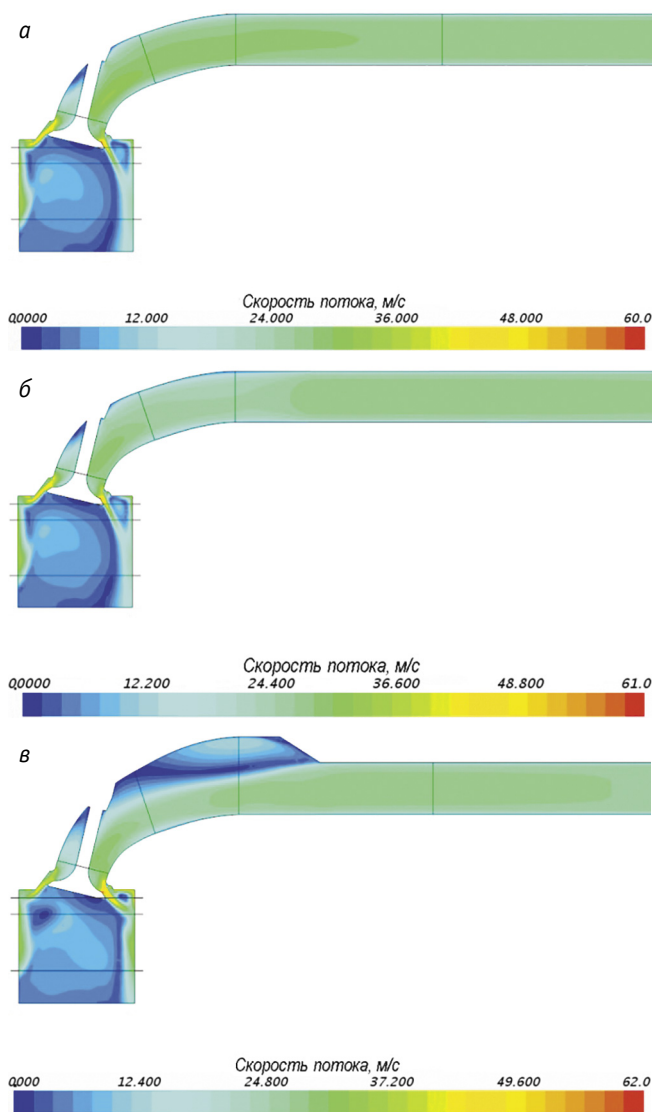
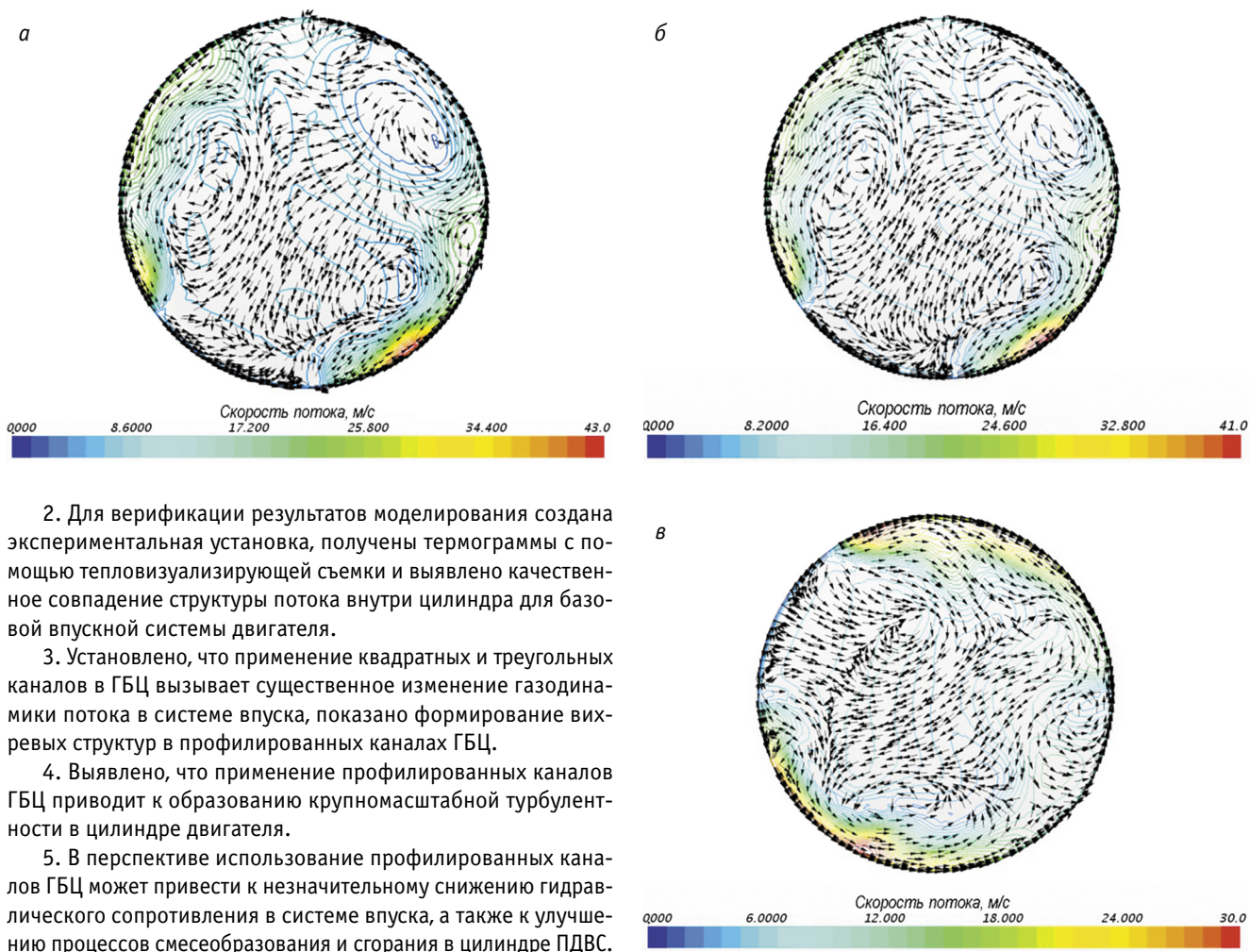


Рис. 6. Изображение поля скоростей потока воздуха в системе впуска автомобильного двигателя с каналами разного поперечного сечения (а — круг, б — квадрат, в — треугольник) в ГБЦ при начальной скорости потока 25 м/с



2. Для верификации результатов моделирования создана экспериментальная установка, получены термограммы с помощью тепловизуализирующей съемки и выявлено качественное совпадение структуры потока внутри цилиндра для базовой впускной системы двигателя.

3. Установлено, что применение квадратных и треугольных каналов в ГБЦ вызывает существенное изменение газодинамики потока в системе впуска, показано формирование вихревых структур в профилированных каналах ГБЦ.

4. Выявлено, что применение профилированных каналов ГБЦ приводит к образованию крупномасштабной турбулентности в цилиндре двигателя.

5. В перспективе использование профилированных каналов ГБЦ может привести к незначительному снижению гидравлического сопротивления в системе впуска, а также к улучшению процессов смесеобразования и сгорания в цилиндре ПДВС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Рис. 7. Изображение касательных векторов и изотоп скорости потока в продольном сечении цилиндра, заполняемого воздухом через каналы разного поперечного сечения (а — круг, б — квадрат, в — треугольник) в ГБЦ, при начальной скорости потока 25 м/с

Литература

1. Кавтарадзе Р. З. Развитие теории рабочих процессов ДВС в МГТУ им. Н. Э. Баумана: от метода Гриневецкого до современных 3D-моделей // Двигателестроение. 2020. № 1 (279). С. 3–9. ISSN 0202–1633.
2. IJER editorial: The future of the internal combustion engine / R. D. Reitz, H. Ogawa, R. Payri [et al.] // International Journal of Engine Research. 2020. Vol. 21 (1). Pp. 3–10.
3. Плотников Л. В. Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом : монография / Под общ. ред. Б. П. Жилкина, Ю. М. Бродова. Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2020. 204 с.
4. The effect of crankshaft phasing and port timing asymmetry on opposed-piston engine thermal efficiency / A. G. Young, A. W. Costall, D. Coren, J. W. G. Turner // Energies. 2021. Vol. 14 (20). 6696.

References

1. Kavtaradze R. Z. Development of combustion theory in Bauman Technical University: from Grinevetsky method to modern 3D-models (Continuation) [Razvitie teorii rabochikh protsessov DVS v MGTU im. N. E. Baumana: ot metoda Grinevetskogo do sovremennykh 3D-modeley (Okonchanie)] // Engines construction. 2020. No. 1 (279). Pp. 3–9. ISSN 0202–1633.
2. IJER editorial: The future of the internal combustion engine / R. D. Reitz, H. Ogawa, R. Payri [et al.] // International Journal of Engine Research. 2020. Vol. 21 (1). Pp. 3–10.
3. Plotnikov L. V. Non-steady thermal and mechanical processes in systems of gas exchange in piston engines with turbocharging [Nestatsionarnye teplomekhanicheskie protsessy v sistemakh gazoobmena porshnevnykh dvigateley s turbonadduvom] : monograph / Ed. by B. P. Zhilkin, Yu. M. Brodov. Ekaterinburg : Publishing House of Urfu, 2020. 204 p.
4. The effect of crankshaft phasing and port timing asymmetry on opposed-piston engine thermal efficiency / A. G. Young, A. W. Costall, D. Coren, J. W. G. Turner // Energies. 2021. Vol. 14 (20). 6696.

5. Булаев В. Г. Перспективные системы очистки отработавших газов тепловозных дизелей // Транспорт Урала. 2019. № 3 (62). С. 68–73. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-68-73. ISSN 1815–9400.
6. Darzi M., Zamani Meymian N., Johnson D. Energy optimization of a micro-CHP engine using 1-D and 3-D modeling // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 191. 116904.
7. Influence of Intake Pipe Deflection Angle on In-Cylinder Flow and Combustion Characteristics of a Rotary Engine / X. Deng, Z. Feng, J. Lei [et al.] // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2022. Vol. 144 (8). 082302.
8. Numerical study on prediction of icing phenomena in intake system of diesel engine: Operating conditions with low-to-middle velocity of inlet air / W. Yoon, J. Kim, C. Chung, J. Park // Energy. 2022. Vol. 248. 123569.
9. Plotnikov L. V., Bernasconi S., Brodov Yu. M. The effects of the intake pipe configuration on gas exchange, and technical and economic indicators of diesel engine with the 21/21 dimension // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 140–145.
10. Шароглазов Б. А., Машков О. Г., Мартынов А. А. Оценка параметров агрегата турбонаддува поршневого транспортного двигателя на базе безмоторных испытаний // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 74–78. ISSN 1815–9400.
11. Мохамед Б., Кароли Я., Зеленцов А. А. Трехмерное моделирование течения газа во впускной системе автомобиля «Формулы студент» // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 13. № 5. С. 597–610. ISSN 1999–494X.
12. Chen L., Guo Y., Jin N. Optimization Design of the Intake System Based on an Engine for FSC // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022. Vol. 769. Pp. 165–184.
13. Infrared Experimental Investigations of the Effects of Direct Water Injection in an Optical Engine / A. Farhat, T. Kim, M.-C. Lai [et al.] // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2022. Vol. 144 (8). 082303.
14. Effects of variable valve timing on the air flow parameters in an electromechanical valve mechanism — A cfd study / U. Demir, G. Coskun, H. S. Soyhan [et al.] // Fuel. 2022. Vol. 308. 121956.
15. Жолобов Л., Суворов Е. Аэродинамические исследования впускной системы бензинового двигателя // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. С. 4. ISSN 2070–7428.
16. Simulation of a three-dimensional model of the intake system of an agricultural tractor engine / L. A. Zholobov, A. V. Pasin, A. I. Novozhilov, M. P. Korobkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 839 (4). 042066.
17. Экспериментальное исследование газодинамических процессов в системе впуска поршневого ДВС / Б. П. Жилкин, Л. В. Плотников, С. А. Корж, И. Д. Ларионов // Двигателестроение. 2009. № 1 (235). С. 24–27. ISSN 0202–1633.
18. Федотов А. И., Федоров А. Л. Моделирование пульсаций давления во впускном коллекторе автомобильного ДВС при изменении настройки ГРМ // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 9 (56). С. 116–124. ISSN 1814–3520.
19. Wahono B., Setiawan A., Lim O. Effect of the intake port flow direction on the stability and characteristics of the in-cylinder flow field of a small motorcycle engine // Applied Energy. 2021. Vol. 288. 116659.
20. Плотников Л. В., Неволин А. М., Мисник М. О. Газодинамическое совершенствование системы впуска автомобильного двигателя за счет поперечного профилирования каналов // Транспорт Урала. 2017. № 3 (54). С. 82–86. DOI: 10.2291/1815-9400-2017-3-82-86. ISSN 1815–9400.
21. Zhilkin B. P., Larionov I. D., Shuba A. N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // Instruments and Experimental Techniques. 2004. Vol. 47. Pp. 545–547.
5. Bulaev V. G. Perspective exhaust fumes control systems of locomotive-type diesel engines [Perspektivnye sistemy ochistki otrabotavshikh gazov teplovoznykh dizeley] // Transport of the Urals. 2019. No. 3 (62). Pp. 68–73. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-68-73. ISSN 1815–9400.
6. Darzi M., Zamani Meymian N., Johnson D. Energy optimization of a micro-CHP engine using 1-D and 3-D modeling // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 191. 116904.
7. Influence of Intake Pipe Deflection Angle on In-Cylinder Flow and Combustion Characteristics of a Rotary Engine / X. Deng, Z. Feng, J. Lei [et al.] // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2022. Vol. 144 (8). 082302.
8. Numerical study on prediction of icing phenomena in intake system of diesel engine: Operating conditions with low-to-middle velocity of inlet air / W. Yoon, J. Kim, C. Chung, J. Park // Energy. 2022. Vol. 248. 123569.
9. Plotnikov L. V., Bernasconi S., Brodov Yu. M. The effects of the intake pipe configuration on gas exchange, and technical and economic indicators of diesel engine with the 21/21 dimension // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 140–145.
10. Sharoglazov B. A., Mashkov O. G., Martynov A. A. Evaluation of turbocharging unit parameters in a piston vehicle engine through motorless tests [Otsenka parametrov agregata turbonadduva porshneвого транспортного dvigatelya na baze bezmotornykh ispytaniy] // Transport of the Urals. 2015. No. 3 (46). Pp. 74–78. ISSN 1815–9400.
11. Mohamad B., Karoly J., Zelentsov A. A. 3D simulation of gas flow into the formula student car intake system [Trehmernoe modelirovanie techeniya gaza vo vpusknoy sisteme avtomobilya «Formuly student»] // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2020. Vol. 13. No. 5. Pp. 597–610. ISSN 1999–494X.
12. Chen L., Guo Y., Jin N. Optimization Design of the Intake System Based on an Engine for FSC // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022. Vol. 769. Pp. 165–184.
13. Infrared Experimental Investigations of the Effects of Direct Water Injection in an Optical Engine / A. Farhat, T. Kim, M.-C. Lai [et al.] // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2022. Vol. 144 (8). 082303.
14. Effects of variable valve timing on the air flow parameters in an electromechanical valve mechanism — A cfd study / U. Demir, G. Coskun, H. S. Soyhan [et al.] // Fuel. 2022. Vol. 308. 121956.
15. Zholobov L., Suvorov E. Aerodynamic probes of inlet system of the gasoline engine [Aerodinamicheskie issledovaniya vpusknoy sistemy benzinovogo dvigatelya] // Modern Problems of Science and Education. 2013. No. 3. P. 4. ISSN 2070–7428.
16. Simulation of a three-dimensional model of the intake system of an agricultural tractor engine / L. A. Zholobov, A. V. Pasin, A. I. Novozhilov, M. P. Korobkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 839 (4). 042066.
17. Gas-Dynamic Processes in Engine Air Inlet Duct [Eksperimental'noe issledovanie gazodinamicheskikh protsessov v sisteme vpuska porshneвого DVS] / B. P. Zhilkin, L. V. Plotnikov, S. A. Korzh, I. D. Larionov // Engines construction. 2009. No. 1 (235). Pp. 24–27. ISSN 0202–1633.
18. Fedotov A. I., Fedorov A. L. Simulation of pressure pulsations in the intake manifold of the automobile internal combustion engine under the change of the gas distribution mechanism setting [Modelirovanie pul'satsiy davleniya vo vpusknom kollektore avtomobil'nogo DVS pri izmenenii nastroyki GRM] // Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2011. No. 9 (56). Pp. 116–124. ISSN 1814–3520.
19. Wahono B., Setiawan A., Lim O. Effect of the intake port flow direction on the stability and characteristics of the in-cylinder flow field of a small motorcycle engine // Applied Energy. 2021. Vol. 288. 116659.
20. Plotnikov L. V., Nevolin A. M., Misenik M. O. Gas dynamics modernization of intake system of automobile engine by transverse profiling of channels [Gazodinamicheskoe sovershenstvovanie sistemy vpuska avtomobil'nogo dvigatelya za schet poperechnogo profilirovaniya kanalov] // Transport of the Urals. 2017. No. 3 (54). Pp. 82–86. DOI: 10.2291/1815-9400-2017-3-82-86. ISSN 1815–9400.
21. Zhilkin B. P., Larionov I. D., Shuba A. N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // Instruments and Experimental Techniques. 2004. Vol. 47. Pp. 545–547.

Объем статьи 0,97 авторских листа

УДК 621.5

Николай Владимирович Буланов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Екатерина Ивановна Авксентьева, старший преподаватель кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Виктор Григорьевич Бондаренко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОРБЦИОННЫХ КОНДИЦИОНЕРОВ НА АВТОМОБИЛЯХ С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Nikolay Vladimirovich Bulanov, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Ekaterina Ivanovna Avksentyeva, Senior Lecturer, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Viktor Grigoryevich Bondarenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Use of sorption conditioners on automobiles with internal combustion engines

Аннотация

Применение известных компрессионных холодильных машин на автомобилях с двигателями внутреннего сгорания не является эффективным решением проблемы кондиционирования воздуха с энергетической точки зрения, так как в этих двигателях безвозвратно теряется большое количество тепловой энергии, что связано с ее выбросом в окружающую среду в виде горячих выхлопных газов. Вместе с тем использование тепловой энергии выхлопных газов для кондиционирования воздуха при помощи адсорбционных и абсорбционных кондиционеров, безусловно, позволит повысить энергетическую эффективность транспортного средства и сэкономить топливо.

Ключевые слова: кондиционер, холодильная машина, аммиак, адсорбция, абсорбция.

Abstract

The use of known compression refrigerating machines on automobiles with internal combustion engines isn't an efficient solution of a problem of air conditioning from the point of view of energy efficiency because such engines irrevocably lose much thermal energy that is connected with its discharge to the environment in the form of hot exhaust gas. However, the use of thermal energy of exhaust gas for air conditioning with the application of adsorption and absorption conditioners will increase energy efficiency of vehicles and save fuel.

Keywords: conditioner, refrigerating machine, ammonia, adsorption, absorption.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-67-72

ВВЕДЕНИЕ

Практически весь автомобильный транспорт оборудован кондиционерами. Для их работы требуется энергия, которая либо непосредственно в виде механической энергии отбирается от коленчатого вала автомобиля и отдается на работу кондиционера, либо вначале расходуется на зарядку аккумуляторных батарей автомобиля и только потом расходуется на работу того же кондиционера.

Однако при работе бензиновых, дизельных или газотурбинных двигателей, т.е. всех видов тепловых машин, всегда выделяется большое количество тепловой энергии, которая безвозвратно выбрасывается в окружающую среду в виде нагретых выхлопных газов. Эту энергию можно направить на кондиционирование воздуха в салоне или кабине автомобиля при помощи сорбционных холодильных машин. Их конструкция известна давно, и применяются они в разных отраслях техники [1–11], но в автомобилестроении до настоящего времени не использовались, что было связано, в частности, с их громоздкостью. Однако последние успехи в материаловедении позволяют применять сорбционные кондиционеры и на автомобильном транспорте.

Предложены, но пока не внедрены в производство два типа кондиционеров, способных осуществлять такую работу, — адсорбционные [12, 13] и абсорбционные [14–16].

УСТРОЙСТВО АДСОРБЦИОННОГО КОНДИЦИОНЕРА

Рассмотрим устройство и принцип действия адсорбционного кондиционера [12, 13]. Его схема (рис. 1) включает следующие основные узлы: генератор-адсорбер пара 1, заполненный гранулами адсорбента (например, гранулами силикагеля); конденсатор пара 2; ресивер 3; испаритель (холодильная камера) 4; хладагент в газообразном, жидком или адсорбированном состоянии. Отметим, что генератор-адсорбер 1 в зависимости от ситуации представляет собой либо генератор, либо адсорбер пара и может в одном случае нагреваться выхлопными газами автомобиля, а во втором — охлаждаться потоком окружающего воздуха; через конденсатор 2 может прокачиваться поток окружающего воздуха, а при помощи холодильной камеры (испарителя) 4 воздух в салоне автомобиля охлаждается до нужной температуры.

Кондиционер работает следующим образом. Из любого произвольного состояния, в котором он может находиться после очередной остановки, кондиционер переводится в исходное состояние. Для этого через генератор-адсорбер 1, который в данном случае является генератором пара, пропускают выхлопные газы автомобиля. Если гранулы адсорбента, заполняющие объем 1, содержат хладагент, то при их нагревании хладагент десорбируется, т.е. испаряется, а образовавшиеся пары поступают в конденсатор 2, где конденсируются за счет охлаждения потоком окружающего воздуха. Далее образующийся жидкий хладагент скапливается в ресивере 3 и стекает в испаритель 4. На этом завершается первый подготовительный этап работы кондиционера, и он переводится на второй, основной, этап. Кондиционер рассчитывается так, чтобы первый этап работы был по времени короче второго.

Второй, рабочий, этап осуществляется следующим образом. Горячие выхлопные газовые потоки, до рассматриваемого момента проходившие через генератор-адсорбер пара 1, заменяют потоком окружающего атмосферного воздуха. Гранулы адсорбента 1 охлаждаются до температуры, примерно равной температуре окружающей среды, и начинают поглощать окружающие их пары хладагента. В этом случае устройство 1 работает как адсорбер паров хладагента. Давление во всех полостях кондиционера понижается, и хладагент начинает испаряться в испарителе (холодильной камере) 4. На испарение жидкого хладагента требуется большое количество теплоты, которая отбирается от кондиционируемого воздуха, прокачиваемого через упомянутый испаритель 4.

Заметим также, что в адсорбере 1 при поглощении пара гранулами адсорбента выделяется большое количество теплоты, которое уносится потоком окружающего воздуха, как показано на рис. 1.

Кондиционер способен охлаждать воздух в салоне автомобиля до тех пор, пока гранулы адсорбента не заполнятся хладагентом до своего насыщения. После этого кондиционер необходимо вернуть в исходное состояние.

Таким образом, из вышесказанного можно сделать вывод, что недостатком адсорбционного кондиционера является периодичность его работы. Для непрерывного охлаждения воздуха необходимо иметь как минимум два рассмотренных устройства, что усложняет конструкцию кондиционера.

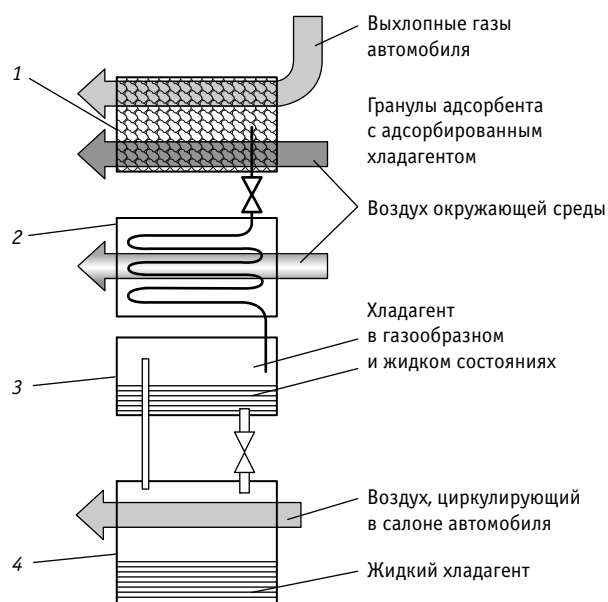


Рис. 1. Схема адсорбционной холодильной машины:
1 — генератор-адсорбер; 2 — конденсатор; 3 — ресивер;
4 — испаритель — холодильная камера

Разрешить эту проблему позволяет использование абсорбционного кондиционера.

УСТРОЙСТВО АБСОРБЦИОННОГО КОНДИЦИОНЕРА

Нами разработана принципиальная схема абсорбционного кондиционера [14, 15], который не будет потреблять никакой дополнительной энергии, кроме тепловой энергии выхлопных газов автомобиля (рис. 2).

Основными узлами кондиционера являются: генератор пара 1, конденсатор 2, испаритель 5, абсорбер 7, соединительные трубки и рабочее тело. Для повышения эффективности работы кондиционера в него добавлены насос 9, регулирующие вентили 4 и 10 и рекуперативный теплообменник 11. Соединение всех элементов кондиционера осуществляется трубками в последовательности, показанной на рис. 2. Генератор 1 непосредственно, как на рис. 2, или иным способом может нагреваться потоком выхлопных газов автомобиля 12. Конденсатор 2 и абсорбер 7 охлаждаются потоками окружающего воздуха 3 и 8, создаваемыми, например, вентилятором автомобиля. Кондиционируемый воздух *б* салона автомобиля охлаждается в испарителе (холодильной камере) 5.

Основное достоинство абсорбционных кондиционеров по сравнению с адсорбционными заключается в более простой и менее затратной эксплуатации. Во-первых, это связано с тем, что абсорбционные кондиционеры не требуют периодического переключения одной части оборудования с холодильного режима работы на режим перезарядки, а другой части оборудования — в обратном направлении. И, во-вторых, в предлагаемых абсорбционных кондиционерах не нужна дополнительная тепловая энергия на нагрев части оборудования при каждой смене режима ее работы (смена холодильного режима работы на режим зарядки, затем режима зарядки на холодильный режим).

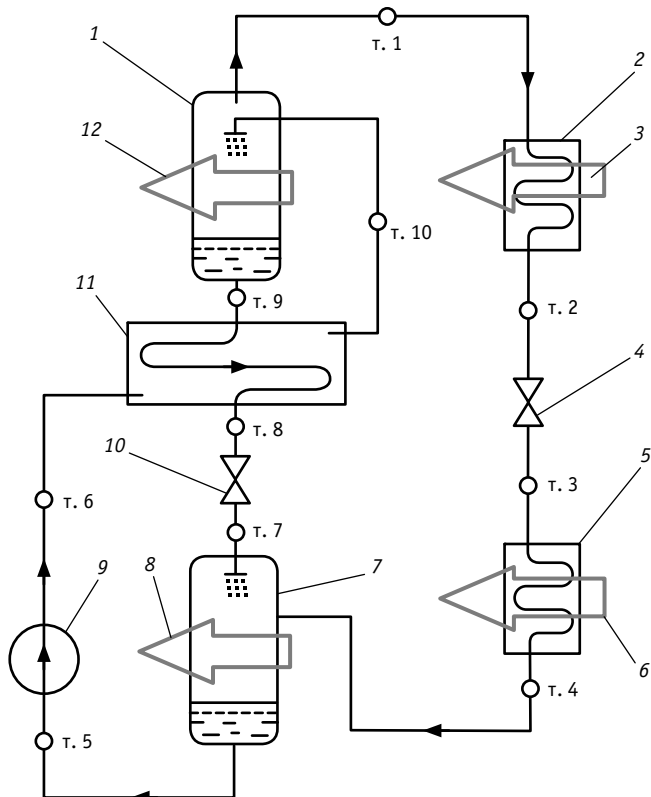


Рис. 2. Схема абсорбционного кондиционера:

1 — генератор пара; 2 — конденсатор; 3, 8 — поток воздуха окружающей среды; 4 — вентиль расхода хладагента; 5 — испаритель (холодильная камера); 6 — охлаждаемый воздух, направляемый в салон автомобиля; 7 — абсорбер; 9 — насос водоаммиачного раствора; 10 — регулирующий вентиль расхода вод аммиачного раствора; 11 — рекуперативный теплообменник; 12 — выхлопные газы автомобиля; т. 1–10 — контрольные точки

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ АБСОРБЦИОННОГО КОНДИЦИОНЕРА

Возможны различные варианты установки кондиционера на автомобиль, а следовательно, и различные условия его эксплуатации. Рассмотрим наиболее простой случай (см. рис. 2), когда потоки выхлопных газов 12 и окружающего воздуха 3 и 8 непрерывно нагревают или охлаждают соответствующие узлы кондиционера — генератор пара 1, конденсатор 2 и абсорбер 7. Рабочее состояние кондиционера от нерабочего в этом случае отличается только включенным или отключенным насосом 9 и соответственно уровнями давления в различных узлах кондиционера. Возможность устанавливать степень охлаждения воздуха в салоне автомобиля имеется всегда, она осуществляется при помощи вентиля 4 и 10, но реализуется только при работающем насосе 9.

Для включения кондиционера необходимо запустить насос 9, который подает водоаммиачный раствор из абсорбера 7 в генератор пара 1. В результате в генераторе 1 и конденсаторе 2 давление повышается до некоторого значения p_k (индекс «к» относит величину к температуре конденсации паров аммиака в конденсаторе 2). Выхлопные газы 12 нагревают ге-

нератор 1 и поступающий в него водоаммиачный раствор, последний нагревается до температуры кипения, а затем испаряется, но преимущественно испаряется его низкокипящая компонента — аммиак.

Образующийся газообразный аммиак (с примесью небольшого количества воды) поступает в конденсатор 2, а обогащенный водой водоаммиачный раствор (вода с небольшой примесью аммиака) через рекуперативный теплообменник 11 и регулирующий вентиль 10 возвращается в абсорбер 7.

Поступающий в конденсатор 2 пар конденсируется за счет охлаждения потоком окружающего воздуха 3. Образующийся жидкий аммиак (который всегда имеет незначительную примесь воды) через регулирующий вентиль 4 поступает в испаритель 5, где испаряется.

На испарение жидкости требуется большое количества тепла, это тепло отнимается от потока воздуха 6, который забирается из салона автомобиля и возвращается обратно. В результате воздух в салоне автомобиля охлаждается, а степень его охлаждения регулируется вентилем 4.

Образующийся в испарителе газообразный аммиак интенсивно поглощается (абсорбируется) в абсорбере 7 каплями распыленной воды, поступающей, как отмечалось выше, из генератора пара 1 через теплообменник 11 и вентиль 10. При абсорбции аммиака давление в абсорбере понижается, что способствует интенсификации процесса испарения в испарителе 5. В испарителе и абсорбере устанавливается давление, которое можно считать одинаковым и равным p_0 . Производительность кондиционера регулируется вентилем 10.

При абсорбции аммиака водой выделяется большое количество теплоты, которое отводится потоком окружающего воздуха 8.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА АБСОРБЦИОННОГО КОНДИЦИОНЕРА

Основные параметры кондиционера можно определить при помощи метода термодинамических циклов. Для проведения необходимых расчетов удобно представить циклы в таких координатах, как давление — объем ($p-v$) и концентрация — энтальпия ($\xi-i$) (рис. 3 и 4), где ξ — массовая концентрация аммиака в воде. Сложный цикл абсорбционного кондиционера можно представить в виде одновременной работы связанных между собой двух более простых циклов — прямого и обратного (см. рис. 3).

Охлаждение кондиционируемого воздуха осуществляется в обратном цикле (рис. 3а). Горячий насыщенный хладагент из генератора 1 под давлением p_k поступает в конденсатор пара 2, где конденсируется за счет охлаждения потоком воздуха 3. Отметим, что контрольные расчетные точки 1–10 на всех рисунках (рис. 2–4) обозначены одинаково, а процесс конденсации пара показан линиями 1–2 на рис. 3а и 4.

Далее аммиак проходит дроссельное устройство, выполненное в виде простого вентиля 4, при этом давление снижается до p_0 . Энтальпия при дросселировании рабочего тела остается постоянной, поэтому точки 2 и 3 на рис. 4 совпадают. Состояние рабочего тела (аммиака) в точке 3 представляет собой жидкость с малым количеством пара.

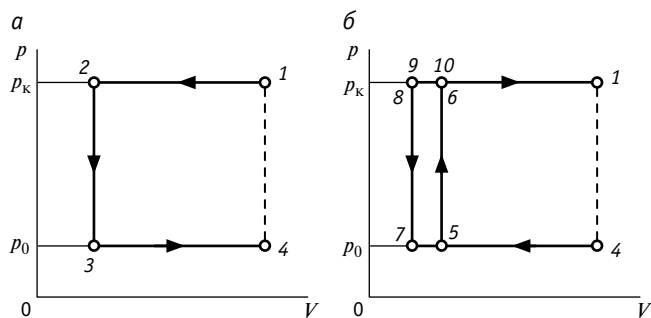


Рис. 3. Обратный (а) и прямой (б) циклы холодильной сорбционной машины

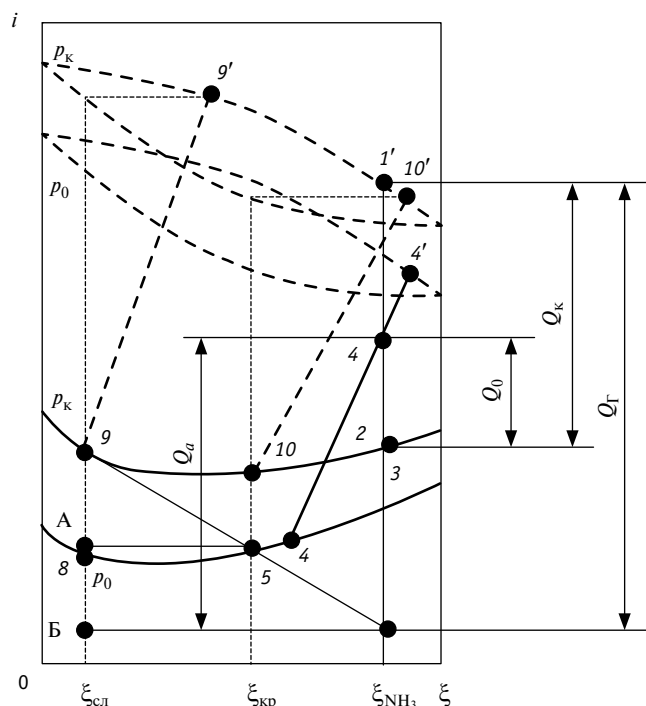


Рис. 4. ξ - i -диаграмма (обозначения те же, что на рис. 3)

Поскольку в испарителе давление $p_0 < p_k$, то аммиак интенсивно испаряется, охлаждая проходящий через испаритель воздух салона автомобиля б. На рис. 4 процесс испарения показан линиями 3–4,4' (верхний штрих относит величину к парообразному состоянию).

Если бы рассматривалась компрессионная холодильная машина, то образующийся пар (точка 4, см. рис. 3а) был бы сжат каким-либо компрессором до исходного давления p_k (точка 1). Этот возможный процесс изображен на рис. 3а штриховой линией 4–1, а работа, затраченная на кондиционирование, была бы равна площади полученного цикла 1–2–3–4.

В предлагаемом сорбционном кондиционере замыкание точки 4 с точкой 1 осуществляется при помощи прямого цикла (рис. 3б).

Пар, образующийся в испарителе, попадает в абсорбер и поглощается капельками воды, которая поступает из генератора

пара 1 через вентиль 10. Течение воды (точнее, слабого раствора аммиака) обеспечено перепадом давления $\Delta p = p_k - p_0$. На это требуется затратить некоторую энергию (площадь прямоугольника 5–10–9–7), но поскольку плотность воды и водных растворов аммиака близка по величине и значительно больше плотности газообразного аммиака, то работой на прокачивание жидкого раствора в кондиционере можно пренебречь по сравнению с общими затратами (площадь прямого цикла 4–7–9–1).

Перейдем к рассмотрению прямого цикла 4–7–9–1, при помощи которого замыкается обратный цикл 1–2–3–4.

Линия абсорбции аммиака (его растворения в воде) обозначена цифрами 4–5. При абсорбции выделяется большое количество теплоты, которая отводится воздушным потоком 8. Полученный раствор аммиака в воде (крепкий раствор аммиака) насосом 9 перекачивается в генератор пара 1. Процесс сжатия изображен прямой 5–6.

Для повышения эффективности работы кондиционер снабжен рекуперативным теплообменником 11.

Далее раствор аммиака в воде нагревается и испаряется в генераторе пара 1 при помощи горячих выхлопных газов автомобиля 12. Как уже упоминалось, испаряется преимущественно аммиак. Объем рабочего тела резко увеличивается. Это показано линией 10–1.

В идеальном случае площади и работы прямого L и обратного L_0 циклов равны:

$$L = L_0, \text{ или } G_{кр} \cdot l = G_{NH_3} \cdot l_0, \quad (1)$$

где l и l_0 — работа, совершаемая 1 кг рабочего тела, в прямом и обратном циклах, Дж;

$G_{кр}$ и G_{NH_3} — количество циркулирующего рабочего тела, проходящее через вентили 10 и 4 соответственно*, кг.

Из (1) можно определить первую основную характеристику холодильной машины — кратность a циркуляции рабочего тела в прямом и обратном циклах:

$$a = G_{кр}/G_{NH_3} = l/l_0. \quad (2)$$

Заметим также, что в действительности из-за необратимости процессов работа прямого цикла больше обратного, в частности, на величину площади прямоугольника 5–6–10–9–7–5 (см. рис. 3б). Но этой разностью можно пренебречь.

Рассмотрим еще некоторые полезные характеристики.

Коэффициент полезного действия прямого цикла:

$$\eta_T = \frac{L}{Q_g},$$

или

$$\eta_T = \frac{T_g - T_0}{T_g}, \quad (3)$$

где L — работа цикла, Дж;

*Здесь и далее индексы «кр», «сл» и NH_3 относят величины к крепкому, слабому растворам аммиака в воде и практически к чистому аммиаку — хладону.

Q_G — тепло, передаваемое к раствору от горячего источника, Дж;

T_G и T_0 — температура горячего источника и окружающей среды, К.

Холодильный коэффициент обратного цикла:

$$\varepsilon_{\text{хол}} = \frac{Q_0}{L_0},$$

или

$$\varepsilon_{\text{хол}} = \frac{T_{\text{хол}}}{T_0 - T_{\text{хол}}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{хол}}$ — температура охлаждаемого объекта (кондиционируемого воздуха).

Тепловой коэффициент тепловой машины ζ , определяемый как отношение количества отведенной теплоты Q_0 от источника к низкой температурой к количеству затраченной теплоты Q_G :

$$\zeta = \frac{Q_0}{Q_G}.$$

Очевидны соотношения

$$\zeta = \frac{Q_0}{Q_G} = \frac{L}{Q_G} \frac{Q_G}{L_0} = \eta \varepsilon_{\text{хол}}.$$

Следовательно, для стационарного процесса сумма подводимых и отводимых тепловых потоков равна

$$Q_G + Q_0 = Q_k + Q_a, \quad (5)$$

где Q_G — тепловой поток, Дж, подводимый к рабочему телу в генераторе пара, необходимый для разделения рабочего тела с концентрацией $\xi_{\text{кр}}$ (крепкий раствор аммиака) на практически чистый аммиак (с концентрацией ξ_{NH_3}) и воду (в действительности слабый раствор аммиака с концентрацией $\xi_{\text{сл}}$);

Q_0 — тепло, подводимое к рабочему телу в испарителе от охлаждаемого воздуха, Дж;

Q_k — тепло, отводимое от рабочего тела в конденсаторе, Дж;

Q_a — тепло, отводимое от рабочего тела в абсорбере, Дж.

Рассмотрим баланс аммиака применительно к абсорберу.

Из абсорбера вытекает $G_{\text{кр}}$ кг раствора, содержащего $G_{\text{кр}} \cdot \xi_{\text{кр}}$ кг аммиака. В абсорбер втекает G_{NH_3} хладагента, состоящего

практически из чистого аммиака, с ним чистого аммиака входит $G_{\text{NH}_3} \cdot \xi_{\text{NH}_3}$. Кроме того, в абсорбер поступает слабый раствор аммиака $G_{\text{сл}}$, с которым входит $G_{\text{сл}} \cdot \xi_{\text{сл}}$ чистого аммиака. Тогда для баланса потоков рабочего тела будем иметь

$$G_{\text{кр}} = G_{\text{NH}_3} + G_{\text{сл}}.$$

Получим для него уравнение баланса по аммиаку:

$$G_{\text{кр}} \cdot \xi_{\text{кр}} = G_{\text{NH}_3} \cdot \xi_{\text{NH}_3} + G_{\text{сл}} \cdot \xi_{\text{сл}},$$

или

$$a \cdot \xi_{\text{кр}} = \xi_{\text{NH}_3} + (a - 1) \cdot \xi_{\text{сл}}.$$

Отсюда следует, что

$$a = \frac{\xi_{\text{NH}_3} - \xi_{\text{сл}}}{\xi_{\text{кр}} - \xi_{\text{сл}}}. \quad (6)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены новые конструкции адсорбционных и абсорбционных кондиционеров, пригодных для установки на автомобильном транспорте. Особенность применения таких кондиционеров заключается в возможности экономить топливо, так как они работают на утилизации тепловой энергии выхлопных газов автомобиля и не потребляют никакой дополнительной энергии ни от коленчатого вала двигателя, ни от аккумуляторных батарей.

Принцип работы сорбционных кондиционеров и холодильных машин известен давно, но на автомобильном транспорте они не применялись из-за громоздкости и сложности в эксплуатации. Однако ситуация изменилась благодаря созданию новых материалов с требуемыми теплофизическими свойствами и разработке высокоэффективных технологических процессов [17, 18] и оборудования — стало возможным изготовление сложных по форме и компактных по размеру отдельных деталей кондиционеров как адсорбционного [12, 13], так и абсорбционного [14–16] типа.

В статье представлены наиболее простые схемы таких кондиционеров, а также приведена методика расчета основных параметров предложенного авторами абсорбционного кондиционера, необходимых для дальнейших расчетов каждого отдельного его узла.

Литература

1. Холодильные машины / А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев [и др.] : под ред. Л. С. Тимофеевского. Санкт-Петербург : Политехника, 1997. 992 с.
2. Zhang L. Z. Design and testing of an automobile waste heat adsorption cooling system // Applied Thermal Engineering. 2000. Vol. 20. Issue 1. Pp. 103–114. DOI: 10.1016/S 1359-4311(99)00009-5.
3. Tamainot-Telto Z., Metcalf S. J., Critoph R. E. Novel compact sorption generators for car air conditioning // International Journal of Refrigeration. 2009. Vol. 32. Issue 4. Pp. 727–733. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2008.11.010.

References

1. Refrigerating machines [Kholodil'nye mashiny] / A. V. Baranenko, N. N. Bukharin, V. I. Pekarev [et al.]; ed. by L. S. Timofeevskiy. St. Petersburg : Polytechnics, 1997. 992 p.
2. Zhang L. Z. Design and testing of an automobile waste heat adsorption cooling system // Applied Thermal Engineering. 2000. Vol. 20. Issue 1. Pp. 103–114. DOI: 10.1016/S 1359-4311(99)00009-5.
3. Tamainot-Telto Z., Metcalf S. J., Critoph R. E. Novel compact sorption generators for car air conditioning // International Journal of Refrigeration. 2009. Vol. 32. Issue 4. Pp. 727–733. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2008.11.010.

4. Jianganb L., Wanga R. Z., Lib J. B. [et al.]. Performance analysis on a novel sorption air conditioner for electric vehicles // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 156. Issue 15. Pp. 515–524. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.11.077.
5. Tamainot-Telto Z., Critoph R. E. Advanced solid sorption air conditioning modules using monolithic carbon-ammonia pair // *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. Issue 6. Pp. 659–674. DOI: 10.1016/S 1359-4311(02)00238-7.
6. Vashisht S., Rakshit D. Recent advances and sustainable solutions in automobile air conditioning systems // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 329. DOI: 10.1016 / j. jclepro. 2021.129754.
7. Ali S. M., Chakraborty A. Thermodynamic modelling and performance study of an engine waste heat driven adsorption cooling for automotive air-conditioning // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 90. Pp. 54–63. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.078.
8. Performance evaluation of a waste-heat driven adsorption system for automotive air-conditioning: Part I. Modeling and experimental validation / M. Verdea, K. Harbyab, R. de Boerc, J. M. Corberána // *Energy*. 2016. Vol. 116. Pp. 526–538. DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.113.
9. Performance evaluation of a waste-heat driven adsorption system for automotive air-conditioning: Part II. Performance optimization under different real driving conditions / M. Verdea, K. Harbyab, R. de Boerc, J. M. Corberána // *Energy* 2016. Vol. 115. Pp. 996–1009. DOI: 10.1016 / j.energy.2016.09.086.
10. Sharafian A., Bahrami M. Critical analysis of thermodynamic cycle modeling of adsorption cooling systems for light-duty vehicle air conditioning applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 48. Pp. 857–869. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.055.
11. Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials / H. Selvnes, Y. Allouche, R. I. Manescu, A. Hafner // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020. Vol. 22. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100807.
12. Устройство для кондиционирования воздуха в транспортном средстве, содержащее адсорбционный тепловой насос / М. Цубоути: патент 2692444 Российская Федерация. № 2018100720; заявл. 11.01.2018; опубл. 24.06.2019, Бюл. № 18.
13. Буланов Н. В., Авксентьева Е. И., Бондаренко В. Г. Перспективы развития техники кондиционирования воздуха на транспорте с двигателями внутреннего сгорания // *Инновационный транспорт*. 2020. № 4 (38). С. 67–71. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-4-67-71. ISSN 2311–164X.
14. Абсорбционный кондиционер автомобиля / Н. В. Буланов, В. Г. Бондаренко : патент 2743472 Российская Федерация. № 2020122806; заявл. 03.07.2020; опубл. 18.02.2021, Бюл. № 5.
15. Абсорбционный кондиционер автомобиля / Н. В. Буланов, Е. И. Авксентьева, В. Г. Бондаренко : патент 2758018 Российская Федерация. № 2021108012; заявл. 24.03.2021; опубл. 25.10.2021, Бюл. № 30.
16. Ilyin A. P., Terentiev A. N., Arslanov F. R. Automobile Absorption Conditioner // *Наука и техника*. 2021. Т. 20. № 5. С. 445–448. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-5-445-448. ISSN 2227–1031.
17. Буланов Н. В., Гасанов Б. М. Теплообмен при кипении воды и эмульсий в миниканале // *Вестник УРГУПС*. 2019. № 1 (41). С. 4–15. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-4-15. ISSN 2079–0392.
18. Буланов Н. В. Взрывное вскипание диспергированных жидкостей. Екатеринбург : Изд-во УРГУПС, 2011. 232 с.
4. Jianganb L., Wanga R. Z., Lib J. B. [et al.]. Performance analysis on a novel sorption air conditioner for electric vehicles // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 156. Issue 15. Pp. 515–524. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.11.077.
5. Tamainot-Telto Z., Critoph R. E. Advanced solid sorption air conditioning modules using monolithic carbon-ammonia pair // *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. Issue 6. Pp. 659–674. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00238-7.
6. Vashisht S., Rakshit D. Recent advances and sustainable solutions in automobile air conditioning systems // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 329. DOI: 10.1016 / j. jclepro. 2021.129754.
7. Ali S. M., Chakraborty A. Thermodynamic modelling and performance study of an engine waste heat driven adsorption cooling for automotive air-conditioning // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 90. Pp. 54–63. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.078.
8. Performance evaluation of a waste-heat driven adsorption system for automotive air-conditioning: Part I. Modeling and experimental validation / M. Verdea, K. Harbyab, R. de Boerc, J. M. Corberána // *Energy*. 2016. Vol. 116. Pp. 526–538. DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.113.
9. Performance evaluation of a waste-heat driven adsorption system for automotive air-conditioning: Part II. Performance optimization under different real driving conditions / M. Verdea, K. Harbyab, R. de Boerc, J. M. Corberána // *Energy* 2016. Vol. 115. Pp. 996–1009. DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.086.
10. Sharafian A., Bahrami M. Critical analysis of thermodynamic cycle modeling of adsorption cooling systems for light-duty vehicle air conditioning applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 48. Pp. 857–869. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.055.
11. Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials / H. Selvnes, Y. Allouche, R. I. Manescu, A. Hafner // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020. Vol. 22. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100807.
12. Device for air conditioning in vehicle that includes adsorption heat pump [Ustroystvo dlya konditsionirovaniya vozdukhа v transportnom sredstve, soderzhashhee adsorbtsionnyy teplovoy nasos] / M. Tsubouti: patent 2692444 Russian Federation. No. 2018100720; filed 11.01.2018; publ. 24.06.2019, Bulletin No. 18.
13. Bulanov N. V., Avksentyeva E. I., Bondarenko V. G. Prospects for the development of air conditioning technology in transport with internal combustion engines [Perspektivy razvitiya tekhniki konditsionirovaniya vozdukhа na transporte s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya] // *Innotrans*. 2020. No. 4 (38). Pp. 67–71. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-4-67-71. ISSN 2311–164X.
14. Automobile absorption conditioner [Absorbtsionnyy konditsioner avtomobilya] / N. V. Bulanov, V. G. Bondarenko : patent 2743472 Russian Federation. No. 2020122806; filed 03.07.2020; publ. 18.02.2021, Bulletin No. 5.
15. Automobile absorption conditioner [Absorbtsionnyy konditsioner avtomobilya] / N. V. Bulanov, E. I. Avksentyeva, V. G. Bondarenko: patent 2758018 Russian Federation. No. 2021108012; filed 24.03.2021; publ. 25.10.2021, Bulletin No. 30.
16. Ilyin A. P., Terentiev A. N., Arslanov F. R. Automobile Absorption Conditioner // *Science & Technique*. 2021. Vol. 20. No. 5. Pp. 445–448. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-5-445-448. ISSN 2227–1031.
17. Bulanov N. V., Gasanov B. M. Heat transfer in boiling of water and emulsions in a minichannel [Teploobmen pri kipenii vody i emul'siy v minikanale] // *Herald of USURT*. 2019. No. 1 (41). Pp. 4–15. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-4-15. ISSN 2079–0392.
18. Bulanov N. V. Boil-off of dispersed liquids [Vzryvnoe vskipanie dispergirovannykh zhidkostey]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2011. 232 p.

Объем статьи 0,77 авторских листа

УДК 656.07

Евгений Сергеевич Козин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сервис автомобилей и технологических машин» Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ СТАНЦИЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Evgeniy Sergeevich Kozin, PhD in Engineering, Associate Professor,
Car Service and Technological Machines Department, Industrial University of Tyumen (IUT), Tyumen, Russia

Decision support system for control of automobile service station

Аннотация

Представлена методика реализации системы поддержки принятия решений на примере управления станцией технического обслуживания автомобилей. Система оперирует текущими техническими показателями и финансовыми результатами деятельности предприятия. Пользователь системы имеет возможность оценить потенциальные параметры предприятия при изменении одного или нескольких целевых показателей. Варианты управленческих решений, предлагаемые системой, ранжируются по степени возможности их реализации. Результатом работы системы является перечень рекомендованных значений показателей, выполнение которых позволит достичь установленной пользователем цели, связанной с достижением экономической выгоды или снижением издержек на функционирование предприятия.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, цифровой двойник, цифровое предприятие, моделирование, станция технического обслуживания.

Abstract

The paper presents a method for realization of a decision support system on example of control of automobile service station. The system operates current technical indicators and financial results of company operation. A user has a possibility to assess potential parameters of the company at change of one or several key indicators. Variants of managerial decisions suggested by the system are ranked by a level of possibility of their realization. As a result, the system provides a set of recommended values of indicators, execution of which allows you to achieve the aim set by the user and connected with the achievement of economic benefits and decrease of costs on company operation.

Keywords: decision support system, digital twin, digital enterprise, modeling, service station.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-73-77

В настоящее время автомобильный транспорт генерирует большие объемы информации, которые могут быть использованы для оптимизации технологических и управленческих процессов его эксплуатации. Транспортная стратегия Российской Федерации содержит немало тезисов, которые подтверждают актуальность задач, связанных с использованием данных для реализации прогнозной аналитики и их интеллектуального анализа [1]. В современных научных работах уже нашли широкое применение понятия «цифровые двойники» и «системы поддержки принятия решений» [2–4].

В связи с этим целью настоящего исследования является повышение эффективности работы автотранспортного предприятия путем разработки и внедрения системы поддержки принятия решений по управлению технической эксплуатацией автомобильного транспорта.

Следует отметить, что структура систем поддержки принятия решений и принципы их работы в настоящее время интерпретируются по-разному, и общая концепция их использования не сформирована [5, 6]. Поэтому научную новизну представленного в статье исследования определяют следующие положения: разработка концепции системы поддержки принятия решений на транспорте, которая синтезирует методы управления технической эксплуатацией автомобилей и технические возможности средств создания и проектирования программных продуктов в сфере работы с данными; разработка принципов применения системы поддержки принятия решений; разработка и использование в рамках системы поддержки принятия решений математических моделей, направленных на повышение эффективности технической эксплуатации автомобильного транспорта.

Практическая значимость исследования заключается в разработке программного продукта, позволяющего руководителям организаций в автотранспортной сфере анализировать последствия потенциальных управленческих решений, а также осуществлять поиск оптимального варианта с учетом установленных критериев и ограничений.

Были проанализированы научные источники, посвященные данной тематике. Так, в [7] представлена разработка системы поддержки принятия решений по оптимизации межсервисного интервала обслуживания самолетов на основе показаний датчиков

в реальном времени. В [8] сформированы теоретические основы модели системы по перевозке грузов морским транспортом, позволяющей среди большого количества сочетаний вариантов типов транспорта и маршрутов выбрать оптимальный по критерию, задаваемому пользователем. В работах [9, 10] для создания цифровой модели автотранспортного предприятия использованы методы системной динамики. Большое количество литературных источников посвящено разработке информационных систем управления перевозочным процессом (например, [11–13]).

За основу предлагаемой расчетной модели взят технологический и экономический расчет станции технического обслуживания (СТО) автомобилей. Методика реализации системы поддержки принятия решений по управлению технической эксплуатацией парка техники состоит из восьми этапов (рис. 1).

На первом этапе в систему поступают данные о текущих технических и финансовых показателях работы предприятия за отчетный период, равный одному году. Перечислим заложенные в основу расчетной модели параметры, характеризующие текущую деятельность предприятия: годовое количество обслуживаемых автомобилей на СТО, ед.; количество заездов на станцию одного автомобиля в год, раз; среднегодовой пробег автомобиля, км; дни работы в году; продолжительность смены, ч; число смен; коммерческая стоимость нормо-часа, руб.; доход, руб.; прибыль, руб.; суммарные налоговые отчисления, руб.; рентабельность, %; безубыточный объем реализации услуг, чел.-ч; срок окупаемости капитальных вложений, лет.

Указанный перечень показателей не является исчерпывающим и может изменяться в зависимости от специфики деятельности предприятия.

Окно ввода исходных данных в систему представлено на рис. 2.

Для моделируемой ситуации пользователем является директор предприятия — станции сервисного обслуживания (директор по развитию), желающий узнать, за счет каких действий можно улучшить финансовые показатели деятельности предприятия, например прибыль. Система должна предоставить пользователю параметры предприятия, при

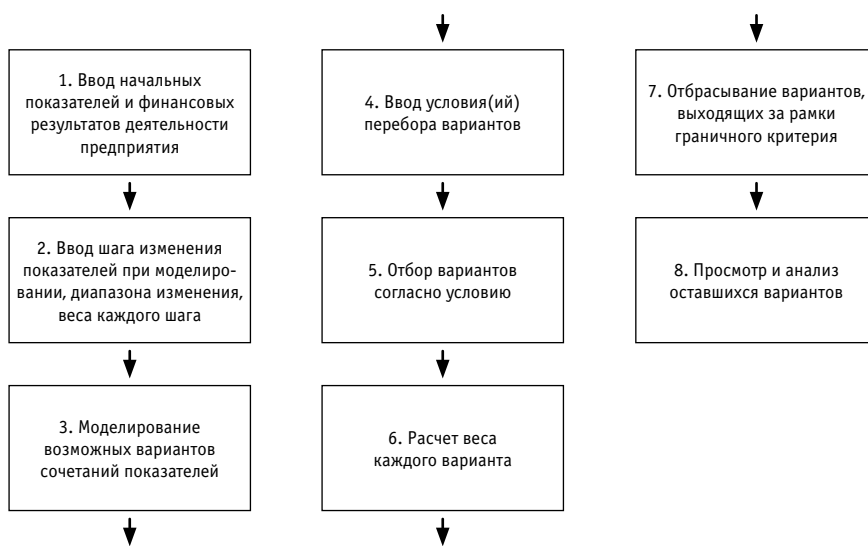


Рис. 1. Методика реализации системы поддержки принятия решений по управлению технической эксплуатацией парка техники

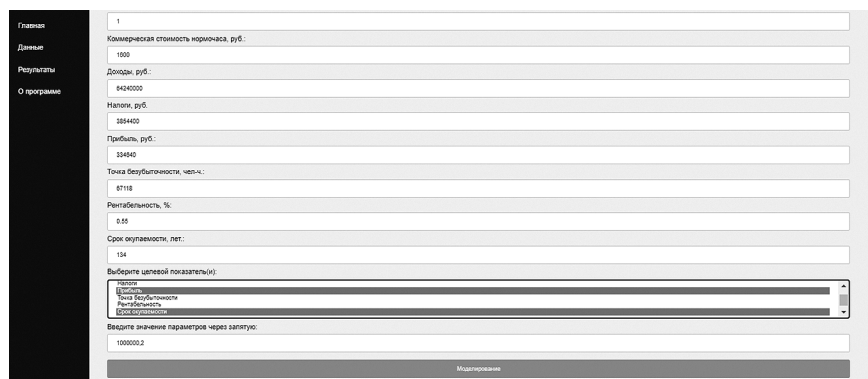


Рис. 2. Пример интерфейса пользователя системы поддержки принятия решений

которых оно сможет достичь заданного значения прибыли, например, в 1 млн руб. Пользователь может задавать значения не только одного, но и нескольких показателей, как представлено на рис. 2, где выбраны прибыль и срок окупаемости капитальных вложений. После нажатия на кнопку «Моделирование» запускается расчетный модуль системы.

Второй этап состоит в определении шага и диапазона изменения исходных показателей расчетной модели, совокупность сочетаний которых и будет оцениваться далее. Например, для заложенной в основу расчетной модели показатель «годовое количество обслуживаемых автомобилей на СТО, ед.» изменяется в диапазоне 100–1000 с шагом 100 ед. Аналогично задаются диапазоны и шаги изменения других показателей.

Кроме того, модель должна предусматривать автоматизированный механизм, позволяющий сравнивать варианты и отбирать из всего многообразия возможных решений наиболее предпочтительные для пользователя. Этот механизм становится тем актуальнее, чем большее количество вариантов выдает система. Ручной анализ каждого варианта из нескольких сотен представленных является для конечного пользователя трудоемкой и в целом ненужной задачей. На текущем этапе исследования в качестве такого механизма предложено использовать суммарный балл варианта, который представляет собой обобщенный показатель сложности принятия решения для предприятия, характеризующий материальные, финансовые, временные, трудовые затраты и т.п. Чем больше

значение, тем менее предпочтительно решение. Балл меняется в диапазоне от 1 до 5. Например, очевидно, что вариант с увеличением годового количества обслуживаемых станций автомобилей на 100 единиц является для предприятия более трудозатратным и менее выполнимым, чем, например, вариант увеличения продолжительности рабочего дня или количества рабочих дней в году. В первом случае предприятие несет затраты на маркетинг и привлечение клиентов, не говоря уже о необходимости расширения технической мощности производственной базы, а во втором — только дополнительные затраты на увеличение фонда оплаты труда. Поэтому балл по первому варианту будет выше, чем по второму, соответственно второй вариант представляется более предпочтительным. Значения баллов либо определяются и задаются пользователем самостоятельно на основе собственной аналитики, либо используется аналитика, заложенная в систему.

Баллы изменения значений исходных показателей предприятия приведены в табл. 1.

Таблица 1

Численные значения вклада каждого показателя
в суммарный балл варианта решения

№	Фактор	Балл при изменении значения на 1 шаг
1	Среднегодовой пробег автомобиля, км	5
2	Количество заездов на станцию одного автомобиля в год, раз	5
3	Годовое количество обслуживаемых автомобилей на СТО, ед.	4
4	Коммерческая стоимость нормо-часа, руб.	3
5	Число смен	2
6	Дни работы в году	1
7	Продолжительность смены, ч	1

Формула расчета суммарного балла по варианту решения имеет следующий вид:

$$W_{sum}^i = \sum_{j=1}^n \frac{(V_{j\ count}^i - V_{j\ fact}^i)}{S_j} \cdot R_j, \quad (1)$$

где i — номер варианта;

W_{sum} — суммарный вес варианта, балл;

j — наименование показателя деятельности предприятия из n показателей;

V_{count} — расчетное значение показателя;

V_{fact} — фактическое значение показателя;

S — шаг изменения значения показателя;

R — вес изменения показателя на 1 шаг.

Следует отметить, что суммарный балл варианта определяется при его сравнении с фактическими (текущими) показателями деятельности предприятия. Таким образом, при расчете по формуле (1) каждый вариант, предлагаемый системой,

будет характеризоваться суммарным баллом, определяющим его сложность или выполнимость. Например, для пользователя, принимающего решение, более предпочтительным будет вариант, оцениваемый в 2 балла, чем оцениваемый в 10 баллов. Вместе с тем реализована возможность минимизировать количество вариантов, предоставляемых пользователю для анализа. С этой целью предлагается использовать метод Парето, который применительно к данному исследованию заключается в фокусировании пользователя только на 20 % вариантов, распределенных по увеличению суммарного балла.

На третьем этапе система производит моделирование (технологический и экономический расчет предприятия) по всем сочетаниям исходных факторов, сформированных на втором этапе. Результатом расчета является определение финансовых показателей работы предприятия, перечисленных выше.

Пользователь должен иметь возможность работать только с теми вариантами, которые удовлетворяют условию его запроса к системе. Поэтому пятым этапом является формирование пользовательского запроса из числа представленных вариантов (или шаблонов) запросов либо конструирование нестандартных запросов. Например, из всех предложенных вариантов пользователь хочет получить только те, при которых прибыль составит более 1 млн руб. Неформализованный в программную форму запрос мог бы звучать следующим образом: «Можно ли за счет изменения любых других показателей по отдельности относительно текущего уровня предприятия достичь прибыли более 1 000 000 руб.?»

Система осуществляет отбор вариантов согласно условию: прибыль больше или равна 1 млн руб. В результате пользователь получает совокупность вариантов, распределенных по категориям (рис. 3).

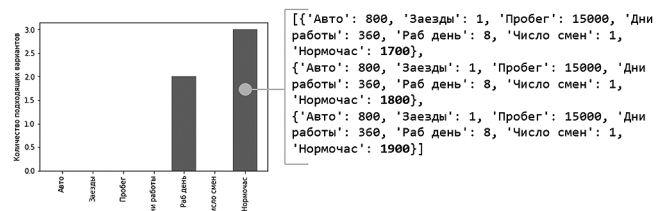


Рис. 3. Количество вариантов, соответствующих заданному пользователем условию, и содержание предложенных системой вариантов по критерию «коммерческая стоимость нормо-часа, руб.»

Согласно представленному на рис. 3 примеру, в ответ на запрос пользователя система выдала всего пять вариантов, причем два решения достигаются за счет увеличения рабочего дня, а три — за счет увеличения коммерческой стоимости нормо-часа работ. Содержимое последней группы вариантов решений показано на рис. 3 справа. Пользователь получает готовое управленческое решение, которое заключается в увеличении стоимости нормо-часа на 100 руб. относительно текущей стоимости, равной 1600 руб. Таким образом, из общего перечня вариантов система позволила предложить в качестве решения названной проблемы тот, который отвечает критерию пользователя.

Однако более информативным и практичным является возможность получить варианты решений при одновременном изменении всех входящих параметров. Конкретное решение в таком случае могло бы содержать изменение, например, трех из семи показателей относительно текущего состояния предприятия. То есть запрос пользователя мог быть сформулирован следующим образом: «Можно ли за счет изменения любых других показателей вместе относительно текущего уровня предприятия достичь прибыли более 1 млн руб.?»

На шестом этапе система выдает пользователю определенное количество решений, распределенных по степени увеличения их суммарного балла. Также по указанному выше методу Парето происходит отбор 20 % вариантов, которые и будут итоговыми. Визуализация методики отбора вариантов представлена на рис. 4.

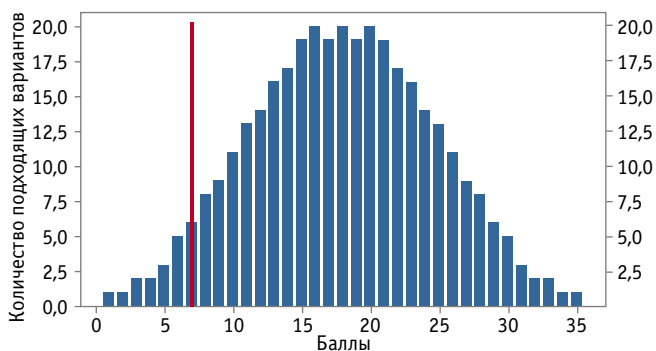


Рис. 4. Распределение количества вариантов, удовлетворяющих заданному условию, по весам (красная вертикальная линия соответствует 20 % от общего количества представленных вариантов)

Варианты, выходящие за рамки граничного критерия, могут быть просмотрены пользователем в ручном режиме. На седьмом этапе в заключительный перечень включаются только те варианты, которые удовлетворяют одному или нескольким заданным пользователем условиям.

На последний запрос пользователя для рассматриваемого примера система выдала 352 варианта, из которых 20 были отобраны по принципу Парето для дальнейшей работы и анализа пользователем.

Восьмым этапом является просмотр и анализ финального перечня вариантов. При этом пользователь может запустить моделирование еще раз, используя параметры выбранного финального варианта в качестве исходных. Он получает возможность определить, как изменятся показатели работы предприятия в рамках выбранного варианта, чтобы более обоснованно принять управленческое решение.

Пошаговый процесс работы с решениями, формируемыми системой, представлен на рис. 5.

На первом шаге (см. рис. 5, слева) происходит вывод вариантов решений и их оценка. Система указывает общее количество сочетаний вариантов, количество вариантов, удовлетворяющих заданному пользователем условию, а также количество вариантов для рассмотрения с учетом суммарного балла каждого варианта, определенного по формуле (1). В этом же окне пользователь может подробнее проанализировать содержимое каждого варианта (см. рис. 5, в центре) и смоделировать работу предприятия, используя параметры выбранного варианта в качестве входящих. В результате пользователь может спрогнозировать и оценить результаты работы предприятия, если изменит один или несколько предлагаемых системой показателей относительно их текущего значения (см. рис. 5, справа). С учетом вышесказанного для рассматриваемого примера ответом на последний запрос пользователя могут служить варианты, предполагающие увеличение продолжительности рабочего дня на 2 ч, увеличение стоимости нормо-часа минимум на 100 руб. или увеличение количества обслуживаемых на предприятии автомобилей на 100 единиц.

Таким образом была разработана структура системы принятия решений по управлению технической эксплуатацией парка техники. Работа системы представлена на примере управления станцией технического обслуживания автомобилей. Система позволяет спрогнозировать параметры текущей и финан-

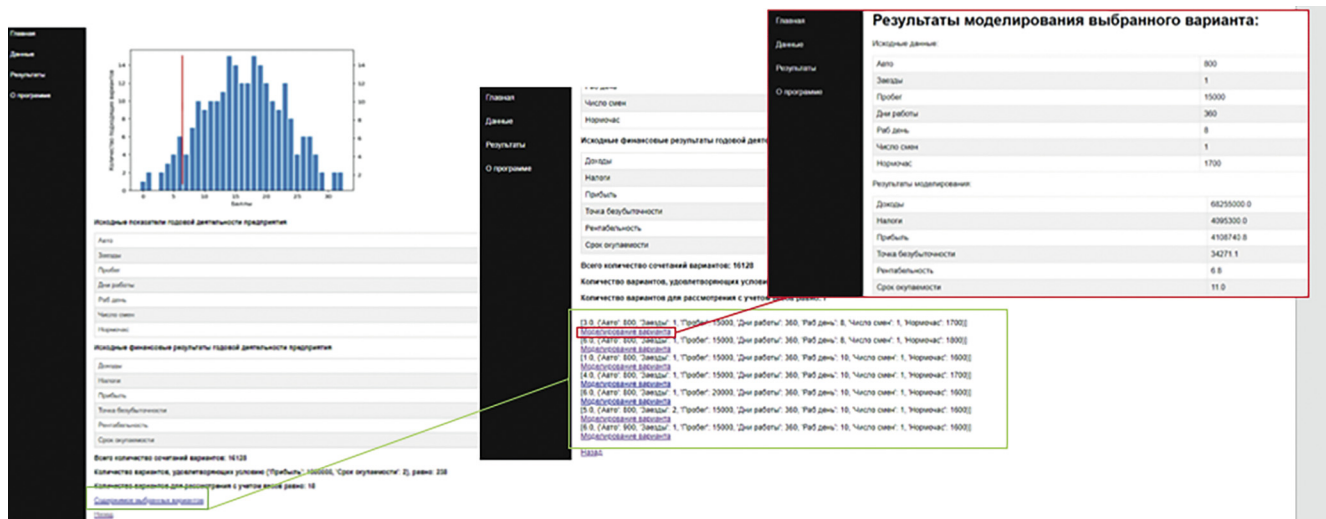


Рис. 5. Пример окна вывода итоговых вариантов системой поддержки принятия решений

совой деятельности предприятия и сформировать перечень действий для их достижения с учетом установленных пользователем критериев. Варианты отбираются на основе суммарного балла каждого варианта, представляющего собой обобщенный показатель сложности реализации решения относительно текущего состояния предприятия. Распределенные по степени увеличения суммарного балла варианты отбираются по критерию Парето, при этом на рассмотрение пользователя предлагаются варианты с наименьшими весами (наименьшей сложностью реализации).

Система реализована в виде web-приложения с возможностью ввода/вывода информации, реализации функцио-

нала моделей и взаимодействия с базами данных. Предприятие подключается к системе на основе подписки, синхронизируя данные о деятельности с системой.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку и реализацию методики определения оптимальных вариантов функционирования системы с учетом установленного пользователем условия и критерия оптимизации; на совершенствование методики выбора и обоснования критериев сравнения вариантов с использованием методов машинного обучения; адаптацию блока моделей приложения к условиям реальных предприятий с подключением к их базам данных и потокам динамической информации (например, с систем транспортной телеметрии).

Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Москва, 2021. 285 с.
2. Couillard J. A decision support system for vehicle fleet planning // Decision support systems. 1993. No. 9 (2). Pp. 149–159.
3. Digital Twin Implementation for Accelerating the Development of Flexible Transportation System Control Software / L. Rassudov, O. Tolstikh, M. Tiapkin [et al.] // Proceedings of 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2021), 2021. DOI: 10.1109/RTUCON 53541.2021.9711704.
4. Erofeev A. Multi-criteria evaluation of management decisions in the intellectual system of transportation management // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2019. № 3. С. 205–208. ISSN 2415–7740.
5. Sustainable production in cement via artificial intelligence based decision support system: Case study / K. Tümay Ates, C. S. ahin, Yu. Kuvvetli [et al.] // Case Studies in Construction Materials. 2021. No. 15.
6. Barrera J., Carrasco R. A., Moreno E. Real-time fleet management decision support system with security constraints // TOP. 2020. No. 28. Pp. 728–748.
7. Lin L., Bin L., ShiSheng Z. Development and application of maintenance decision-making support system for aircraft fleet // Advances in Engineering Software. 2017. No. 114. Pp. 192–207.
8. A decision support methodology for strategic planning in maritime transportation / K. Fagerholt, M. Christiansen, L. M. Hvattum [et al.] // Omega. 2010. No. 38. Pp. 465–474.
9. Дорофеев А. Н., Курганов В. М. Анализ деятельности автотранспортного предприятия с использованием системной динамики // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы: материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 125-летию РУТ (МИИТ). Москва, 2021. С. 233–238.
10. Дорофеев А. Н., Курганов В. М. Реализация концепции «цифровых двойников» для управления транспортно-логистической компанией // Автомобильные перевозки и транспортная логистика: теория и практика: сборник научных трудов кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» (с международным участием) / Под науч. ред. Е. Е. Витвицкого. Омск, 2020. С. 26–32.
11. Grzybowska H., Barceló J. Decision support system for real-time urban freight management // Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2012. No. 39. Pp. 712–725.
12. Колесник М. Н., Гозбенко В. Е. Принципы создания информационно-планирующей и управляющей системы перевозками на автомобильном транспорте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007. № 3 (15). С. 46–52. ISSN 1813–9108.
13. Design and development of a context-aware decision support system for real-time accident handling in logistics / E. W. T. Ngai, T. K. P. Leung, Y. H. Wong [et al.] // Decision Support Systems. 2012. No. 52. Pp. 816–827.

References

1. The Russian Federation transport strategy up to 2030 with a forecast for the period up to 2035 [Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda]: the Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 No. 3363-r. Moscow, 2021. 285 p.
2. Couillard J. A decision support system for vehicle fleet planning // Decision support systems. 1993. No. 9 (2). Pp. 149–159.
3. Digital Twin Implementation for Accelerating the Development of Flexible Transportation System Control Software / L. Rassudov, O. Tolstikh, M. Tiapkin [et al.] // Proceedings of 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2021), 2021. DOI: 10.1109/RTUCON 53541.2021.9711704.
4. Erofeev A. Multi-criteria evaluation of management decisions in the intellectual system of transportation management // Open semantic technologies for design of intelligent systems. 2019. No. 3. Pp. 205–208. ISSN 2415–7740.
5. Sustainable production in cement via artificial intelligence based decision support system: Case study / K. Tümay Ates, C. S. ahin, Yu. Kuvvetli [et al.] // Case Studies in Construction Materials. 2021. No. 15.
6. Barrera J., Carrasco R. A., Moreno E. Real-time fleet management decision support system with security constraints // TOP. 2020. No. 28. Pp. 728–748.
7. Lin L., Bin L., ShiSheng Z. Development and application of maintenance decision-making support system for aircraft fleet // Advances in Engineering Software. 2017. No. 114. Pp. 192–207.
8. A decision support methodology for strategic planning in maritime transportation / K. Fagerholt, M. Christiansen, L. M. Hvattum [et al.] // Omega. 2010. No. 38. Pp. 465–474.
9. Dorofeev A. N., Kurganov V. M. Analysis of operation of automobile operating company with the use of system dynamics [Analiz deyatel'nosti avtotransportnogo predpriyatiya s ispol'zovaniem sistemnoy dinamiki] // Digital transformation of transport: problems and perspectives: proceedings of the National research and practice conference dedicated to 125th anniversary of the Russian University of Transport (MIIT). Moscow, 2021. Pp. 233–238.
10. Dorofeev A. N., Kurganov V. M. Realization of concept of «digital twins» for control of automobile operating company [Realizatsiya kontseptsii «tsifrovyykh dvoynikov» dlya upravleniya transportno-logisticheskoy kompaniyey] // Automobile transportation and transport logistics: theory and practice: collection of scientific papers of the Transport Management and Control on Transport Department (with foreign participation) / Ed. by E. E. Vitvitskiy. Omsk, 2020. Pp. 26–32.
11. Grzybowska H., Barceló J. Decision support system for real-time urban freight management // Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2012. No. 39. Pp. 712–725.
12. Kolesnik M. N., Gozbenko V. E. Principles of creation of informational, planning and control system of transportation on automobile transport [Printsipy sozdaniya informatsionno-planiruyushhey i upravlyayushhey sistema pervozokami na avtomobil'nom transporte] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2007. No. 3 (15). Pp. 46–52. ISSN 1813–9108.
13. Design and development of a context-aware decision support system for real-time accident handling in logistics / E. W. T. Ngai, T. K. P. Leung, Y. H. Wong [et al.] // Decision Support Systems. 2012. No. 52. Pp. 816–827.

УДК 629.4.053.2

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

Евгений Михайлович Елкин, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ И ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗА СЧЕТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПУТИ

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

Evgeniy Mikhaylovich Elkin, postgraduate student, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Overview of known locomotive systems of computer vision and their improvement by provision of dynamic lighting of track

Аннотация

Выполнен обзор известных локомотивных систем машинного зрения, а также представлены результаты анализа научных работ, посвященных этим системам. Определены и описаны лимитирующие параметры локомотивных систем машинного зрения, а именно фактор освещенности, непосредственно влияющий на качество детектирования объектов интереса. Предложен способ обеспечения динамического освещения для локомотивных систем машинного зрения, позволяющий получать более подробную информацию об объектах интереса в кривых участках пути и в условиях ограниченной видимости.

Ключевые слова: электроподвижной состав, машинное зрение, динамическое освещение, безопасность движения.

Abstract

The authors have made an overview of known locomotive systems of computer vision and have presented results of analysis of scientific works dedicated to such systems. They have determined and described limiting parameters of locomotive systems of computer vision, namely the factor of illumination intensity that directly affects the quality of detecting objects of interest. As a result, the paper suggests a method for provision of dynamic lighting for locomotive systems of computer vision that provides more detailed information about objects of interest in curves and in conditions of limited visibility.

Keywords: electric motive power, computer vision, dynamic lighting, safety of railway operation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-78-81

К числу драйверов развития промышленности, безусловно, относится автоматизация, позволяющая сделать производство технологичным и экономичным. Автоматизация коснулась всех сфер промышленности, для которых была характерна высокая доля ручного формализованного труда. Снижение доли монотонного труда позволило сократить число низкоквалифицированных рабочих, повысить технологичность, качество и количество выпускаемой продукции.

Одним из векторов развития автоматизации производства стала технология машинного зрения. История понятия «машинное зрение» берет начало с работ профессора Массачусетского технологического института (MIT) Оливера Селфриджа. В статье «Глаза и уши для компьютера», опубликованной в 1962 г., он теоретически описал возможность оснащения вычислительной техники средствами фиксации звуковой и визуальной информации для их дальнейшей обработки и использования [1].

Первый опыт широкого практического внедрения систем машинного зрения приписывают американской компании Automatrix, которая в 1981 г. выпустила систему Autovision I, оборудованную видеокамерой с разрешающей способностью 128×128 пикселей. Система устанавливалась на роботизированные механизмы, предназначенные для сварки и пайки изделий [2].

Дальнейшее развитие систем машинного зрения охватывало все большие сферы деятельности, начиная от распознавания рукописного текста и заканчивая медициной и промышленностью.

Принцип действия технологии машинного зрения заключается в получении, обработке и дальнейшем использовании визуальной информации об объекте интереса с помощью комплекта технических и программных средств.

Типовой комплект технических средств состоит из нескольких камер с различными разрешающими характеристиками, объективов с разными оптическими свойствами, вычислительного блока, обрабатывающего данные, аналого-цифровых преобразователей (для ана-

логовых камер), каналов связи, через которые обработанная информация передается на вычислитель, реализованный такими устройствами, как микроконтроллеры, микрокомпьютеры, промышленные вычислительные станции [3].

Помимо технических средств, немаловажной составляющей является программное обеспечение и заложенные в него алгоритмы обработки изображения. Для примера приведем наиболее популярные из этих алгоритмов:

бинаризация — способ преобразования изображения, полученного с монохромных камер, в черно-белое с дальнейшей обработкой бинарного изображения для распознавания областей интереса;

счетчик пикселей — алгоритм, анализирующий и производящий подсчет темных и светлых пикселей получаемого изображения;

сегментация — способ обработки изображения путем разделения его на области, имеющие принципиальное отличие друг от друга (например, рельсошпальная решетка — бровка земляного полотна).

Эти алгоритмы обработки изображения используются как отдельно, так и последовательно — для более качественного анализа ситуации. Так, в системах определения препятствия на пути следования подвижного состава алгоритм может иметь следующую структуру. Сначала изображение проходит сегментационную обработку, выделяется габарит приближения подвижного состава. Затем изображение подвергается бинаризации для контрастного выделения объектов. Следующий этап обработки — счет пикселей, в результате которого делается вывод о наличии либо отсутствии препятствия, его классе и возможном уроне. На основании этого вывода система принимает решение о вмешательстве в процесс движения.

Отметим, что приведенный пример хоть и отражает суть работы систем машинного зрения, но является упрощенным. Алгоритмы анализа изображений, рассмотренные выше, являются одними из базовых, но в реальности изображение может проходить различную одновариантную или многовариантную обработку с использованием разных методов, задаваемых прежде всего предполагаемыми условиями эксплуатации системы.

От качества алгоритмов и программного обеспечения зависит корректность и адекватность работы системы, отработка ею всех возможных ситуаций как штатной, так и нештатной работы.

Благодаря трансферу технологий между отраслями экономики системы машинного зрения стали применяться на железнодорожном транспорте и внесли значительный вклад в его развитие. В настоящее время решение вопросов безопасности движения и автоведения поездов все чаще доверяют этим системам. Их использование на железнодорожном транспорте позволяет минимизировать участие человека в утомляющих, но ответственных процессах. Такие системы не устают, не отвлекаются, не совершают намеренных или случайных ошибок, не подвержены влиянию психологических факторов.

Системы машинного зрения на подвижном составе применяются во всем мире для повышения безопасности и экономической эффективности. Например, немецкой компанией Siemens Transportation AG в сотрудничестве с учеными Рейнско-Вестфальского технического университета г. Ахена и Технического

университета Брауншвейга был разработан самоходный автоматизированный вагон CargoMover, способный перевозить грузы массой до 60 т на расстояние до 150 км [4]. Вагон оборудован системой машинного зрения, обеспечивающей безопасность движения за счет набора датчиков, в который входят видеокамеры и сканирующие лидары (активные лазерные дальномеры) и который позволяет системе безошибочно определять препятствия на пути движения и принимать соответствующие меры. Согласно стандарту МЭК-62290 [5], вагон CargoMover соответствует степени автоматизации GoA4, что подразумевает полностью автоматическое управление с контролем из диспетчерского центра.

Подвижной состав, оборудованный системами машинного зрения, имеется и на территории Российской Федерации. Примером могут служить маневровые тепловозы ТЭМ7А, эксплуатируемые на станции Лужской Октябрьской железной дороги, которые оснащены системой маневровой автоматической локомотивной сигнализации без машиниста (МАЛС БМ). Пока система МАЛС БМ осуществляет дистанционное управление тепловозом по радиоканалу, но специалисты АО «НИИАС» дорабатывают ее, и к 2023 г. планируется оборудовать ТЭМ7А системой машинного зрения, позволяющей обнаруживать препятствия, контролировать заполненность пути вагонами и измерять расстояние до ближайших вагонов. Такой локомотив с модернизированной системой машинного зрения будет классифицирован степенью автоматизации GoA3 [6].

Примером моторвагонного подвижного состава, оборудованного системами машинного зрения, являются электропоезда серии «Ласточка» ЭС2Г-113 и ЭС2Г-136. Они оснащены системой машинного зрения на основе сканирующих лидаров и ряда видеокамер с различными фокусными расстояниями. Такой набор датчиков позволяет осуществлять движение поезда в автоматическом режиме, контролировать препятствия на расстоянии до 600 м и выполнять прицельную остановку состава на платформах с точностью до 50 см. В электропоездах ЭС2Г-113 и ЭС2Г-136 для контроля над системой необходимо присутствие машиниста в кабине, поэтому они классифицируются степенью автоматизации GoA3.

В настоящее время ООО «Уральские локомотивы» совместно с АО «НИИАС» разрабатывают полностью автоматический поезд, осуществляющий движение с контролем из удаленного диспетчерского центра. Этот электропоезд представляет собой более совершенную итерацию поездов ЭС2Г-113, ЭС2Г-136 и обладает степенью автоматизации GoA4 [7].

Широкое распространение машинного зрения неизбежно повлекло за собой становление соответствующей области научных знаний. В процессе многолетних научных исследований были определены безусловные преимущества использования систем машинного зрения, однако параллельно с преимуществами были выявлены и лимитирующие параметры этих систем.

Основополагающий фактор, влияющий на работу систем машинного зрения, — это фактор освещенности. В настоящее время к основным типам осветительных систем машинного зрения относятся устройства на базе светодиодной и лазерной техники. Светодиодные осветительные системы имеют значимое преимущество с точки зрения цены и простоты конструкции, поэтому являются наиболее распространенными.

Необходимость применения специализированной системы освещения объектов интереса обусловлена зачастую недостаточным уровнем имеющегося освещения, невозможностью корректировать направление оси светового потока источника освещения, а также отсутствием возможности корректировать показатель освещенности. Перечисленные ограничения в первую очередь продиктованы условиями эксплуатации каждой отдельной системы.

Вопросы специализированного освещения поднимает в статье «Машинное зрение. Аналитический обзор» Е. И. Дятлов [3]. Он доказывает необходимость использования специального освещения и акцентирует внимание на таких проблемах, как обеспечение оптимального угла падения световых лучей и обеспечение регулирования светового потока осветительного устройства. По мнению Е. И. Дятлова, гибкость структуры освещения играет важную роль в построении изображения и выделении необходимых деталей. Эти утверждения являются верными и могут быть отнесены к абсолютно любой системе машинного зрения, так как некорректное освещение способно привести к отказу или нарушению работы системы, на которой применяется машинное зрение.

Влияние внешнего освещения на работу систем машинного зрения исследует Ю. А. Иванов в диссертации «Разработка локомотивной системы технического зрения» [8]. Перечисляя особенности условий работы локомотивных систем машинного зрения, автор обращает внимание на то, что они эксплуатируются при неблагоприятных погодных условиях, недостаточном или отсутствующем внешнем освещении. Утверждается, что эти факторы могут привести к срыву программы обработки изображения, некорректному детектированию объектов интереса, пропуску объектов и т.д.

Решению проблемы специализированного освещения посвящена статья С. Б. Попова «Использование структурированной подсветки в системах технического зрения» [9], в которой автор указывает на необходимость применения освещения со структурированным световым потоком. Эти осветительные приборы позволяют упростить алгоритмы обработки изображения, снизить цену изделия, повысить скорость работы и в целом уменьшить стоимость и увеличить точность системы регистрации железнодорожных цистерн. Планируемый эффект должен быть обеспечен за счет снижения количества датчиков и упрощения оборудования для детектирования наличия подвижного состава на путях.

В статье А. Попова и П. Маленко «Машинное зрение: как научить локомотив помогать машинисту» [10] освещается проблема, с которой столкнулись специалисты «ЛокоТех-Сигнала» и «Ctrl2GO», т.е. зависимость сенсоров (камер и лидаров) машинного зрения от внешних переменных. Авторы отмечают, что эффективность приема изображения камерами снижается при неблагоприятных погодных условиях, а также при недостаточной освещенности. В свою очередь, лидары лишены такого недостатка, но не способны воспринимать цветовую информацию.

Исходя из анализа имеющихся разработок и обзора литературных источников можно сделать однозначный вывод: оснащение машинного зрения специализированным освеще-

нием — это необходимая мера, обеспечивающая надлежащее качество работы системы.

Актуальность данной проблемы на железнодорожном транспорте подтверждается тем, что системы машинного зрения начинают все больше использоваться не только для выполнения логистических операций, но и для автоматизации ведения поездов, диагностирования подвижного состава, инфраструктуры и пути.

Многие из рассмотренных литературных источников так или иначе связаны с системами машинного зрения, применяемыми для автоматизации управления подвижным составом. Авторы большинства из них отмечают важность фактора освещенности для работы систем.

Особенность условий эксплуатации систем машинного зрения на подвижном составе заключается в ограниченности выбора вариантов технических средств для оптимальной подсветки объектов интереса — непосредственно рельсового пути и близкорасположенных от него элементов инфраструктуры.

В общем случае мы имеем всего два варианта освещения — наружное и посредством лобового прожектора подвижного состава.

Первый вариант возможен только на крупных станциях или в пределах населенных пунктов. При этом затраты на установку освещения и на его содержание превысят полезный эффект, к тому же такая система фактически не предусматривает динамического освещения, когда работа осветительных устройств подстраивается под условия движения подвижного состава для оптимального охвата объектов интереса.

Второй вариант более приемлем, так как каждая тяговая единица по умолчанию обладает головным освещением. При этом для обеспечения динамического освещения, позволяющего корректировать угол отклонения оси светового потока, обычного лобового прожектора будет недостаточно.

В ранее выполненных исследованиях нами был разработан и описан способ коррекции угла отклонения светового потока прожектора локомотива в кривых участках пути. В основе способа лежит использование светодиодного матричного прожектора с рефракторной оптикой, позволяющей эффективно изменять направленность светового потока без применения подвижных элементов в конструкции [11, 12].

Суть способа заключается во включении или отключении отдельных зон освещения прожектором для управления областями освещаемого пространства. Изменение зон освещаемого пространства осуществляется путем переключения в матрице светодиодов. Свет, излучаемый светодиодами матрицы, проходит через оптический модуль, состоящий из световодов, рефракторов и фокусирующей линзы. Оптический модуль позволяет динамически задавать необходимую форму светового потока.

Переключения светодиодов матрицы базируются на принципе динамической индикации — быстром последовательном отображении фрагментов изображения, при этом частота обновления настолько велика, что человеческому глазу изображение кажется целостным. Переключения происходят непрерывно с частотой до 100 МГц, позволяя нивелировать эффект мерцания для камер машинного зрения.

Динамическая индикация дает возможность не только управлять отображением фрагментов, но и регулировать яр-

кость светодиодов с помощью изменения скважности питающего импульса, приходящего на светодиод.

Описанный способ коррекции угла отклонения светового потока лобового прожектора обеспечит систему машинного зрения подвижного состава специализированным освещением, позволяющим решить проблемы, указанные в ранее перечисленных работах.

Например, за счет повышения яркости конкретных зон освещения или переключения секторов прожектора возможно: создать динамически изменяемое структурированное освещение, необходимое для детекции объектов интереса;

не допустить засветки камер машинного зрения встречных поездов, а также исключить бликовую нагрузку, чтобы обеспечить корректную работу алгоритмов обработки изображения; упростить алгоритмы обработки и снизить цену изделия.

Литература

1. David E. E., Selfridge O. G. Eyes and Ears for Computers // Proceedings of the IRE. 1962. Vol. 50. Issue 5. Pp. 1093–1101. DOI: 10.1109/JRPROC.1962.288011.
2. Beni G., Hackwood S., Trimmer W. S. High-precision robot system for inspection and testing of electronic devices // Proceedings. 1984 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pp. 428–441. DOI: 10.1109/ROBOT.1984.1087192.
3. Дятлов Е. И. Машинное зрение (аналитический обзор) // Математические машины и системы. 2013. № 2. С. 32–40. ISSN 1028–9763.
4. Bahnbilder. URL: <http://www.bahnbilder.de/name/einzelbild/number/467577/kategorie/deutschland-gueterwagen-sonstige.html> (дата обращения: 15.07.2022).
5. IEC 62290–1:2014. Railway applications — Urban guided transport management and command/control systems — Part 1: System principles and fundamental concepts. 62 p.
6. Абрамова О. Техника маневрирования. Как работает локомотив-беспилотник на станции Лужская. URL: <https://gudok.ru/content/mechengineering/1571805/> (дата обращения: 12.07.2022).
7. Попов П. Пионеры автопилотирования. Когда пассажиров повезут поезда без машинистов. URL: <https://gudok.ru/content/blits/1584918/?ysclid=l6nemu2sgj616032330> (дата обращения: 15.07.2022).
8. Иванов Ю. А. Разработка локомотивной системы технического зрения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2014. 152 с.
9. Попов С. Б. Использование структурированной подсветки в системах технического зрения // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37. № 2. С. 233–238. ISSN 0134–2452.
10. Попов А., Маленко П. Машинное зрение: как научить локомотив помогать машинисту. URL: <https://www.iksmedia.ru/articles/5685849-Mashinnoe-zrenie-kak-nauchit-lokomo.html> (дата обращения: 15.07.2022).
11. Фролов Н. О., Елькин Е. М. Новый способ управления осью светового пучка прожектора локомотива в кривых участках пути // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 68–74. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-68-74. ISSN 1815–9400.
12. Способ коррекции направления светового потока прожектора подвижного состава при движении в кривых участках пути и система для осуществления этого способа / Н. О. Фролов, Е. М. Елькин: патент 2764399 Российская Федерация. № 2021109528; заявл. 06.04.2021; опубл. 17.01.2022, Бюл. № 2.

ВЫВОДЫ

Реализация специализированного освещения в системах машинного зрения — актуальная задача, требующая решения. При этом системы машинного зрения подвижного состава ограничены в выборе варианта освещения. Фактически единственно возможный осветитель — головной прожектор локомотива или вагона.

Чтобы удовлетворять всем требованиям систем машинного зрения, прожектор должен обеспечивать корректировку направления светового потока и регулировать яркость. В ходе выполненных исследований был предложен и описан светодиодный матричный прожектор, способный изменять угол направления оси светового потока и регулировать яркость для оптимального освещения рельсового пути и элементов инфраструктуры.

References

1. David E. E., Selfridge O. G. Eyes and Ears for Computers // Proceedings of the IRE. 1962. Vol. 50. Issue 5. Pp. 1093–1101. DOI: 10.1109/JRPROC.1962.288011.
2. Beni G., Hackwood S., Trimmer W. S. High-precision robot system for inspection and testing of electronic devices // Proceedings. 1984 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pp. 428–441. DOI: 10.1109/ROBOT.1984.1087192.
3. Dyatlov E. I. Computer vision (analytical overview) [Mashinnoe zrenie (analiticheskiy obzor)] // Mathematical machines and systems. 2013. No. 2. Pp. 32–40. ISSN 1028–9763.
4. Bahnbilder. URL: <http://www.bahnbilder.de/name/einzelbild/number/467577/kategorie/deutschland-gueterwagen-sonstige.html> (access date: 15.07.2022).
5. IEC 62290–1:2014. Railway applications — Urban guided transport management and command/control systems — Part 1: System principles and fundamental concepts. 62 p.
6. Abramova O. Manoeuvring technique. How unmanned locomotive works at Luzhskaya station [Tehnika manevrirovaniya. Kak rabotaet lokomotiv-bespiilotnik na stantsii Luzhskaya]. URL: <https://gudok.ru/content/mechengineering/1571805/> (access date: 12.07.2022).
7. Popov P. Pioneers of autopiloting. When trains will transport passengers without drivers [Pionery avtopilotirovaniya. Kogda passazhirovo pvezut poezda bez mashinistov]. URL: <https://gudok.ru/content/blits/1584918/?ysclid=l6nemu2sgj616032330> (access date: 15.07.2022).
8. Ivanov Yu. A. Development of locomotive system of technical vision [Razrabotka lokomotivnoy sistemy tekhnicheskogo zreniya]: PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2014. 152 p.
9. Popov S. B. The use of structured lighting in computer vision systems [Ispol'zovanie strukturirovannoy podsvetki v sistemakh tekhnicheskogo zreniya] // Computer Optics. 2013. Vol. 37. No. 2. Pp. 233–238. ISSN 0134–2452.
10. Popov A., Malenko P. Computer vision: How to teach a locomotive to help a driver [Mashinnoe zrenie: kak nauchit' lokomotiv pomogat' mashinistu]. URL: <https://www.iksmedia.ru/articles/5685849-Mashinnoe-zrenie-kak-nauchit-lokomo.html> (access date: 15.07.2022).
11. Frolov N. O., Elkin E. M. A new way to control axis of headlight light beam in curves [Novyy sposob upravleniya os'yu svetovogo puchka prozhektora lokomotiva v krivykh uchastkakh puti] // Transport of the Urals. 2020. No. 4 (67). Pp. 68–74. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-68-74. ISSN 1815–9400.
12. Method for adjustment of luminous flux direction of rolling stock headlight at movement in curves and system for realization of the method [Sposob korrektsii napravleniya svetovogo potoka prozhektora podvizhnogo sostava pri dvizhenii v krivykh uchastkakh puti i sistema dlya osushchestvleniya etogo sposoba] / N. O. Frolov, E. M. Elkin: patent 2764399 Russian Federation. No. 2021109528; filed 06.04.2021; publ. 17.01.2022, Bulletin No. 2.

УДК 624.01/04 (02)

Дмитрий Леонидович Худояров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Евгений Александрович Григорьев, технический директор ООО «СТМ–Сервис», Екатеринбург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОВЗОВ СЕРИИ 2ЭС6

Dmitriy Leonidovich Khudoyarov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Evgeniy Alexandrovich Grigoryev, Technical Director, LLC «STM-Service», Ekaterinburg, Russia

Peculiarities of haulage performance of 2ES6 electric locomotives

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы надежности тягового электрооборудования электровозов серии 2ЭС6. Представлен анализ тяговых характеристик электровоза, приведены альтернативные характеристики, снижающие нагрузку на тяговые двигатели. В качестве теоретического подтверждения эффективности предлагаемых изменений приведены результаты тяговых расчетов при использовании предложенных характеристик.

Ключевые слова: тяговые характеристики, тяговые двигатели, электровоз 2ЭС6, коэффициент использования мощности, длительная мощность, расчетная скорость движения.

Abstract

The paper considers issues of reliability of hauling electric equipment for 2ES6 electric locomotives. The authors present analysis of haulage performance of the electric locomotive and provide alternative characteristics that decrease load of traction motors. For the theoretical confirmation of efficiency of the proposed change they present results of grade computations at the use of the proposed characteristics.

Keywords: haulage performance, traction motors, 2ES6 electric locomotives, utilization factor, continuous power, design speed.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-82-85

Виды электровозов, производимые в настоящее время отечественными локомотивостроительными заводами, в том числе серии 2ЭС6, обладают несомненными преимуществами перед классическими моделями, созданными до 2000-х гг. Повышенная мощность, надежность в эксплуатации, улучшенные показатели эргономики — вот основные достоинства современного подвижного состава. Однако, несмотря на очевидные преимущества, локомотивы обладают и рядом конструктивных особенностей, которые оказывают серьезное влияние на реализацию тяговых свойств в эксплуатации [1].

Так, согласно статистическим данным, более 20 % причин, приводящих к выходу из строя электровозов с коллекторным приводом, приходится на долю тяговых двигателей.

Проблема эта известная, и потому конструкции локомотивов постоянно совершенствуются. Сегодня выпускаемые электровозы уже сильно отличаются от своих первоначальных прототипов — прежде всего за счет установки устройств защиты двигателей в аварийных режимах (УЗАРД), электромагнитных контакторов, усовершенствованных моделей преобразователей собственных нужд (ПСН) и 4-й модели тяговых электрических двигателей (ТЭД) 810-й серии, обладающих существенно более высокой надежностью. Тем не менее, несмотря на положительный эффект уже внедренных инноваций, проблема безотказности тяговых двигателей электровозов до сих пор находится в стадии решения [1–3].

Анализ файлов с регистраторов бортовых систем показывает, что многие случаи термического повреждения обмотки якорной цепи, соединений дополнительных полюсов и компенсационной обмотки происходят в момент перехода с группы соединений двигателей с серийно-параллельного на параллельное. Указанный переход, согласно тяговым характеристикам, выполняется при скоростях, превышающих «расчетную» для локомотива.

Тяговая характеристика электровозов серии 2ЭС6 (рис. 1) имеет стандартные ограничения по сцеплению, току, а также по коммутации. Необходимо отметить особенность тяговых характеристик современных электровозов с независимым и программно-формируемым возбуждением: тип такой характеристики уже можно отнести к площадной, а не к стандартной линейной, что создает возможности большего регулирования [4–5].

Для обозначения зоны тяговой характеристики можно воспользоваться зависимостью силы тяги от скорости движения, полученной при постоянстве длительной мощности [6]. Таким образом, мы получаем зону, в которой тяговое оборудование будет работать с повышенной нагрузкой и определенным перегревом, допустимым в эксплуатации (на рис. 1 обозначена заштрихованной областью).

Для удобства анализа тяговых характеристик будем применять коэффициент использования мощности, где за единицу принимается мощность электровоза в продолжительном режиме $K_{M\infty} = 1$.

В качестве ограничителя может выступать время работы в зоне указанной характеристики (рис. 2). Приведенная зависимость допустимого времени работы от коэффициента использования мощности, полученная с помощью тепловой характеристики одного из ТЭД 810-й серии, позволяет вносить определенные ограничения по времени работы электровоза при определенных реализуемых мощностях.

В свою очередь, к вопросу ограничения нагрузки в зоне интенсивной работы оборудования можно подойти более принципиально. В качестве одного из простейших решений можно рассмотреть использование меньшей степени ослабления поля. Так, на рис. 3 представлена зависимость силы тяги от скорости при коэффициенте ослабления $\beta = 0,6$. При этом площадь характеристики, при которой идет интенсивная работа, существенно сокращается. Однако вместе с этим возникает и ожидаемый отрицательный результат — эффективность работы электровоза также существенно снижается.

Чтобы избежать подобного эффекта, можно сформировать совершенно новую тяговую характеристику, которая будет выступать как ограничение, обозначенное на рис. 3 индексом M (линия синего цвета). В этом случае можно получить такое ограничение, которое будет близко к существующим характеристикам, и в то же время использовать преимущества кривой, полученной при условии соблюдения постоянства длительной мощности. При работе с таким ограничением реализуется коэффициент использования длительной мощности до $K_{M\infty} = 1,24$.

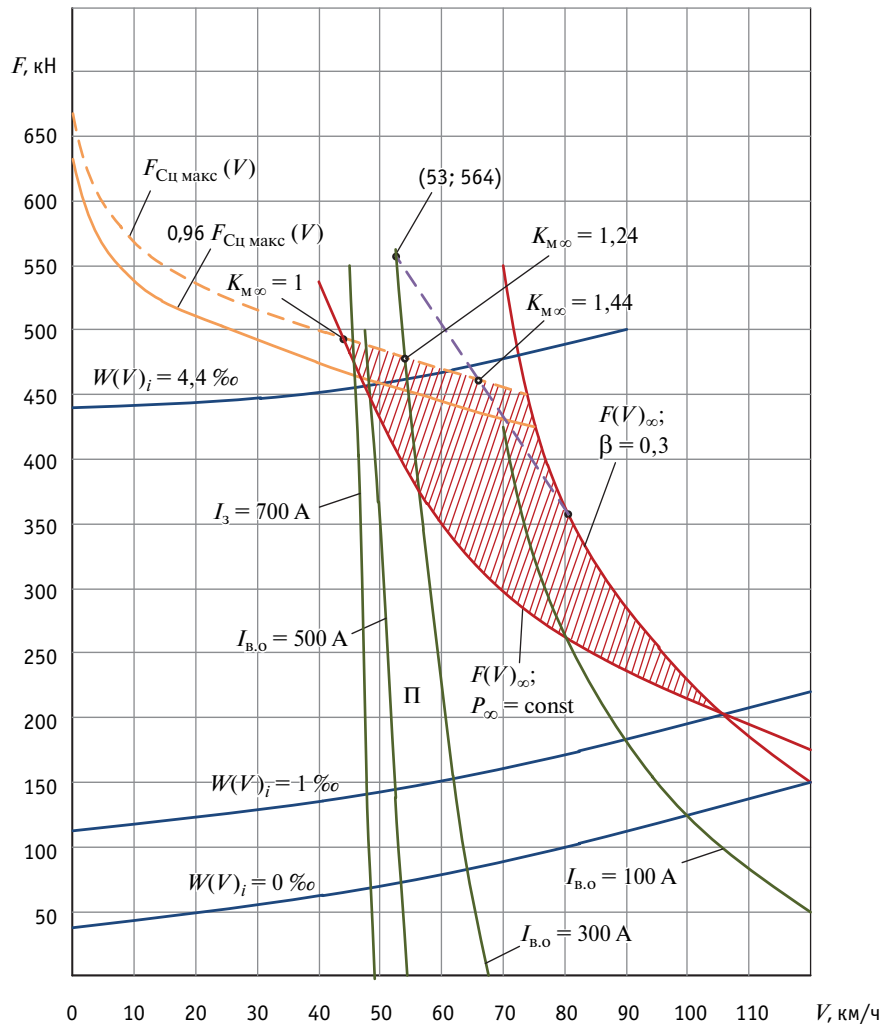


Рис. 1. Тяговая характеристика электровозов серии 2ЭС6

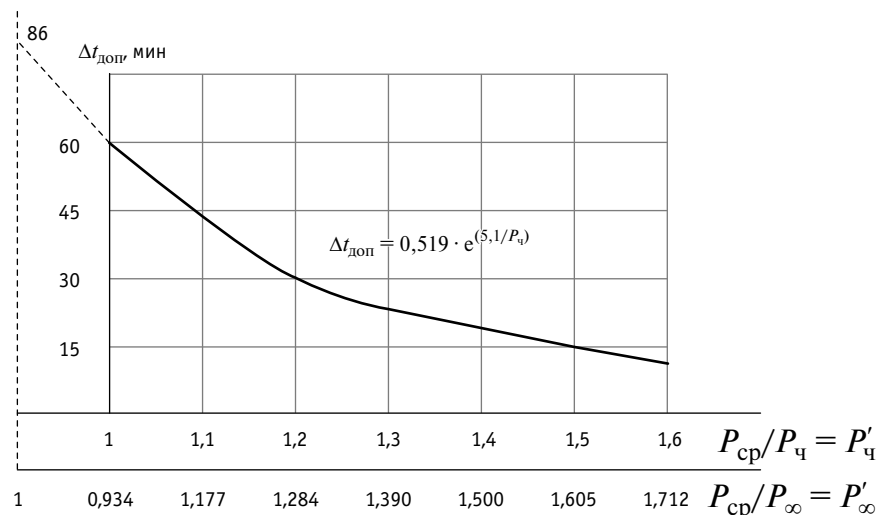


Рис. 2. Допустимое время работы электровоза при нагреве

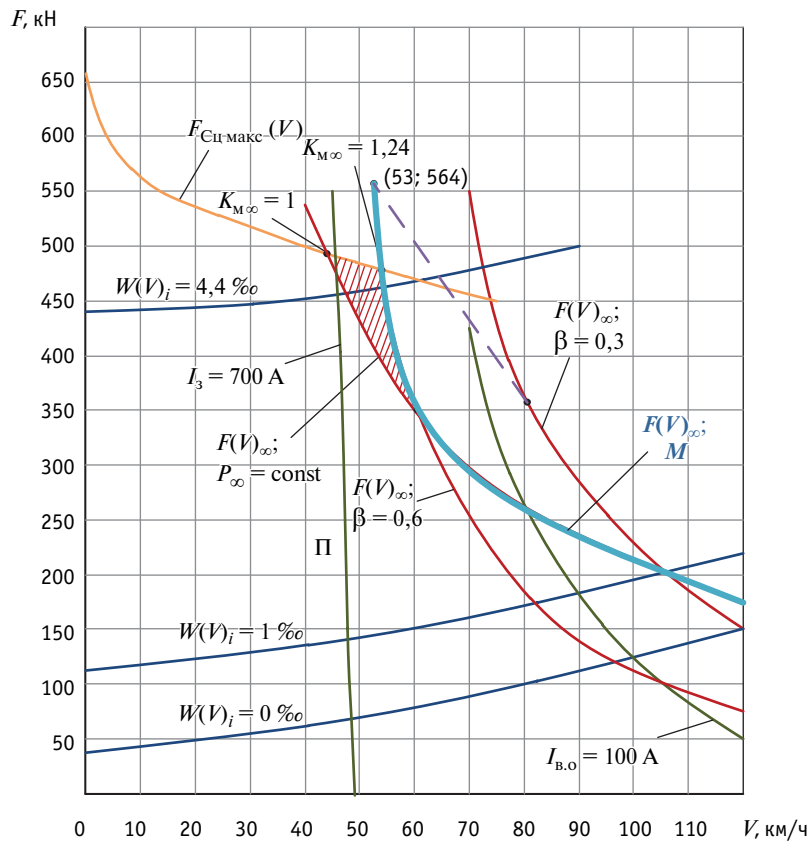


Рис. 3. Вариативные тяговые характеристики

Таблица 1

Результаты тяговых расчетов для участка Екатеринбург — Шаля при массе состава 5100 т

Электровоз	F_k , кН	V_{\min} , км/ч	A , у. ед.	$K_{\text{нм}\infty}$	$F_{k\infty}$
2ЭС6	464	51	105	0,98	$63 \cdot e^{129/V}$
2ЭС6-06	478	46	99,7	0,84	$14 \cdot e^{129/V}$
2ЭС6М	480	46	102	0,9	$68 \cdot e^{106/V}$

Примечание. F_k — сила тяги; V_{\min} — минимально реализуемая скорость; A — расход топливно-энергетических ресурсов; $K_{\text{нм}\infty}$ — коэффициент использования мощности в длительном режиме; $F_{k\infty}$ — реализуемая сила тяги при заданном коэффициенте использования мощности.

Таблица 2

Результаты тяговых расчетов для участка Екатеринбург — Камышлов при массе состава 8000 т

Электровоз	$T_{\text{уч}}$, ч	V_{\min} , км/ч	A , у. ед.	$K_{\text{нм}\infty}$	$F_{k\infty}$
2ЭС6	2,1	56	103,8	1,09	$63 \cdot e^{129/V}$
2ЭС6 ($\beta = 06$)	2,3	46,2	98,3	0,86	$14 \cdot e^{129/V}$
2ЭС6М	2,2	50	100,76	0,96	$68 \cdot e^{106/V}$

Примечание. $T_{\text{уч}}$ — время хода по участку.

Для предварительной оценки эффективности экспериментальной тяговой характеристики воспользуемся тяговыми расчетами. На основании показателей, приведенных в табл. 1, можно сделать следующий вывод: для участка Екатеринбург — Шаля, характерного для Свердловской железной дороги в плане сложности преодоления, состав массой 5100 т удастся провести только со скоростью 46 км/ч как для имеющегося варианта ослабления поля 0,6, так и для предлагаемого варианта с индексом M . При этом коэффициент использования длительной мощности сокращается с 0,98 до 0,9 по сравнению с полным использованием возможностей возбуждения.

Для сравнения аналогичным образом проведем расчеты на участке Камышлов — Екатеринбург, где идет интенсивное использование электровозов рассматриваемой серии (табл. 2). В этом случае видно незначительное снижение тяговых свойств, позволяющее использовать кривую $(F_{k\infty} M)$ при $K_{\text{нм}\infty}$ менее 1. Увеличение времени хода также будет незначительным.

Несмотря на снижение минимально возможной реализуемой скорости, она будет находиться в пределах, рекомендованных предприятием-изготовителем, т. е. от 35 до 50,5 км/ч.

Таким образом, на основании изложенного можно сделать следующие выводы:

снижение нагрузки на тяговое оборудование программными средствами без серьезного вмешательства в конструкцию локомотива возможно осуществить за счет пересмотра действующих ограничений;

влияние предлагаемых ограничений будет выражаться в потере тяговых свойств и сокращении минимально реализуемой скорости около 7–8 %, что для большинства участков не является критичным;

представленное исследование подтверждает возможность получения положительного эффекта при незначительной потере тяговых свойств.

Литература

1. Михальчук Н. Л., Попов Ю. И., Зак В. В. Как повысить эффективность тяговых свойств электровозов // Локомотив. 2019. № 5 (749). С. 5–6. ISSN 0869–8147.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Москва : ОАО «РЖД», 2014. 516 с.
3. Дурандин М. Г., Иванов И. Г. Анализ потенциальной устойчивости тяговых электродвигателей грузовых электровозов 2ЭС6 // Транспорт Урала. 2015. № 1 (44). С. 84–91. ISSN 1815–9400.
4. Брексон В. В., Никифорова Н. Б., Струннов А. А. Электровоз 2ЭС6 «Синара» / Под ред. В. В. Брексона. Верхняя Пышма : ООО «Уральские локомотивы», 2015. 326 с.
5. Игин В. Н. Оценка тяговых свойств локомотивов // Локомотив. 2021. № 2 (770). С. 40–43. ISSN 0869–8147.
6. Бегагоин Э. И., Худояров Д. Л., Кукушкин В. А. Сравнительный анализ тяговых свойств грузовых электровозов VL11, 2ЭС6, 2ЭС10 // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 105–109. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-105-109. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,4 авторских листа

References

1. Mikhailchuk N. L., Popov Yu. I., Zak V. V. How to increase haulage performance of electric locomotives [Kak povysit' effektivnost' tyagovykh svoystv elektrovozov] // Locomotive. 2019. No. 5 (749). Pp. 5–6. ISSN 0869–8147.
2. Rules of traction calculations for train work [Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty]. Moscow : JSC «RZD», 2014. 516 p.
3. Durandin M. G., Ivanov I. G. Analysis of potential stability of electric traction motors of 2ES6 electric freight locomotive [Analiz potentsial'noy ustoychivosti tyagovykh elektrodvigateley gruzovykh elektrovozov 2ES6] // Transport of the Urals. 2015. No. 1 (44). Pp. 84–91. ISSN 1815–9400.
4. Brekson V. V., Nikiforova N. B., Strunnov A. A. Electric locomotive 2ES6 «Sinara» [Elektrovoz 2ES6 «Sinara»] / Ed. by V. V. Brekson. Verkhnyaya Pyshma : Ural Locomotives, 2015. 326 p.
5. Igin V. N. Assessment of haulage performance of locomotives [Otsenka tyagovykh svoystv lokomotivov] // Locomotive. 2021. No. 2 (770). Pp. 40–43. ISSN 0869–8147.
6. Begagoin E. I., Khudoyarov D. L., Kukushkin V. A. Comparative analysis of traction characteristics of freight locomotives VL11, 2ES6, 2ES10 [Sravnitel'nyy analiz tyagovykh svoystv gruzovykh elektrovozov VL11, 2ES6, 2ES10] // Transport of the Urals. 2016. No. 2 (49). Pp. 105–109. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-105-109. ISSN 1815–9400.

УДК 621.314.212:621.315.626

Андрей Альбертович Кузнецов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Виктор Васильевич Харламов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Мария Андреевна Волчанина, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Andrey Albertovich Kuznetsov, DSc in Engineering, Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Viktor Vasilyevich Kharlamov, DSc in Engineering, Professor, Head of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Mariya Andreevna Volchanina, postgraduate student, Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Increase of efficiency of insulation diagnostics for high-voltage bushing of three-phase transformers

Аннотация

В статье рассмотрены технические средства и методы диагностирования изоляции высоковольтных вводов силовых трансформаторов, отмечены достоинства и недостатки существующих методов, а также предложено новое решение для бесконтактного диагностирования на основе измерения параметров электрического поля вблизи поверхности вводов.

Для контроля технического состояния вводов силовых трансформаторов разработана схема размещения элементов мобильного устройства диагностирования. Наличие дефекта в изоляторе приводит к перераспределению электрических потенциалов на емкостных элементах высоковольтного ввода и к изменению напряженности электрического поля вокруг дефектного ввода.

Предложенная конструкция дает возможность быстро монтировать устройство на корпусе силового трансформатора без отключения последнего, а также выявлять неисправный ввод по изменению напряженности поля (датчики электрического поля размещены в непосредственной близости от диагностируемых вводов). Разработанная методика диагностирования состояния вводов силовых трансформаторов, основанная на анализе данных распределения электрического поля, позволяет определять техническое состояние вводов в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, высоковольтные вводы, диагностирование изоляции, напряженность электрического поля, датчики электрического поля.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-86-93

Abstract

The paper considers technical means of methods for diagnostics of insulation of high-voltage bushing for power transformers. It also points out advantages and disadvantages of existing methods and proposes a new solution for contactless diagnostics on the basis of measurement of electric field parameters near the surface of bushing.

For control of technical condition of power transformers bushing the authors have developed a scheme for placement of elements of portable diagnostics device. A defect in the insulator leads to redistribution of electric potentials on capacitive elements of the high-voltage bushing and to change of electric field intensity around the fault bushing.

The proposed design allows fast mounting of device on the power transformer body without its shutdown and revealing of fault bushing according to change of field intensity (sensors of electric field are located near bushing). The developed method for diagnostics of condition of power transformers bushing based on analysis of data of electric field distribution allows determining technical condition of bushing in operation conditions.

Keywords: power transformers, high-voltage bushing, insulation diagnostics, electric field intensity, sensors of electric field.

Диагностированию состояния изоляции вводов и главной изоляции силовых трансформаторов посвящено большое число исследований, поскольку своевременное выявление дефектов и проведение технического обслуживания повышает эффективность эксплуатации дорогостоящего оборудования и продлевает его рабочий ресурс. В настоящее время применяется много различных методов и технических средств диагностирования [1], причем все их можно условно разделить на стационарные и переносные.

К достоинствам стационарных методов следует отнести непрерывный мониторинг и сопряжение с автоматизированными системами управления подстанциями. Переносные системы могут применяться на объектах, распределенных на значительном расстоянии друг от друга (например, системы электроснабжения железнодорожного транспорта), в том числе в тех случаях, когда использовать стационарные системы экономически нецелесообразно. Применение систем диагностирования, основанных на различных физических принципах, повышает достоверность выходной диагностической информации об объекте.

Рассмотрим укрупненно конструкцию высоковольтных вводов (ВВ) силовых трансформаторов и распространенные системы диагностирования состояния их изоляции замещения (рис. 1) [2].

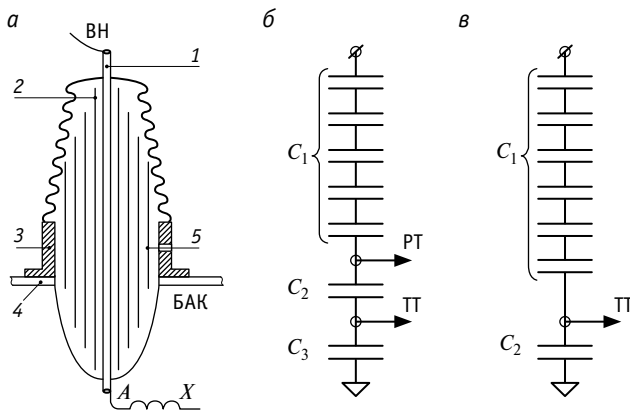


Рис. 1. Конструкция высоковольтного ввода (а) и электрические схемы изоляции замещения (б, в):

- 1 — токопроводящая труба; 2 — обкладки из фольги;
- 3 — металлическое конструктивное кольцо;
- 4 — крышка бака трансформатора; 5 — измерительный вывод

Основная изоляция высоковольтного ввода изготавливается в виде набора изоляционных промежутков (картон, RIP-изоляция), разделенных проводящими обкладками из фольги 2, которую можно представить как набор последовательно включенных конденсаторов (см. рис. 1а). Для равномерного распределения электрического потенциала конденсаторы должны иметь одинаковую емкость, поэтому по мере удаления от центрального проводника 1 площадь слоев фольги уменьшается.

Для диагностирования состояния изоляции вводов используется измерительный вывод 5 ТТ (Test Tap), подключенный к крайней наружной обкладке, который в процессе работы обязательно заземляется. В некоторых вводах предусмотрен дополнительный вывод от предпоследней обкладки,

обозначенный РТ (Potential Tap), он используется для отбора мощности в системах управления и контроля.

Электрическая схема замещения ввода с одним выводом ТТ состоит из двух емкостей C_1 и C_2 , включенных последовательно. Высоковольтный ввод с двумя выводами ТТ и РТ представляет собой схему замещения из трех емкостей C_1 , C_2 и C_3 , также включенных последовательно (см. рис. 1б и 1в).

В современных системах мониторинга и защиты высоковольтных вводов контролируются три наиболее важных параметра изоляции. Первый из них — тангенс угла потерь в изоляции вводов, измеренный в абсолютных единицах или по сравнительной схеме. Этот параметр используется при измерениях на отключенном оборудовании и характеризует относительную величину активных потерь в изоляции ввода, возрастающую при возникновении дефектов.

Второй параметр — величина емкостного тока проводимости изоляции ввода (рис. 2), в основном зависящая от величины емкости C_1 . При аварийном перекрытии одной или нескольких обкладок, происходящем в случае возникновения и развития локальных дефектов, ток проводимости увеличивается, что обусловлено уменьшением количества последовательно включенных конденсаторов C_{1k} , а следовательно, снижением величины емкостного сопротивления изоляции.

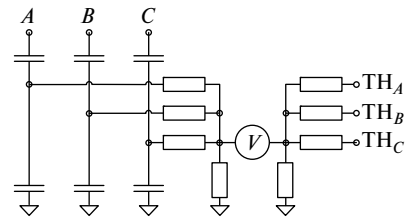


Рис. 2. Электрическая схема измерения емкостного тока проводимости

Третий информативный параметр — амплитуда, интенсивность и распределение частичных разрядов, возникающих в изоляции ввода практически при всех дефектах. По мере увеличения дефекта в изоляции будут возрастать количество частичных разрядов, их интенсивность, амплитуда.

В балансной измерительной схеме три фазных тока проводимости изоляции вводов суммируются на общем резисторе. Выходной сигнал схемы пропорционален векторной сумме фазных токов.

Высоковольтный ввод является источником тока, поскольку его внутреннее сопротивление составляет порядка десятка мегаом, а внешние резисторы R_{Φ} , имеющие сопротивление менее 1 кОм, не влияют на точность измерения токов проводимости.

Величина сопротивления R_{Φ} , включенного в каждой фазе, существенно меньше, чем величина сопротивления X_{C2} , т.е. емкость C_2 практически не оказывает влияния на точность проводимых измерений. Поэтому при изменении величины сопротивления R_N можно менять чувствительность средств измерения токов проводимости.

Три фазных напряжения, полученные от стандартного измерительного трансформатора напряжения (ТН), используются для определения тангенса угла потерь в изоляции вводов.

Таблица 1

При помощи дополнительных резисторов, включенных по схеме «звезда», производится векторное суммирование токов утечки и определяется небаланс питающей сети.

Описанные выше решения используются в стационарных системах мониторинга и диагностирования состояния изоляции высоковольтных вводов силовых трансформаторов с передачей данных в автоматизированные системы электрических подстанций.

Проанализируем возможность создания мобильных систем диагностирования для быстрого переноса средств измерения на диагностируемые силовые трансформаторы. В качестве измеряемого параметра рассмотрим электрическое поле вблизи высоковольтных вводов.

Для высоковольтных вводов, работающих на напряжении 110 кВ, происходит равномерное распределение потенциалов при условии равенства составляющих емкостей C_{1k} . Электрическое поле будет монотонно убывать по мере удаления от центрального проводника. При возникновении дефектов изоляции в изоляционных промежутках возникают частичные разряды, которые, развиваясь, способны образовывать каналы проводимости между соседними обкладками из фольги. Как следствие, электрическая емкость гальванически соединенных пластин повышается, а общее количество емкостей уменьшается. Это приводит к тому, что напряжение на каждой из новых емкостей увеличивается, соответственно возрастает напряженность поля между обкладками.

Например, в работе [3] представлены данные об изменении емкостей в изоляции высоковольтного ввода при уменьшении сопротивления между обкладками из фольги. В частности, приведены результаты эксперимента по закорачиванию одного и двух изоляционных промежутков между обкладками, включавшего измерения, выполненные в лабораторных условиях и при помощи автоматизированного диагностического оборудования (онлайн) (табл. 1).

Изменение электрического поля может быть вызвано также технологическими и эксплуатационными дефектами [4]: микроразмерными воздушными полостями, посторонними включениями, трещинами и др. Микропустоты в структуре изоляции заполняются газом, водяными парами и влагой. В результате изменения диэлектрической постоянной среды образуются неоднородные электрические поля [5], которые можно разделить на два вида: слабонеоднородные и резконеоднородные по параметру коэффициента неоднородности k_H .

Коэффициент неоднородности определяется по выражению

$$k_H = \frac{E_{\max}}{E_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где E_{\max} — максимальная напряженность электрического поля, кВ/мм;

$E_{\text{ср}}$ — средняя напряженность электрического поля кВ/мм,

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{L}, \quad (2)$$

где U — действующее значение напряжения, кВ;

L — расстояние между потенциальными поверхностями, мм.

Результаты измерения электрических характеристик высоковольтного ввода

№ опыта	$U_{\text{ф}},$ кВ	$I_{\text{изм}},$ мА	$C_{\text{расч}},$ пФ	$C_{\text{паспорт}},$ пФ	Отличие, % $C_{\text{расч}}/C_{\text{паспорт}}$
Измерения в лабораторных условиях					
1	10	–	256,71	252,1	1,83
2	10	–	266,53	252,1	5,72
3	10	–	281,99	252,1	11,86
Измерения на силовом трансформаторе (онлайн)					
4	64,1	5,13	254,88	252,1	1,1
5	64,1	5,46	269,94	252,1	7,07
6	64,1	5,72	284,19	252,1	12,7

Примечание. Опыты 1–3 выполнены в лабораторных условиях при пониженном напряжении с измерением параметров до закорачивания изоляционных промежутков, после закорачивания одного изоляционного промежутка и после закорачивания двух изоляционных промежутков. Опыты 4–6 выполнены на силовом трансформаторе (онлайн) при рабочем напряжении — указаны значения до закорачивания изоляционных промежутков, после закорачивания одного изоляционного промежутка и после закорачивания двух изоляционных промежутков между пластинами. Отклонение значений емкости составило более 7 и 12 % при рабочем напряжении от заводских (паспортных) значений и более 5 и 10 % при лабораторных испытаниях.

Принято считать, что для слабонеоднородных электрических полей коэффициент неоднородности принимает значения $k_H < 2$. В слабонеоднородных полях идет постепенное развитие частичных разрядов и разрядного канала. При $k_H \geq 4$ электрическое поле относят к резконеоднородным.

Нарушение маслобарьерной изоляции в неоднородных электрических полях происходит вблизи электродов с наименьшими радиусами кривизны, т.е. там, где напряженность электрического поля максимальна.

Таким образом, появление критических частичных разрядов в жидком диэлектрике приводит к постепенному электрическому старению в случае однородных и слабонеоднородных полей и к полному пробою промежутков под действием критических частичных разрядов для резконеоднородных полей.

При моделировании изменений квазистатического электрического поля (изменяющегося относительно медленно с частотой 50 Гц) можно использовать одну из систем компьютерного моделирования, построенную на методе конечных элементов. Рассмотрим двумерную осесимметричную расчетную модель в цилиндрической системе координат, основанную на уравнениях:

$$\nabla \cdot [\sigma \nabla \phi + j\omega \epsilon_0 \epsilon_r \nabla \phi] = 0; \quad (3)$$

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = (\omega \epsilon_0 \epsilon_r \text{tg} \delta + \sigma) |\dot{E}|^2, \quad (4)$$

где σ — электропроводность среды, См;

ϕ — электрический потенциал (напряжение), В;

ω — угловая частота, рад/с;
 ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м;
 ϵ_r — диэлектрическая проницаемость материала (относительное значение), Ф/м;
 λ — теплопроводность среды, Вт/(м·К);
 T — температура, °С;
 $\text{tg } \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь;
 \vec{E} — напряженность электрического поля, В/м.

В уравнении (4) учитываются источники нагрева — джоулево тепло и диэлектрические потери в изоляции.

При моделировании электрического поля использованы следующие граничные условия: на границе центрального проводника $\dot{\varphi} = U$; на обкладках промежуточных емкостей C_{1k} потенциал делится на количество промежуточных емкостей $\dot{\varphi} = U/k$; на границе корпуса трансформатора и обкладке емкости C_2 потенциал $\dot{\varphi}$ равен 0; на других границах задается осевая симметрия и выполняется условие Неймана $\partial\dot{\varphi}/\partial n = 0$ (n — единичный вектор внешней нормали).

Уровень электрического поля, достигаемый в области включения в изоляции, служит важным параметром с точки зрения возможности возникновения ионизации и разрядных процессов, которые могут вести к разрушению диэлектрика. При достижении некоторого критического значения электрического поля в этой области возникают критические разряды. Такое значение поля для газового включения в изоляции определяется следующим выражением [4], кВ/мм:

$$E_{кр} = k \cdot P^{0,7} \cdot d^{-0,3}, \quad (5)$$

где k — константа для воздуха, $k = 8 \cdot 10^{-3}$;
 P — давление газа внутри включения, мм рт. ст.;
 d — диаметр, мм.

При моделировании были заданы следующие физические свойства каждого элемента модели [5]: центральный проводник выполнен из стали, изоляция — из картона с диэлектрической проницаемостью 4; удельная проводимость равна 1 нСм/м; фазное напряжение $U = 64,1$ кВ; пространству вокруг изоляции присвоена среда «трансформаторное масло»; диэлектрическая проницаемость масла — 2,2, проводимость — 1 пСм/м. С учетом таких допущений критическая напряженность $E_{кр} = 11,43$ кВ/мм; в средней части высоковольтного ввода с наружной стороны $E_{ср} = 4,83$ кВ/мм; в промежутке между центральным проводником и первой обкладкой $E_{max} = 7,75$ кВ/мм.

Распределение электрического поля при контроле высоковольтных вводов на силовом трансформаторе, содержащем два исправных и один неисправный ВВ, показано на рис. 3. График распределения напряженности электрического поля исправных высоковольтных вводов представляет собой симметричную линию с тремя максимумами, соответствующими измерениям на минимальном расстоянии от каждого из контролируемых вводов, а значение сигнала СУМ (см. рис. 3) будет близко значению средней напряженности электрического поля $E_{ср}$. При выходе из строя одного из высоковольтных вводов по причине уменьшения сопротивления изоляции напряженность поля

вблизи от его поверхности растет [6]. На рис. 3 приведены графики возникновения дефектов на правом, среднем и левом высоковольтном вводе, сопровождающихся увеличением напряженности поля вблизи от поверхности соответствующего ввода. Превышение электрическим полем уровня среднего значения СУМ соответствует появлению дефекта изоляции одной из фаз.

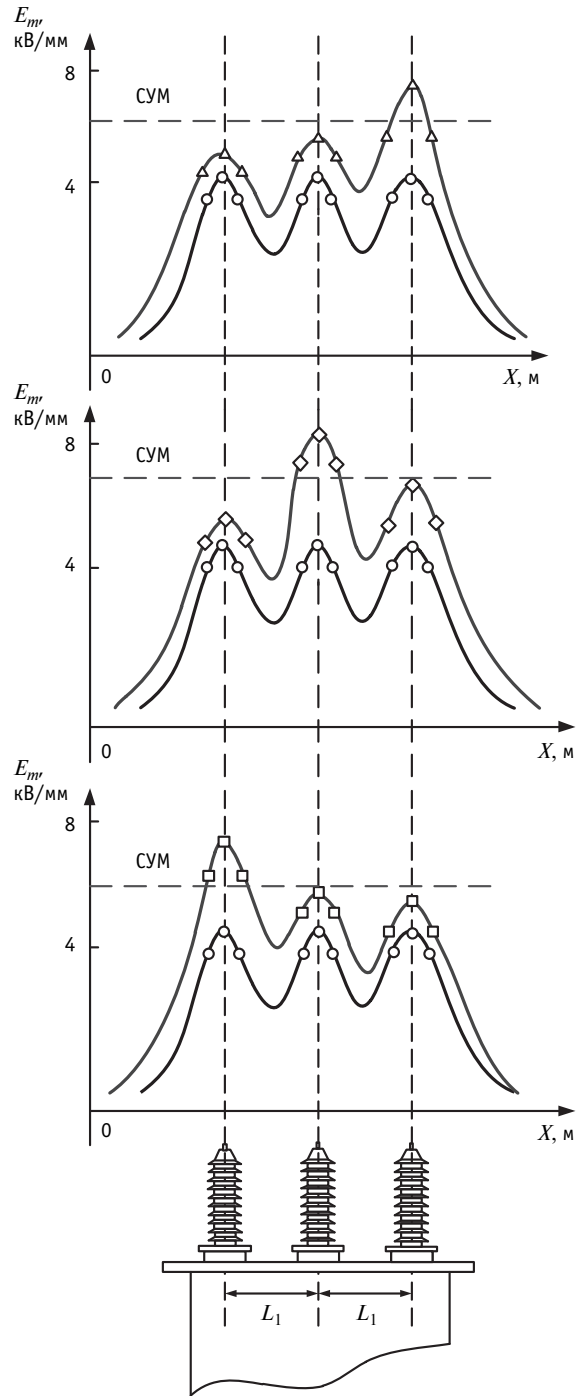


Рис. 3. Измеренные параметры электрического поля:
 —□— дефект левого; —△— дефект правого;
 —◇— дефект среднего; —○— исправный

Рассмотрим известные технические средства и методы диагностирования изоляции высоковольтных вводов силовых трансформаторов для бесконтактного диагностирования на основе измерения параметров электрического поля вблизи их поверхности.

Бесконтактная дистанционная диагностика состояния высоковольтных полимерных изоляторов исследуется в работе [7]. Осуществляется пассивный прием одновременно электромагнитного и акустического излучений от частичных разрядов. Компьютерная обработка сигналов выполняется путем определения в каждом из дискретных интервалов фазового напряжения средних значений числа и интенсивности импульсов реальных зарядов, которые превышают допустимый порог, соответствующий дефекту или его развитию.

Другой способ контроля технического состояния элементов высоковольтного оборудования представлен в работе [8]. Он включает экспериментальные исследования электромагнитных излучений (ЭМИ) для оценки величины интервала времени T , на котором спектр ЭМИ с достаточной достоверностью можно считать стационарным случайным процессом. Затем численным анализом зафиксированных спектров формируют совокупность количественных критериев. При последующем мониторинге сравнение со сформированными критериями позволяет судить о состоянии высоковольтного оборудования или наличии дефектов в отдельных его узлах.

В устройстве для автоматизированного контроля состояния бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа трехфазного высоковольтного электротехнического оборудования под рабочим напряжением по параметрам частичных разрядов [9] реализован метод фазового баланса. Устройство содержит в каждом из трех каналов измерения блок присоединения к объекту, блок защиты от аварийных и коммутационных перенапряжений, к которому присоединены соответствующий вход блока коммутатора измерительных каналов фаз и полосовые фильтры, формирователь временного окна, вычислительно-логический блок и подключенный к последнему блок сигнализатора превышения допустимого уровня частичных разрядов в фазах объекта контроля. Сигнал «Тревога» формируется с выхода вычислительно-логического блока, когда по одному из диагностируемых высоковольтных вводов в каналах измерения допустимый уровень превышает.

Недостатки рассмотренных методов измерения [8, 9] состоят в том, что они являются контактными с регистрацией частичных разрядов. Если говорить о бесконтактном методе регистрации электромагнитного излучения при помощи направленных антенн на значительном расстоянии [7], то для него характерны низкая точность и селективность, что связано с возможным наложением электромагнитных помех на полезный сигнал.

Повысить эффективность и быстродействие процесса определения дефектов изоляции высоковольтных вводов трехфазных трансформаторов можно на основе использования бесконтактного метода измерения параметров электрического поля вблизи поверхности ВВ.

Авторами статьи предложено выполнить блоки присоединения к объекту бесконтактными — в виде датчиков электрического поля, расположенных на изолирующих штангах.

Выходы датчиков при помощи соединительных проводов соединены с блоками защиты от аварийных и коммутационных перенапряжений, а выходы фильтров низких частот — со входами трех дополнительно введенных амплитудных детекторов. Для переключения трех фаз при измерениях электрического поля использован коммутатор измерительных каналов фаз. Дополнительно введенный сумматор и блок коммутатора измерительных каналов фаз соединены со входами компаратора, выход которого соединен со входом вычислительно-логического блока.

В состав предлагаемого переносного устройства бесконтактного диагностирования (рис. 4) входят: три блока присоединения к объекту — БПО_А (1), БПО_В (2), БПО_С (3), содержащих датчики электрического поля D_A, D_B, D_C , изоляционные штанги ИШ_А, ИШ_В, ИШ_С и блоки защиты от аварийных и коммутационных перенапряжений БЗ_А, БЗ_В, БЗ_С; прибор измерения и контроля (ПИК) (4), включающий три фильтра низких частот ФНЧ_А (5), ФНЧ_В (6), ФНЧ_С (7) с полосой пропускания 0–50 Гц; три амплитудных детектора АД_А (8), АД_В (9), АД_С (10), блок коммутатора измерительных каналов фаз (БК) (11), сумматор (СУМ) (12), компаратор (К) (13), вычислительно-логический блок (ВЛБ) (14) и блок-сигнализатор превышения допустимого уровня (БС) (15).

Работу устройства можно пояснить следующим образом. Датчики D_A, D_B, D_C накапливают заряд под действием электрического поля, которое создается входным напряжением, подведенным к высоковольтным вводам ВВ по трем фазам A, B, C . Выходы датчиков при помощи проводов, проходящих внутри изолирующих штанг ИШ, соединены с блоками защиты от аварийных и коммутационных перенапряжений БЗ_А, БЗ_В, БЗ_С. Эти блоки предназначены для защиты измерительной части устройства от перенапряжений, которые могут возникнуть при контакте датчиков с элементами объекта контроля.

Три фильтра низких частот снижают влияние высокочастотных помех, образующихся при работе высоковольтного трансформатора. Амплитудные детекторы выделяют амплитудные значения по каждой фазе (E_m). При помощи блока коммутации постоянное значение сигнала по каждой фазе, пропорциональное амплитудному значению напряженности поля для каждого из контролируемых вводов, передается на первый вход компаратора. На другой вход компаратора подается сигнал с выхода сумматора, формирующего усредненный сигнал сравнения, пропорциональный среднему значению суммы напряженностей по каждой фазе (E_{mA}, E_{mB}, E_{mC}).

В случае исправных ВВ сигнал по каждой фазе на выходах АД не превышает сигнал на выходе СУМ ввиду симметрии входного напряжения, тогда на выходе К сохраняется сигнал нулевого логического уровня. При нарушении изоляции по любой из фаз высоковольтных вводов сигнал на выходе соответствующего АД увеличивается, следовательно, уровень сигнала СУМ также увеличится. Следует отметить, что на фазе с нарушенной изоляцией сигнал с выхода АД будет превышать сигнал СУМ, тогда на выходе К появится сигнал высокого логического уровня, формирующий прерывание для микропроцессора в составе ВЛБ, который передает на блок сигнализации (БС) сигнал «Тревога».

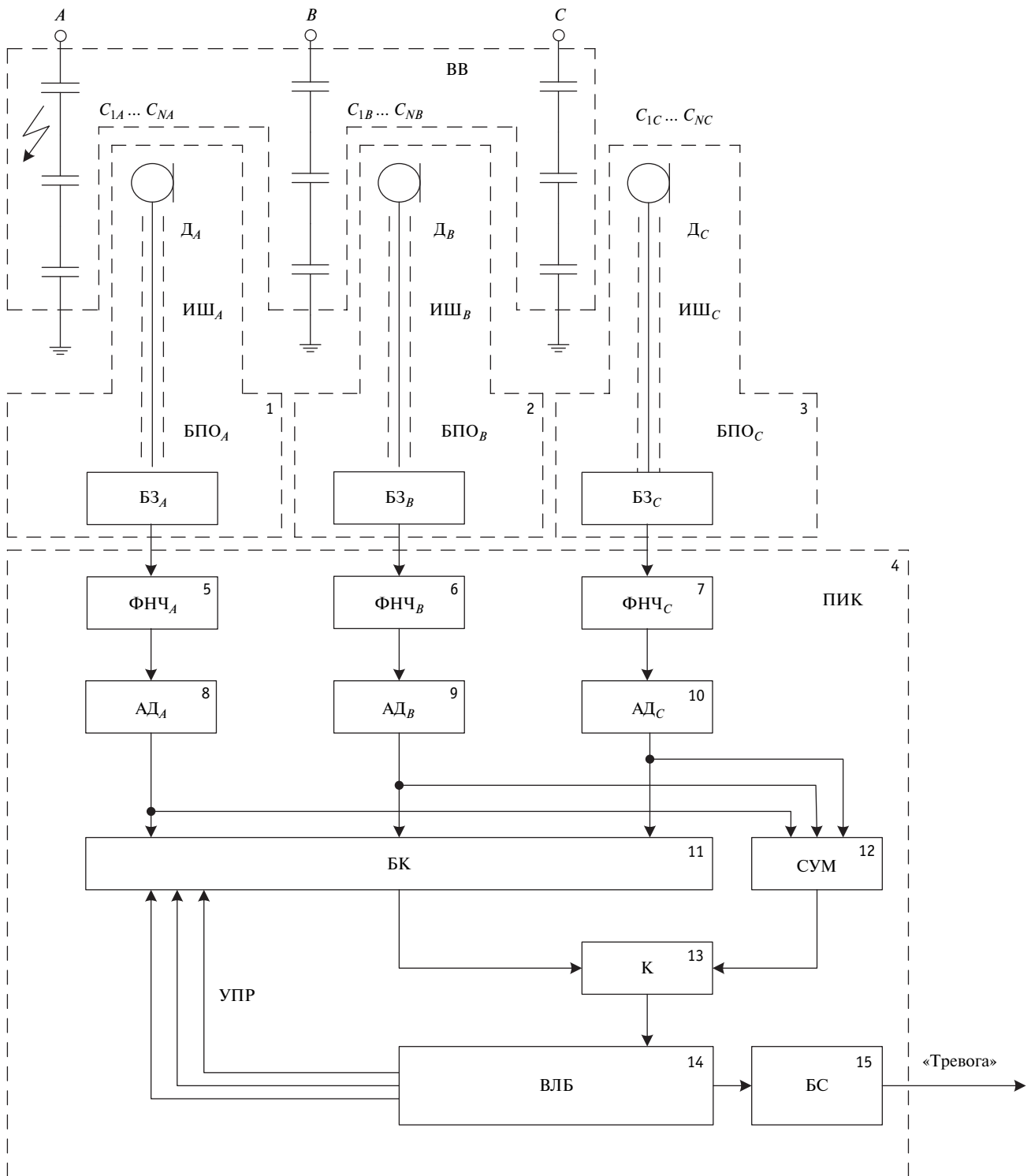


Рис. 4. Функциональная схема измерителя параметров электрического поля

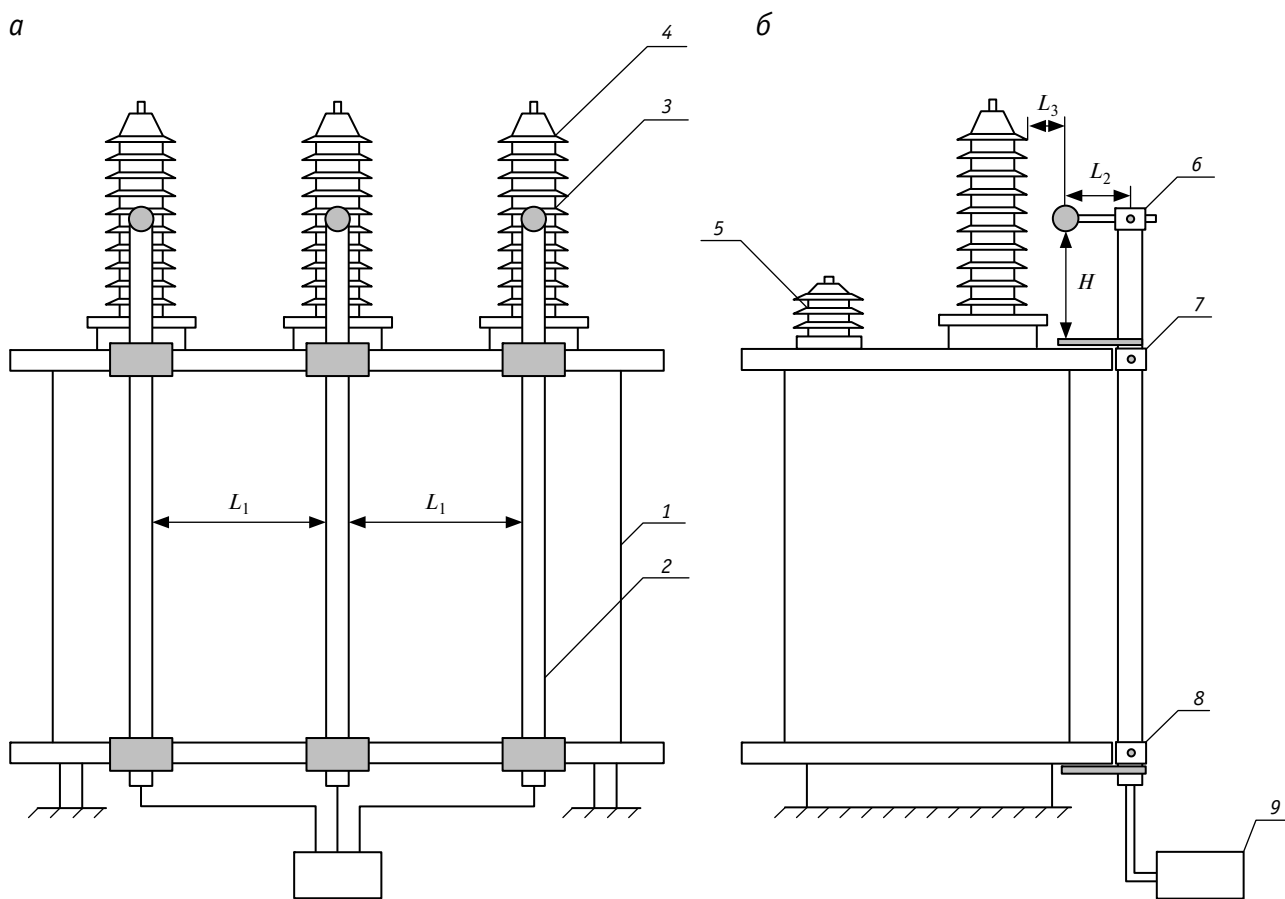


Рис. 5. Расположение элементов устройства диагностирования на трехфазном трансформаторе:
а — вид спереди; б — вид сбоку

Наличие дефекта в изоляторе приводит к изменению диэлектрической проницаемости изолирующей части и, как правило, к увеличению напряженности электрического поля вокруг дефектного ввода [10].

Схема установки элементов переносного устройства диагностирования состояния изоляции высоковольтных вводов на трехфазном трансформаторе показана на рис. 5 [6].

На каждой из трех изолирующих штанг типа ИШ 2 закрепляется датчик электрического поля 3. Измерительный прибор 9, к которому передаются сигналы с датчиков 3, осуществляет коммутацию, преобразование и выполнение логической функции контроля состояния изоляции.

Состояние высоковольтных вводов 4, расположенных на верхней площадке корпуса трансформатора 1, диагностируется датчиками 3, которые при помощи фиксирующих устройств 6 закрепляются на изолирующей штанге 2 на расстоянии L_3 от поверхности контролируемого высоковольтного

ввода 4 путем регулирования расстояния вылета датчика L_2 . Изолирующая штанга 2 посредством верхнего 7 и нижнего 8 фиксирующих устройств крепится к корпусу трансформатора 1. Конструкция фиксирующих устройств 7 и 8 позволяет регулировать высоту H расположения измерительных преобразователей относительно верхней площадки корпуса, на которой размещены высоковольтные вводы 4.

Таким образом, предложенная конструкция позволяет быстро смонтировать диагностическое оборудование на высоковольтном трансформаторе без его отключения, а также выявить неисправный ввод благодаря размещению датчиков электрического поля, выполненных, например, по схеме, предложенной в работе [11], в непосредственной близости от контролируемого ввода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90231.

Литература

1. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов / В. Р. Храмшин, А. С. Карандаев, Р. Р. Храмшин [и др.] : патент 2615790 Российская Федерация. № 2016102967; заявл. 29.01.2016; опубл. 11.04.2017, Бюл. № 11.
2. Русов В. А., Ботов С. В. Мониторинг и диагностика высоковольтных вводов. Схемы для измерения параметров вводов // Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования: материалы конференции компании DIMRUS. Пермь, 2018.
3. Буткевич В. Ф., Уразалиев И. Ф., Фирсов Д. С. Система контроля изоляции высоковольтных вводов с RIP-изоляцией 110 кВ под рабочим напряжением // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 3 (18). С. 26–31. ISSN 2218–3116.
4. Кучерявая И. Н. Численное исследование распределения электрического и теплового поля в полиэтиленовой изоляции силового кабеля с микровключением // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2010. № 27. С. 117–123. ISSN 1727–9895.
5. Мельникова О. С., Кузнецов В. С. Метод расчета электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов // Вестник ИГЭУ. 2020. № 5. С. 48–55. ISSN 2072–2672.
6. Переносное устройство бесконтактного диагностирования изоляции высоковольтных вводов трехфазных трансформаторов / М. А. Кузнецова, А. Ю. Кузьменко, А. А. Кузнецов, С. В. Бирюков: патент на полезную модель 199662 Российская Федерация. № 2020115579; заявл. 09.05.2020; опубл. 14.09.2020, Бюл. № 26.
7. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных полимерных изоляторов / В. А. Голенищев-Кутузов, А. В. Голенищев-Кутузов, Л. И. Евдокимов, А. Ю. Черномашенцев: патент 2483315 Российская Федерация. № 2011153348/28; заявл. 26.12.2011; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.
8. Способ контроля технического состояния элементов высоковольтного оборудования / Н. В. Киншт, Н. Н. Петрунько, Н. В. Силин : патент 2368914 Российская Федерация. № 2008109371/28; заявл. 11.03.2008; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27.
9. Устройство для автоматизированного контроля состояния бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа трехфазного высоковольтного электротехнического оборудования под рабочим напряжением по параметрам частичных разрядов / С. Л. Кузнецов, Г. С. Галикян, А. А. Дягтярев: патент на полезную модель 78951 Российская Федерация. № 2008130497/22; заявл. 23.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34.
10. Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю., Зверев А. Г. Моделирование и экспериментальные исследования распределения электростатического поля на гирляндах подвесных фарфоровых изоляторов // Известия Транссиба. 2016. № 3 (27). С. 91–99. ISSN 2220–4245.
11. Датчик напряженности электрического поля / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, С. В. Бирюков: патент на полезную модель 175577 Российская Федерация. № 2017125826; заявл. 18.07.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 35.

References

1. Device for monitoring power transformers [Ustroystvo dlya monitoringa silovykh transformatorov] / V. R. Khramshin, A. S. Karandaev, R. R. Khramshin [et al.] : patent 2615790 Russian Federation. No. 2016102967; filed 29.01.2016; publ. 11.04.2017, Bulletin No. 11.
2. Rusov V. A., Botov S. V. Monitoring and diagnostics of high-voltage bushing. Schemes for measuring parameters of bushing [Monitoring i diagnostika vysokovol'tnykh vvodov. Skhemy dlya izmereniya parametrov vvodov] // Methods and means of control of insulation of high-voltage equipment: proceedings of conference of DIMRUS Company. Perm, 2018.
3. Butkevich V. F., Urazaliev I. F., Firsov D. C. System for control of insulation of high-voltage bushing with 110 kV RIP-insulation under operating voltage [Sistema kontrolya izolyatsii vysokovol'tnykh vvodov s RIP-izolyatsiyey 110 kV pod rabochim napryazheniem] // ELECTRIC POWER. Transmission and distribution. 2020. No. 3 (18). Pp. 26–31. ISSN 2218–3116.
4. Kucheryavaya I. N. Computational investigation of electric and thermal field distribution in polyethylene insulation of power cable with microinclusion [Chislennoe issledovanie raspredeleniya elektricheskogo i teplovogo polya v polietilenovoy izolyatsii silovogo kabelya s mikrovklyucheniem] // Proceedings of Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine. 2010. No. 27. Pp. 117–123. ISSN 1727–9895.
5. Melnikova O. S., Kuznetsov V. S. Method of calculating the electric strength of oil channels of the main insulation of power transformers [Metod rascheta elektricheskoy prochnosti maslyanykh kanalov glavnoy izolyatsii silovykh transformatorov] // Vestnik IGEU. 2020. No. 5. Pp. 48–55. ISSN 2072–2672.
6. Portable device for contactless diagnostics of insulation of high-voltage bushing for three-phase transformers [Perenosnoe ustroystvo beskontaktnogo diagnostirovaniya izolyatsii vysokovol'tnykh vvodov trekhfaznykh transformatorov] / M. A. Kuznetsova, A. Yu. Kuzmenko, A. A. Kuznetsov, S. V. Biryukov: patent for utility model 199662 Russian Federation. No. 2020115579; filed 09.05.2020; publ. 14.09.2020, Bulletin No. 26.
7. Method for contactless remote diagnostics of condition of high-voltage polymer insulators [Sposob beskontaktnoy distantsionnoy diagnostiki sostoyaniya vysokovol'tnykh polimernykh izolyatorov] / V. A. Golenishhev-Kutuzov, A. V. Golenishhev-Kutuzov, L. I. Evdokimov, A. Yu. Chernomashentsev: patent 2483315 Russian Federation. No. 2011153348/28; filed 26.12.2011; publ. 27.05.2013, Bulletin No. 15.
8. Method for control of technical condition of high-voltage equipment elements [Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya elementov vysokovol'tnogo oborudovaniya] / N. V. Kinsht, N. N. Petrunko, N. V. Silin: patent 2368914 Russian Federation. No. 2008109371/28; filed 11.03.2008; publ. 27.09.2009, Bulletin No. 27.
9. Device for automated control of condition of capacitor type paper-oil insulation for three-phase high-voltage electric equipment under operating voltage according to parameters of partial discharge [Ustroystvo dlya avtomatizirovannogo kontrolya sostoyaniya bumazhno-maslyanoy izolyatsii kondensatornogo tipa trekhfaznogo vysokovol'tnogo elektrotekhnicheskogo oborudovaniya pod rabochim napryazheniem po parametram chastichnykh razryadov] / S. L. Kuzhekov, G. S. Galikyan, A. A. Dyagtyarev]: patent for utility model 78951 Russian Federation. No. 2008130497/22; filed 23.07.2008; publ. 10.12.2008, Bulletin No. 34.
10. Kuznetsov A. A., Kuzmenko A. Yu., Zverev A. G. Modeling and experimental investigation of the distribution of the electrostatic field on a Garland suspended porcelain insulators [Modelirovaniye i eksperimental'nye issledovaniya raspredeleniya elektrostaticheskogo polya na girlyandakh podvesnykh farforovykh izolyatorov] // Journal of Transsib Railway Studies. 2016. No. 3 (27). Pp. 91–99. ISSN 2220–4245.
11. Sensor of electric field intensity [Datчик napryazhennosti elektricheskogo polya] / A. A. Kuznetsov, A. Yu. Kuzmenko, S. V. Biryukov: patent for utility model 175577 Russian Federation. No. 2017125826; filed 18.07.2017; publ. 11.12.2017, Bulletin No. 35.

УДК 629.423.33

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

Денис Александрович Ефимов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Андрей Борисович Батрашов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОКОПРИЕМНИКА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

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

Denis Alexandrovich Efimov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Andrey Borisovich Batrashov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Machinery Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Interaction of current collector of high-speed rolling stock and catenary suspension in various conditions of operation

Аннотация

Представлена математическая модель, описывающая взаимодействие токоприемника высокоскоростного подвижного состава и контактной подвески в различных условиях эксплуатации, таких как скорость подвижного состава, высота раскрытия токоприемника, степень износа токосъемных пластин, температура окружающего воздуха, ветер и гололед. Определены границы допустимой эксплуатации по качеству токосъема, установлены параметры климатических и техногенных факторов, при которых скорость движения на высокоскоростных магистралях необходимо ограничивать по условиям токосъема. Результаты исследования могут быть использованы при разработке и производстве отечественных высокоскоростных токоприемников и контактных подвесок, а также при адаптации импортных моделей для эксплуатации в России.

Ключевые слова: токоприемник, высокоскоростное движение, контактная сеть, качество токосъема, отжатие, контактный провод.

Abstract

The paper presents a mathematical model that describes interaction of a current collector of high-speed rolling stock and catenary suspension in various conditions of operation such as rolling stock speed, current collector opening height, wear rate of current collection plates, ambient temperature, wind and glaze. The authors have determined limits of permissible operation according to quality of current collection, have established parameters of climatic and technogenic factors at which it is necessary to restrict speed on high-speed lines according to conditions of current collection. Results of the study can be used at development and production of domestic high-speed current collectors and catenary suspensions and at adaptation of import models for operation in Russia.

Keywords: current collector, high-speed traffic, catenary, quality of current collection, release, contact wire.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-94-99

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и эксплуатации высокоскоростного подвижного состава необходимо учитывать целый комплекс факторов, воздействующих на процесс токосъема, так как именно качество токосъема часто является параметром, ограничивающим скорость движения. Среди них можно выделить такие группы факторов, как технологические, эксплуатационные и климатические. Основным технологическим фактором, влияющим на качество токосъема, — это скорость движения, основным эксплуатационным фактором — износ контактных накладок полоза токоприемника, к климатическим факторам можно отнести гололед, ветер направления поперек пути и температуру окружающего воздуха. Оценить степень влияния этих факторов на взаимодействие токоприемника и контактной подвески можно при помощи моделирования.

Есть несколько подходов к моделированию такого взаимодействия — использование 2D-моделей [1–3], 3D-моделей [4–10], в том числе многотельных [1, 4, 7, 8]. Сравнение этих моделей [11] показывает, что наиболее адекватно оценить степень воздействия различных факторов на токосъем можно при помощи модели, учитывающей реальные геометрические и механические характеристики токоприемника и контактной подвески.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В исследовании использовалась разработанная авторами 3D-модель взаимодействия токоприемника (SSS400 RZD, фирма Melesc) подвижного состава и контактной подвески.

Уравнение движения токоприемника определяется в модели вторым законом Ньютона, записанным в терминах тензора напряжений Пиолы — Кирхгофа:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot (\mathbf{FS})^T + \mathbf{F}_V,$$

где ρ — плотность материала, кг/м³;
 \mathbf{u} — вектор перемещений, м;
 \mathbf{F} — градиент деформации;
 \mathbf{S} — второй тензор напряжений Пиолы — Кирхгофа, Н/м²;
 \mathbf{F}_V — объемный вектор силы, Н/м³.

Все составные части токоприемника считаются абсолютно твердыми телами. Движение всего тела описывается линейным и угловым перемещениями. Для описания поворота используется кватернион с параметрами a, b, c и d , связанными между собой уравнением

$$a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = 1,$$

где a — скалярная часть;
 b — векторная часть, компонент x ;
 c — векторная часть, компонент y ;
 d — векторная часть, компонент z .

В расчете динамики твердого тела инерционные силы и момент, вызванный инерцией, определяются уравнениями:

$$\mathbf{F} = m\ddot{\mathbf{u}};$$

$$\mathbf{M} = I\ddot{\Theta},$$

где m — масса тела, кг;
 $\ddot{\mathbf{u}}$ — линейное ускорение твердого тела, м/с²;
 I — момент инерции тела, кг·м²;
 $\ddot{\Theta}$ — угловое ускорение твердого тела, рад/с².

Движение твердого тела обусловлено балансом внутренних и внешних сил и моментов инерции. Уравнения движения имеют вид:

$$m\ddot{\mathbf{u}} + \sum \mathbf{F}_I = \sum \mathbf{F}_{ext};$$

$$\mathbf{RIR}^T\ddot{\Theta} + \dot{\Theta} \cdot (\mathbf{RIR}^T\dot{\Theta}) + \sum \mathbf{M}_I = \sum \mathbf{M}_{ext},$$

где $\sum \mathbf{F}_I$ — сумма внутренних сил, Н;
 $\sum \mathbf{F}_{ext}$ — сумма внешних сил, Н;
 \mathbf{R} — матрица поворота;
 \mathbf{R}^T — транспонированная матрица поворота;
 $\dot{\Theta}$ — угловая скорость твердого тела, рад/с;
 $\sum \mathbf{M}_I$ — сумма моментов внутренних сил, Н·м;
 $\sum \mathbf{M}_{ext}$ — сумма моментов внешних сил, Н·м.

Инерционные свойства, такие как масса m и тензор момента инерции твердого тела I , рассчитываются путем объемно-го интегрирования соответствующих частей токоприемника.

Провода контактной подвески представляются линейными одномерными объектами с искомыми функциями u, v и w перемещений по осям x, y и z . В данном представлении контактной подвески уравнение равновесия имеет вид

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial N}{\partial x} = f_x,$$

где ρ — плотность материала, кг/м³;
 A — сечение провода, м²;
 u — перемещение, м;
 N — осевая сила, Н;
 f_x — распределенная нагрузка, Н/м.
 Сила N рассчитывается по формулам:

$$N = N_{ad} + EA \left(\frac{du}{dx} - \varepsilon_{inel} \right);$$

$$N_{ad} = N_0 + N_{ext};$$

$$\varepsilon_{inel} = \varepsilon_0 + \varepsilon_{th},$$

где N_{ad} — суммарное начальное и внешнее осевое усилие, Н;
 ε_{inel} — сумма всех неупругих деформаций, м;
 N_0 — начальное осевое усилие, Н;
 N_{ext} — внешнее осевое усилие, Н;
 ε_0 — начальная деформация, м;
 ε_{th} — температурная деформация, м.

Данная формулировка используется для моделирования линейных объектов, которые могут поддерживать только осевые силы. В модели предполагается, что материалы проводов являются линейно эластичными.

Модель реализована в программном пакете мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование динамики взаимодействия токоприемника и контактной подвески выполнялось при различных эксплуатационных условиях, таких как скорость подвижного состава, высота раскрытия токоприемника, степень износа токосъемных пластин, температура окружающего воздуха, ветер и гололед. За нормальные условия окружающей среды приняты температура воздуха и подвески 0 °С, скорость ветра меньше 5 м/с, отсутствие гололеда.

Качество токосъема оценивалось по основным параметрам, определенным в нормативных документах [12, 13], — величине контактного нажатия, искрению и отжатию контактного провода. Рассматриваемые условия эксплуатации ранжировались по степени их влияния на токосъем, установленной из следующего ряда: слабая степень — ранги 0 и 1; средняя — 2 и 3; сильная — 4 и 5.

Фрагмент результатов расчета нажатия токоприемника вдоль пути при различных скоростях движения электроподвижного состава для нормальных условий представлен на рис. 1, где черными линиями сверху схематически изображена контактная подвеска. Из рис. 1 видно, что с ростом скорости амплитуда в целом и среднее значение сигнала нажатия ожидаемо возрастают.

Статистически обработанные результаты опыта (рис. 2) показывают, что нажатие токоприемника распределено по нормальному закону и с ростом скорости растет его математическое ожидание и стандартное отклонение.

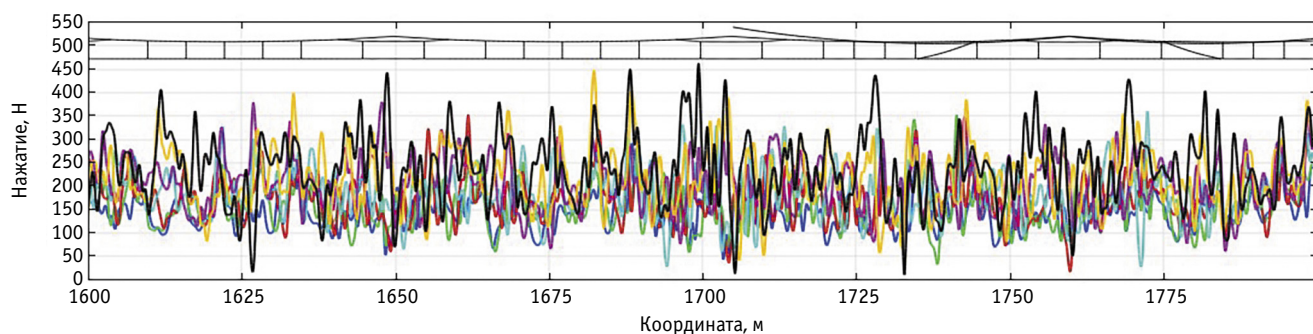


Рис. 1. Нажатие токоприемника вдоль оси пути при нормальных условиях эксплуатации:

— 250 км/ч; — 275 км/ч; — 300 км/ч; — 325 км/ч; — 350 км/ч; — 375 км/ч; — 400 км/ч

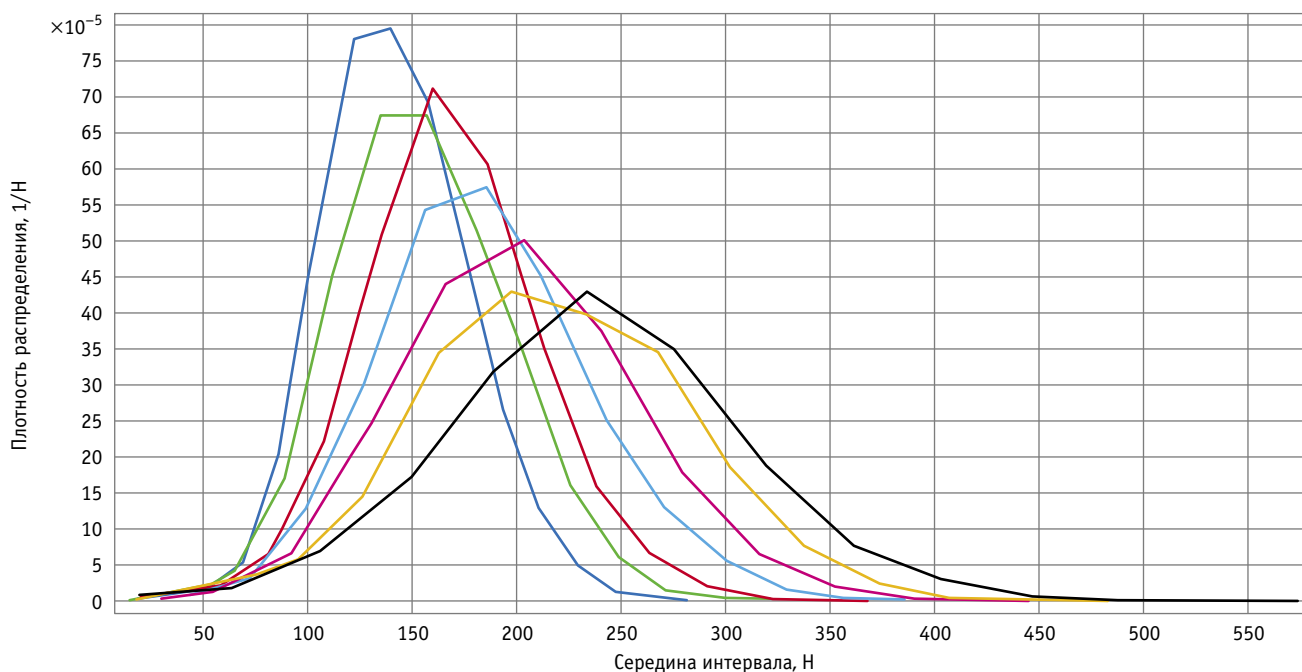


Рис. 2. Плотность распределения нажатия токоприемника при нормальных условиях эксплуатации:

— 250 км/ч; — 275 км/ч; — 300 км/ч; — 325 км/ч; — 350 км/ч; — 375 км/ч; — 400 км/ч

Второй критерий оценки качества токосъема — отжатие контактного провода токоприемником. Как видно из рис. 3, с ростом скорости корреляция между эластичностью подвески и отжатием контактного провода уменьшается, а волновые процессы в подвеске начинают преобладать над ее статическими характеристиками.

Отжатие подчиняется закону распределения, явно далекому от нормального (рис. 4). Кривая плотности распределения отжатия характеризуется двумя пиками, что обусловлено наличием коротких и длинных пролетов. По мере роста скорости амплитуда пиков уменьшается и кривая распределения расширяется.

Аналогично было выполнено моделирование динамики взаимодействия при рассматриваемых факторах, влияющих на токосъем. Полученные результаты проанализированы с точ-

ки зрения допустимых значений контактного нажатия и отжатия контактного провода [12] (рис. 5 и 6).

Дополнительно для всех рассматриваемых режимов определен процент искрения (потери контакта) (рис. 7).

На рис. 8 показано распределение нажатия между ползками токоприемника (средняя относительная неравномерность нажатия между ползками и средняя доля нажатия ползца).

Результаты моделирования для анализируемых условий эксплуатации, таких как скорость подвижного состава, высота раскрытия токоприемника, степень износа токосъемных пластин, температура окружающего воздуха, ветер и гололед, сведены в табл. 1. В ней приведены данные ранжирования факторов, влияющих на токосъем, ограничения по скорости и рекомендованы мероприятия, позволяющие учесть степень влияния факторов.

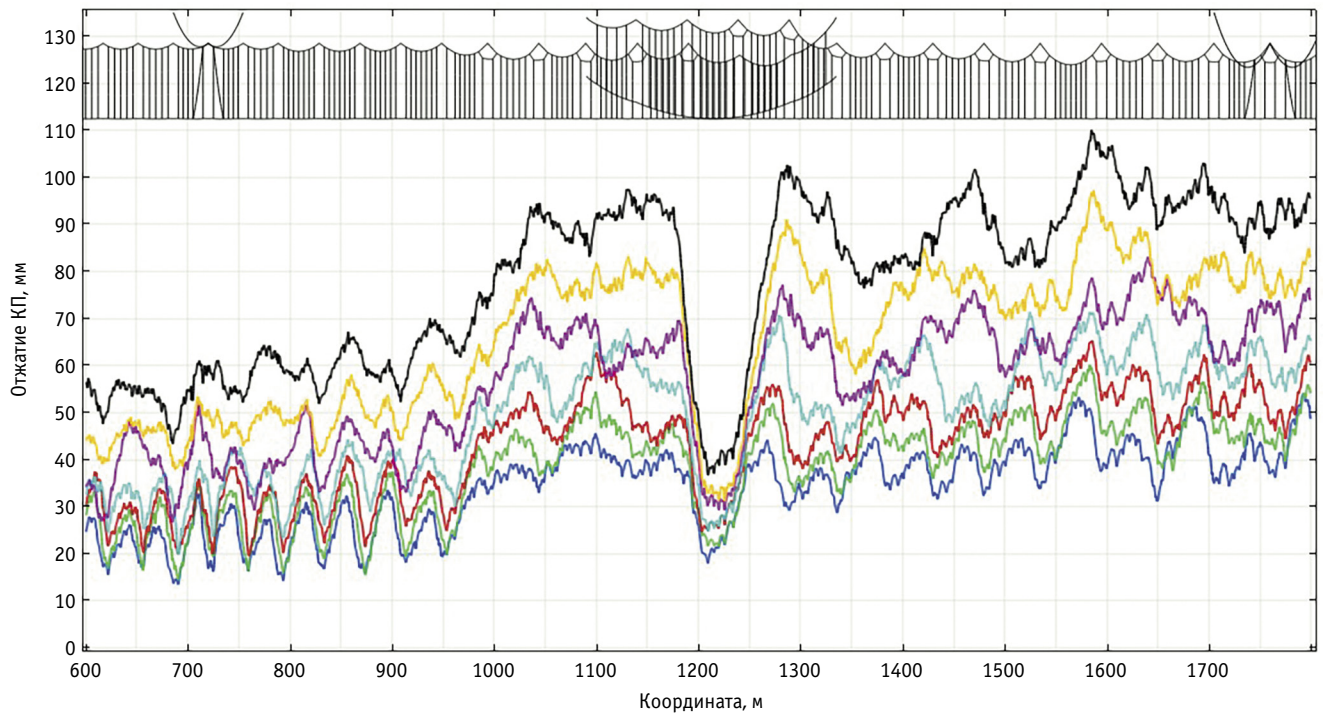


Рис. 3. Отжатие контактного провода токоприемником вдоль оси пути при нормальных условиях эксплуатации:

— 250 км/ч; — 275 км/ч; — 300 км/ч; — 325 км/ч; — 350 км/ч; — 375 км/ч; — 400 км/ч

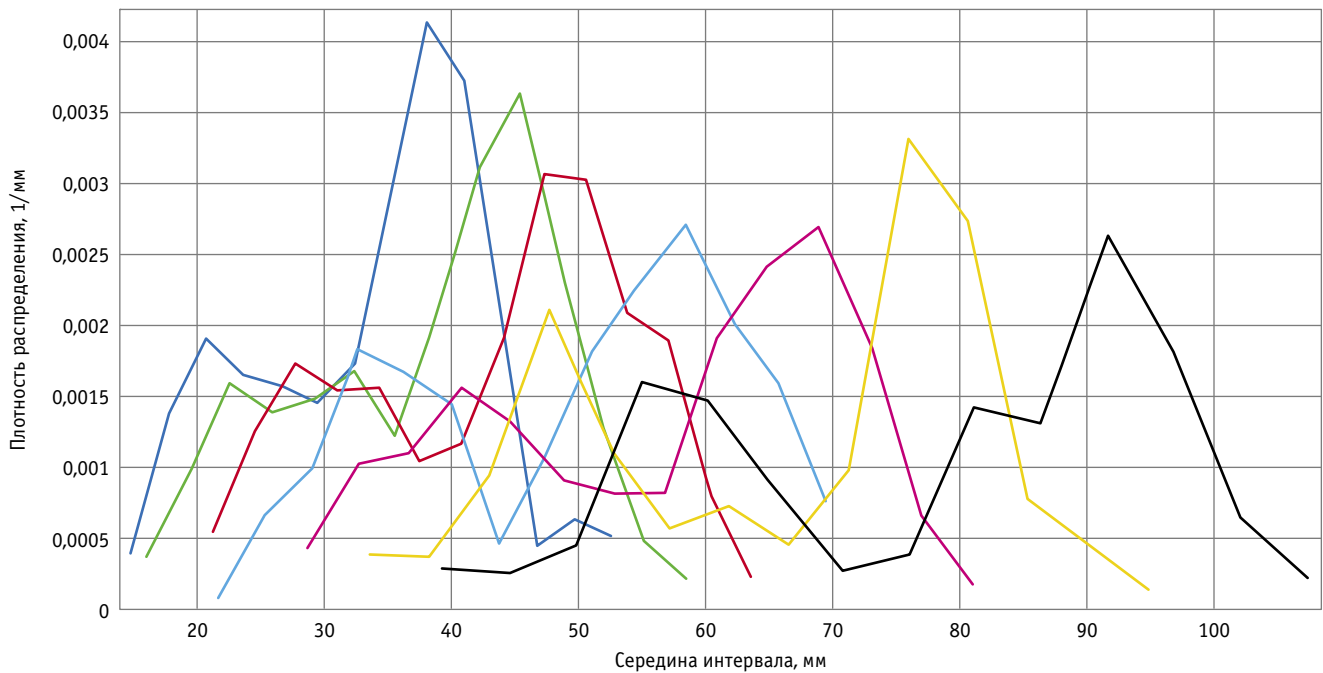


Рис. 4. Плотность распределения отжатия контактного провода при нормальных условиях эксплуатации:

— 250 км/ч; — 275 км/ч; — 300 км/ч; — 325 км/ч; — 350 км/ч; — 375 км/ч; — 400 км/ч

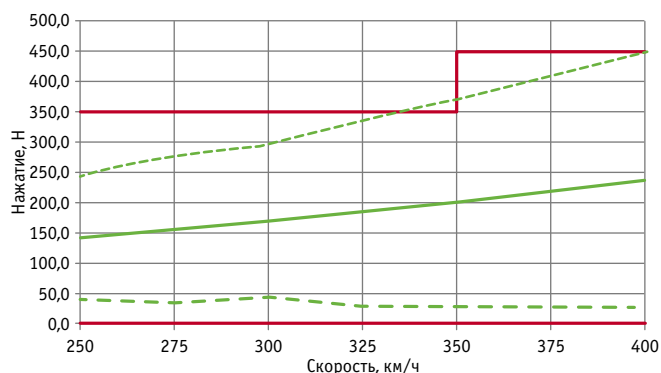


Рис. 5. Статистические параметры нажатия токоприемника при нормальных условиях эксплуатации:

— средн.; — стат. макс.; — стат. мин.;
— допуск стат. мин.; — допуск стат. макс.

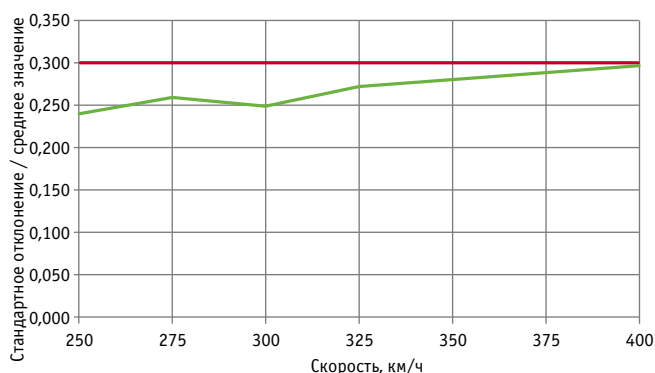


Рис. 6. Статистические параметры отжатия контактного провода при нормальных условиях эксплуатации:

— станд. отклонен./сред. знач.; — допуск

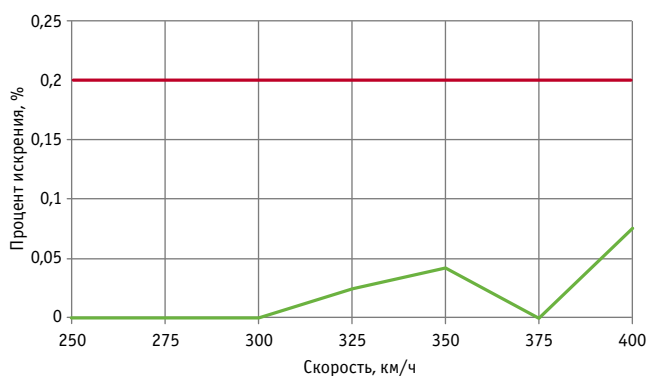


Рис. 7. Процент искрения токоприемника при нормальных условиях эксплуатации:

— процент искрений; — допуск

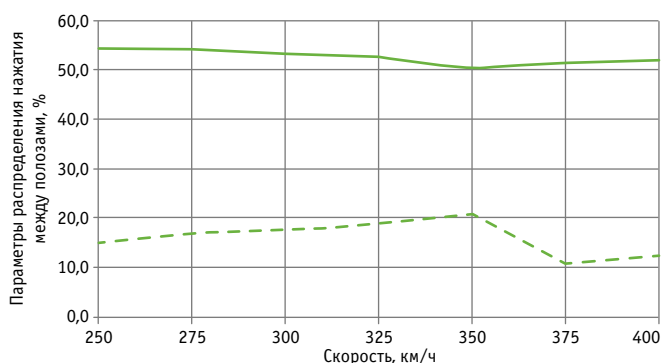


Рис. 8. Распределение нажатия между полозами токоприемника при нормальных условиях эксплуатации:

— сред. относит. неравномерность; — сред. доля ПЛ1

Таблица 1

Сводные результаты оценки влияния рассматриваемых факторов на качество токосъема

Фактор	Ранговая оценка	Ограничение скорости	Примечание	Рекомендации
Скорость	6 (сильная)	400 км/ч	Нормальные условия с учетом колебания электровоза	Дополнительных мероприятий не требуется
Гололед	5 (сильная)	При толщине стенки гололеда 5 мм — 325 км/ч, 10 мм — 265 км/ч, 15 мм — 202 км/ч	Наличие гололеда приводит к возникновению дуги	Требуется мероприятия по удалению гололеда с контактной сети
Износ контактных накладок полозов	4 (средняя)	При предельном износе — 315 км/ч	Увеличивается неравномерность распределения нажатия между полозами	При скорости более 315 км/ч следует чаще производить замеры износа токосъемных пластин
Ветер поперек пути	3 (средняя)	При ветре 30 м/с — 325 км/ч	Скорость ветра 30 м/с редко встречается в эксплуатации	При ветре 30 м/с требуется ограничить скорость до 325 км/ч
Высота установки токоприемника над крышей электровоза	2 (слабая)	Ограничений нет	Раскрытие токоприемника должно находиться в допустимом диапазоне	Дополнительных мероприятий не требуется
Температура контактной подвески и окружающей среды	1 (слабая)	Ограничений нет	Существенного влияния на токосъем не оказывает	Дополнительных мероприятий не требуется

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами расчетным образом оценены условия эксплуатации высокоскоростного подвижного состава по критериям качества токосъема, определено количественное влияние различных параметров подвижного состава, инфраструктуры и климатических условий на контактное нажатие токоприемника и отжатие контактного провода вдоль анкерного участка.

Исследовано влияние на качество токосъема таких факторов, как скорость движения подвижного состава, колебания крыши электровоза, высота установки токоприемника над крышей электровоза, износ токосъемных пластин токоприемника, температура контактной подвески и окружающей среды, скорость ветра поперек пути, гололед. Выполнено ранжирование перечисленных факторов.

Из проведенного анализа следует, что влияние рассматриваемых климатических, технологических и эксплуатационных факторов на качество токосъема существенно различается. Некоторые из них, например гололед, значительно влияют на этот процесс, ограничивают скорость движения электроподвижного состава и определяют границы нормальной эксплуатации. Другие параметры, в частности высота установки токоприемника над крышей вагона и соответственно его раскрытие, практически не оказывают воздействия на токосъем и не приводят к ограничению скорости движения.

Установлено, что из рассмотренных климатических факторов наибольшее влияние оказывает гололед, из технологических факторов — скорость электроподвижного состава, из эксплуатационных — износ контактных накладок полозов токоприемника.

Литература

1. Program for catenary-pantograph analysis, PrOSA statement of methods and validation according EN 50318 / L. Finner, G. Poetsch, B. Sarnes, M. Kolbe // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 305–313.
2. Cho Y. H. SPOPS statement of methods // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 329–340.
3. Sánchez-Rebollo C., Carnicero A., Jiménez-Octavio J. R. CANDY statement of methods // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 392–401.
4. PantoCat statement of method / J. Ambrósio, J. Pombo, P. Antunes, M. Pereira // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 314–328.
5. Jönsson P. A., Stichel S., Nilsson C. CaPaSIM statement of methods // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 341–346.
6. Ikeda M. Gasen-do FE statement of methods // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 357–369.
7. OSCAR statement of methods / J. P. Massat, E. Balmes, J. P. Bianchi, G. Van Kalsbeek // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 370–379.
8. TPL-PCRUN statement of methods / N. Zhou, Q. Lv, Y. Yang, W. Zhang // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 380–391.
9. PACDIN statement of methods / M. Tur, L. Baeza, F. J. Fuenmayor, E. García // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 402–411.
10. Аржанников Б. А., Паранин А. В. Выбор и обоснование основных конструктивных параметров контактной подвески для трехфазной системы тягового электроснабжения на прямом участке пути // *Транспорт Урала*. 2021. № 1 (68). С. 69–77. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-69-77. ISSN 1815-9400.
11. The results of the pantograph-catenary interaction benchmark / S. Bruni, J. Ambrosio, A. Carnicero [et al.] // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 412–435.
12. ГОСТ 32793–2014. Токосъем токоприемником железнодорожного электроподвижного состава. Номенклатура показателей качества и методы их определения. Москва: Стандартинформ, 2014. 21 с.
13. EN 50367. Railway applications. Current collection systems. Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2012.

References

1. Program for catenary-pantograph analysis, PrOSA statement of methods and validation according EN 50318 / L. Finner, G. Poetsch, B. Sarnes, M. Kolbe // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 305–313.
2. Cho Y. H. SPOPS statement of methods // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 329–340.
3. Sánchez-Rebollo C., Carnicero A., Jiménez-Octavio J. R. CANDY statement of methods // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 392–401.
4. PantoCat statement of method / J. Ambrósio, J. Pombo, P. Antunes, M. Pereira // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 314–328.
5. Jönsson P. A., Stichel S., Nilsson C. CaPaSIM statement of methods // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 341–346.
6. Ikeda M. Gasen-do FE statement of methods // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 357–369.
7. OSCAR statement of methods / J. P. Massat, E. Balmes, J. P. Bianchi, G. Van Kalsbeek // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 370–379.
8. TPL-PCRUN statement of methods / N. Zhou, Q. Lv, Y. Yang, W. Zhang // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 380–391.
9. PACDIN statement of methods / M. Tur, L. Baeza, F. J. Fuenmayor, E. García // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 402–411.
10. Arzhannikov B. A., Parani A. V. Selection and substantiation of main design parameters of catenary suspension for three-phase traction power supply system on tangent level track [Vybor i obosnovanie osnovnykh konstruktivnykh parametrov kontaktnoy podveski dlya trekhfaznoy sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na pryamom uchastke puti] // *Transport of the Urals*. 2021. No. 1 (68). Pp. 69–77. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-69-77. ISSN 1815-9400.
11. The results of the pantograph-catenary interaction benchmark / S. Bruni, J. Ambrosio, A. Carnicero [et al.] // *Vehicle System Dynamics*. 2015. Vol. 53. No. 3. Pp. 412–435.
12. GOST 32793–2014. Current collection by electric rolling stock current collector. The nomenclature of current collection quality indicators and method of its calculation [Tokosъem tokopriemnikom zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Nomenklatura pokazateley kachestva i metody ikh opredeleniya]. Moscow: Standardinform, 2014. 21 p.
13. EN 50367. Railway applications. Current collection systems. Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2012.

УДК 681.518.5:621.331

Ирина Анатольевна Юшкова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Никита Васильевич Крапивин, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ЗАЯВОК ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Irina Anatolyevna Yushkova, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikita Vasilyevich Krapivin, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Automation of processing of requests on maintenance of railway power supply facilities by application of digital technologies

Аннотация

Надежная и безаварийная работа системы электроснабжения зависит в том числе от максимального количества заявок, обслуженных энергодиспетчером за сутки. В статье рассмотрена целесообразность создания информационной системы, предназначенной для автоматизации обработки заявок в дистанции электроснабжения, позволяющей снизить нагрузку и повысить производительность работы энергодиспетчерского персонала. Выполнен функционально-структурный анализ предметной области, представления которого систематизированы в виде функциональной модели, разработанной на основе методологии IDEFO.

Ключевые слова: оперативно-диспетчерское управление, информационная система, энергодиспетчер, заявка, обслуживание, устройства электроснабжения.

Abstract

Reliable and trouble-free operation of the power supply system depends on maximal number of requests serviced by a power dispatcher in 24 hours. The paper considers an expediency of creation of the information system designed for automation of request processing in power supply division that allows decreasing load and increasing efficiency of power dispatchers. As a result, the authors have carried out functional and structural analysis of the subject area and have represented it in the form of functional model developed on the basis of IDEFO methodology.

Keywords: operational and dispatching control, information system, power dispatcher, request, maintenance, power supply facilities.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-100-105

Возрастающие объемы грузовых и пассажирских перевозок требуют надежной и бесперебойной работы системы тягового электроснабжения. Для поддержания функционирования устройств электроснабжения железных дорог необходима организация оперативно-технологического управления объектами дистанции электроснабжения (ЭЧ) [1]. Непрерывное оперативно-диспетчерское управление за эксплуатационным состоянием и взаимосвязанными технологическими режимами работы устройств электроснабжения в ЭЧ осуществляет энергодиспетчер (ЭЧЦ) в границах своего энергодиспетчерского круга [1, 2].

К основным обязанностям энергодиспетчера относятся: обеспечение безопасных условий производства работ, круглосуточного и непрерывного контроля за состоянием системы электроснабжения; прием и передача организационно-оперативной информации; оперативные действия при аварийно-восстановительных работах; взаимодействие с вышестоящими органами оперативно-го управления; ведение отчетности по оперативной работе. Энергодиспетчер использует в своей работе большой перечень оперативно-технической документации и нормативных актов, а также специализированные программы [3, 4].

Энергодиспетчер контролирует, чтобы меры по подготовке рабочего места были достаточными и соответствовали требованиям нормативных документов, а также проверяет правильность отключения оборудования. С увеличением объемов работ по обслуживанию устройств электроснабжения, в том числе в период «окон», нагрузка на ЭЧЦ увеличивается, следовательно, растет вероятность совершения ошибок, которые могут привести к травмиранию или даже к гибели работников [5].

При приеме заявки на работу энергодиспетчер должен [3]: проверить достаточность указанных в наряде-допуске отключений коммутационных аппаратов, содержание работы, количество и место установки заземляющих штанг;

убедиться, что перечисленные в наряде оперативные наименования коммутационных аппаратов соответствуют указанным на схеме энергодиспетчера;

проверить, что в зоне работы отсутствуют опасные места;

убедиться, что указанным в наряде лицам предоставлены права;

проверить, что в дополнительных мероприятиях указано применение специальных защитных костюмов.

Современные цифровые технологии могут частично избавить энергодиспетчера от действий по подготовке заявок на обслуживание устройств электроснабжения. Разрабатываемая авторами статьи информационная система должна сама осуществлять проверку заполненного наряда-допуска, а также выполнять предъявляемые требования. Таким образом можно автоматизировать процесс создания и утверждения заявок на работы и оставить за ЭЦЦ только функции дополнительной проверки и контроля действий программы с возможностью их корректировки или отмены. Это, в свою очередь, повысит производительность труда [5].

Рассмотрим существующий алгоритм оперативной работы энергодиспетчера на примере Березниковской дистанции электроснабжения Свердловской железной дороги (рис. 1а). После оформления заявки без выхода на железнодорожные пути утверждаются три разные смены ЭЦЦ. В случае выявления ошибок необходимо устранить замечания и повторно утвердить заявку у ЭЦЦ. Если заявка утверждена, то следующая (третья дневная) смена ЭЦЦ приступает к работе с ней. В дистанции электроснабжения применяется плановая проверка бланков наряд-допусков аппаратом управления работниками дистанции электроснабжения (АУР ЭЦ).

Представленный на рис. 1а алгоритм оперативной передачи заявки имеет недостатки, что подтверждает необходимость автоматизировать обработку заявок в дистанции электроснабжения на основе внедрения цифровых технологий, т.е. создания так называемого цифрового двойника. В частности, к недостаткам существующей системы по приему и утверждению заявок можно отнести проверку тремя разными сменами ЭЦЦ, а также дополнительную проверку со стороны АУР.

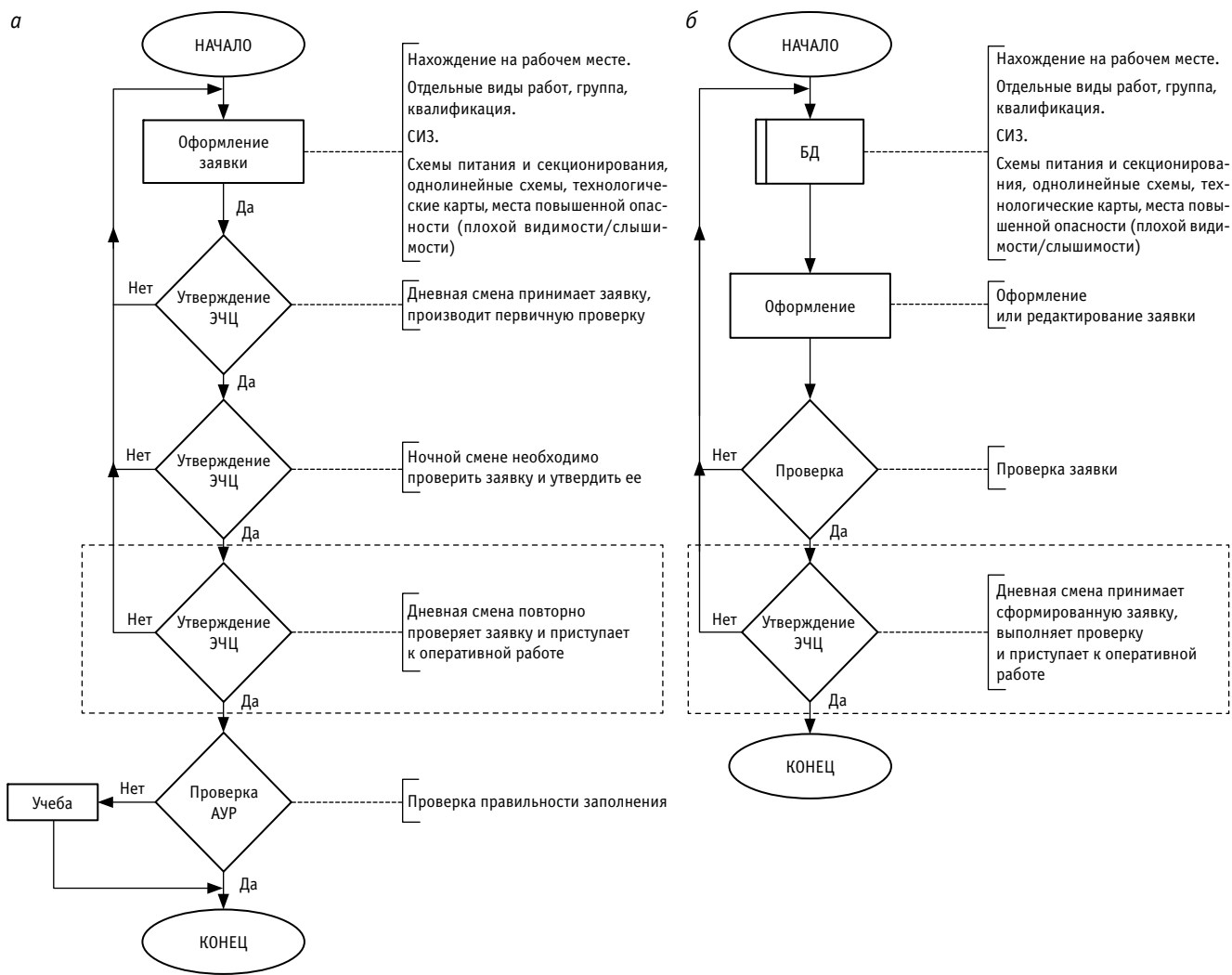


Рис. 1. Алгоритм передачи и утверждения заявки до (а) и после (б) внедрения цифровых технологий

В среднем в Березниковской ЭЧ на рассмотрение одной заявки уходит около 20 мин. В сутки таких заявок может быть не менее 30. Для обработки всех заявок, приходящих в течение дня, ЭЧЦ требуется около 4 ч. Кроме того, утверждение заявок проходит трехступенчатый контроль и только в определенное время, свободное от оперативной работы ЭЧЦ. Как следствие, общая производительность труда может снизиться, а плановые ремонтные работы будут произведены в более длительные сроки, что может привести к аварийным ситуациям.

Алгоритм передачи заявки энергозатрачен как для энергодиспетчера, так и для работников других отделов электрификации и электроснабжения. Например, при составлении наряд-допуска могут быть записаны лица, отстраненные от работы или находящиеся в отпуске, а также изложена неверная последовательность переключений.

Для проверки правильного заполнения наряда-допуска энергодиспетчеру необходим допуск к базам данных отдела кадров (нахождение члена бригады на рабочем месте, разрешенные виды работ), охраны труда (квалификационная группа членов бригады, наличие средств индивидуальной защиты), переключений (однолинейные схемы, схемы питания и секционирования, технологические карты) и др., но к некоторым из них у него доступа нет. Из-за этого проверка всевозможных факторов, влияющих на работу, превращается в сложный и долговременный процесс. Следовательно, при разработке информационной системы по автоматизации обработки заявок необходимо объединение различных баз данных.

На рис. 1б представлен усовершенствованный алгоритм передачи и обработки заявки. Согласно ему, энергодиспетчер делает только одну проверку (пунктир на рис. 1б), остальные проверки выполняет информационная система. Кроме того, становится не нужна проверка АУР, так как ее тоже делает система. То есть предлагаемый алгоритм значительно сокращает время проверки и утверждения заявок. Помимо базы данных, алгоритм дополнен проверкой правильности оформления заявки до ее отправки ЭЧЦ (рис. 2). В случае если провер-

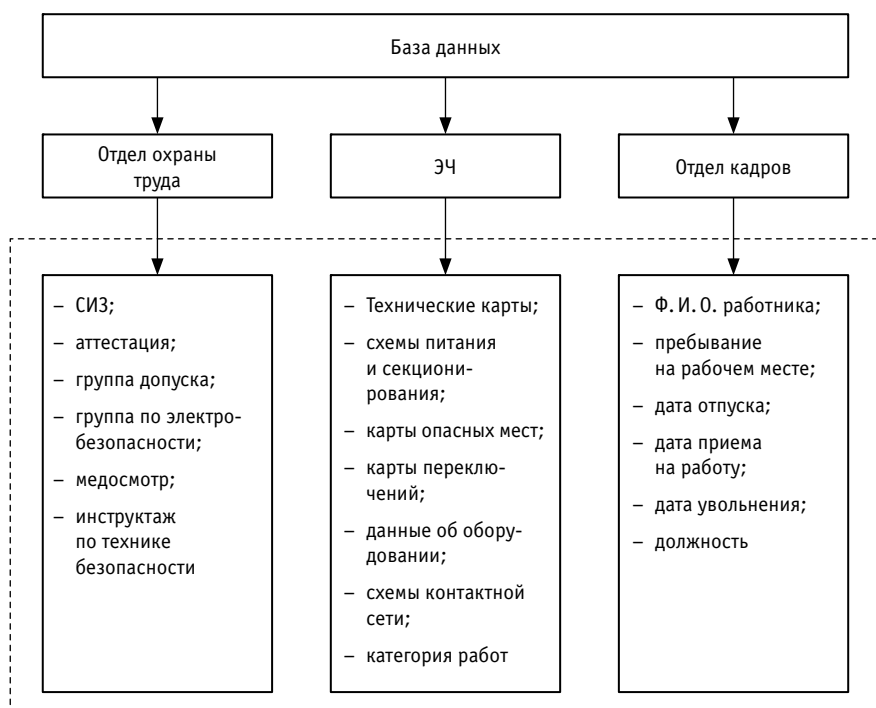


Рис. 2. Состав базы данных разрабатываемой информационной системы

ка не пройдена, заявка подлежит редактированию.

Как видно из рис. 2, база данных информационной системы формируется из баз данных отделов и подразделений предприятия ОАО «РЖД». В нее включены сведения о работниках, технологические карты каждого подразделения, опасные места, бланки переключений, средства индивидуальной защиты и т.д.

Благодаря автоматической проверке правильности оформления наряд-допуск сразу попадает в электронном виде к ЭЧЦ, что снижает трудозатраты на его рассмотрение, а также исключает трехступенчатый контроль и проверку АУР.

При разработке информационной системы создания и проверки заявок на выполнение плановых работ в подразделениях дистанции электроснабжения необходимо применять специальные средства описания и анализа ее эффективности. К числу самых распространенных относится методология IDEF0, основанная на использовании структурного анализа и графических средств описания систем [6]. Методология IDEF0 предназначена для создания функциональной модели, отображающей структуру и функции системы, а также потоки информации и матери-

альных объектов, связывающие эти функции [7]. В основе методологии IDEF0 лежит декомпозиция — разбиение сложного процесса на составляющие его функции [6].

Рассмотрим в качестве примера контекстную диаграмму «Оформить наряд-допуск» (рис. 3) с указанием ее границ, т.е. входных, выходных и внешних воздействий.

Исходной информацией служат следующие документы и программное обеспечение:

Единая корпоративная автоматизированная система управления финансами и ресурсами (ЕК АСУФР);

Единая корпоративная автоматизированная система управления трудовыми ресурсами (ЕК АСУТР);

Автоматизированная информационная система ведения учета средств метрологического обеспечения (АИС Метролог); технологические карты; бланки переключений.

К информационным ресурсам также можно отнести оперативно-техническую документацию, нормативные акты и др.

Воздействие на систему оказывают производитель работ, лицо, выдающее наряд-допуск, энергодиспетчер, а также старший энергодиспетчер.

В результате на выходе будет либо утвержденный наряд-допуск (бланк) с присвоением номера заявки, либо предупреждение о дополнительной проверке заполненного наряда-допуска.

На рис. 4 показана декомпозиция первого уровня. В функциональном блоке 1 формируется заявка на выполнение работы. Если заявка типовая, то далее осуществляется ее автоматическая проверка в блоке 2, и после успешной проверки заявке присваивается номер. Если найдены несоответствия, выполняется автоматизированная проверка в блоке 3 и последующее утверждение заявки. Если же формируется нетиповая заявка, то она сразу попадает на автоматизированную проверку ЭЧЦ (блок 3).

Процесс «Сформировать заявку» (рис. 5) выполняется следующим образом. В блоке 1 происходит выбор подразделения дистанции электроснабжения. Далее в блоке 2 выбирается технологическая карта, соответствующая данному подразделению. Если выбрана нетиповая технологическая карта, то заполняется информация о выполняемой работе (блок 5). Если выбрана типовая технологическая карта, заполняется состав бригады (блок 3) с указанием даты и времени проведения работ (блок 4).

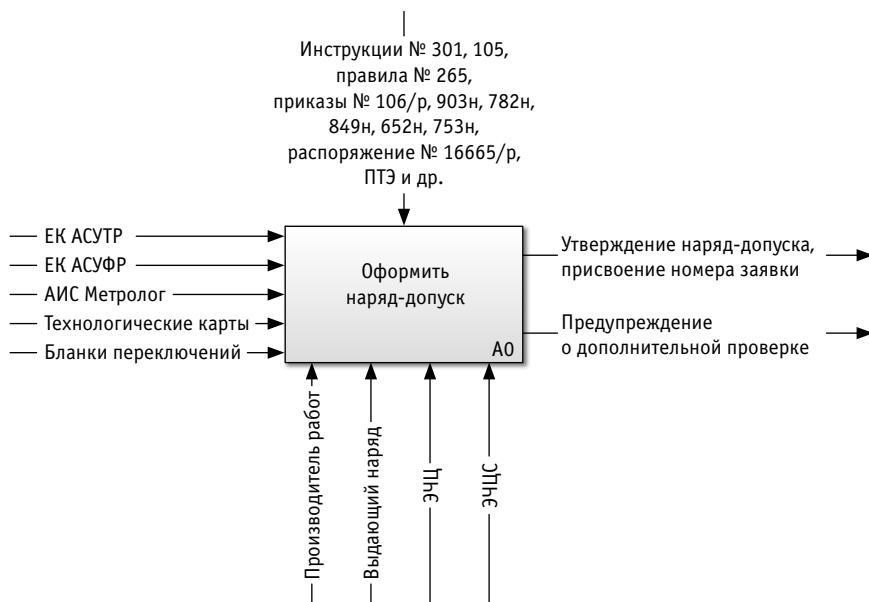


Рис. 3. Контекстная диаграмма

Во время процесса «Выполнить проверку» (рис. 6) осуществляется автоматическая проверка нахождения выбранного состава бригады на рабочем месте (блок 1), прав на выполнение работ (блок 2), наличия средств индивидуальной защиты, приборов, монтажных приспособлений на выбранном подразделении (блок 3), а также наличия

и своевременности испытаний и проверки выбранных приборов и приспособлений (блок 4). В блоке 5 заявка, успешно прошедшая проверки в блоках 1–4, проверяется энергодиспетчером. После этого заявка утверждается, и ей присваивается номер, но не исключена и процедура редактирования заявки (дополнительная проверка).

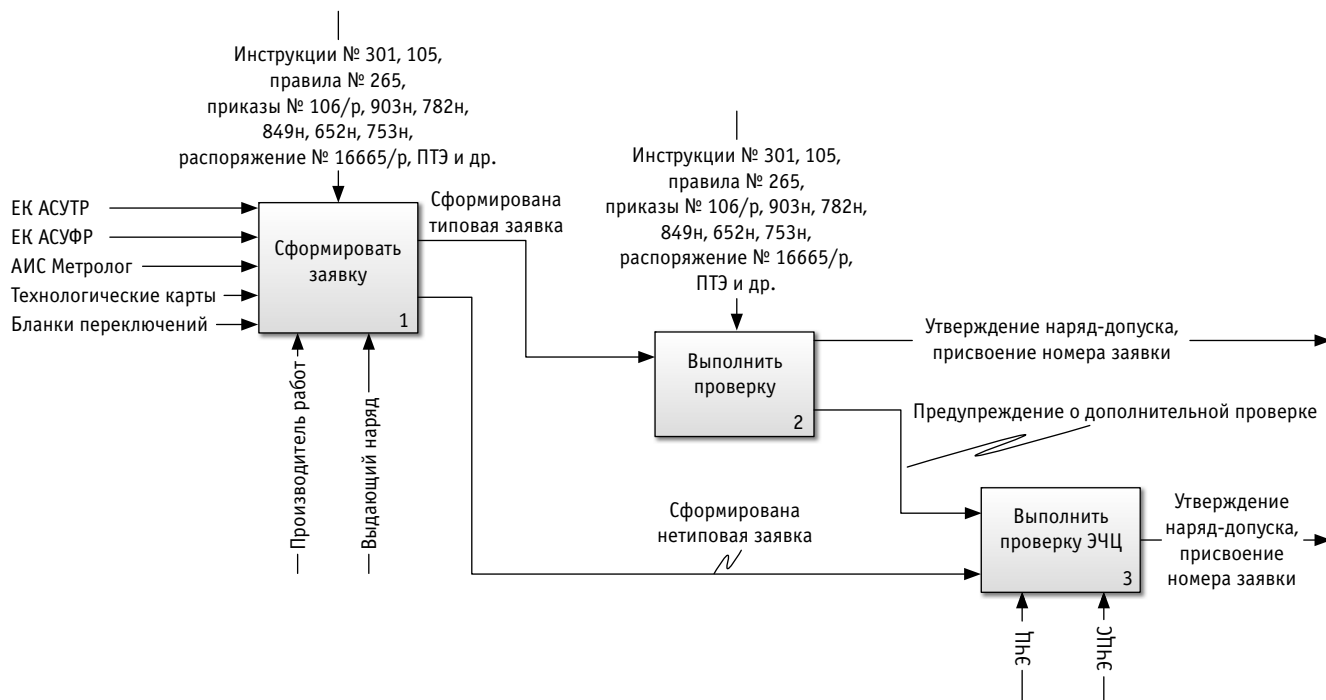


Рис. 4. Декомпозиция первого уровня

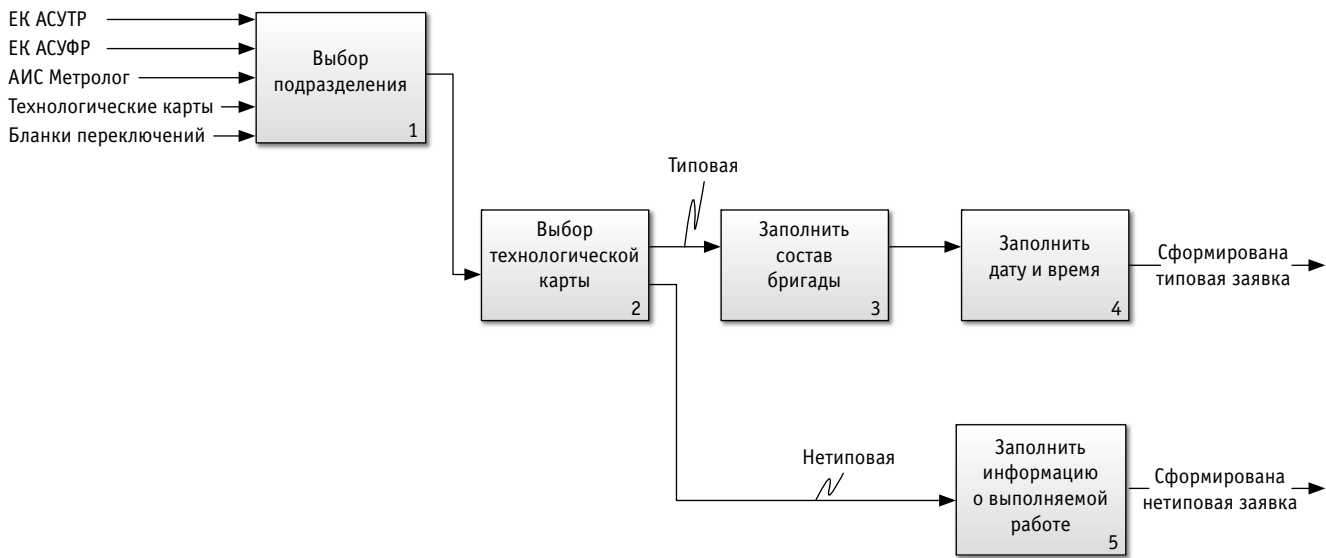


Рис. 5. Декомпозиция второго уровня, процесс «Сформировать заявку»

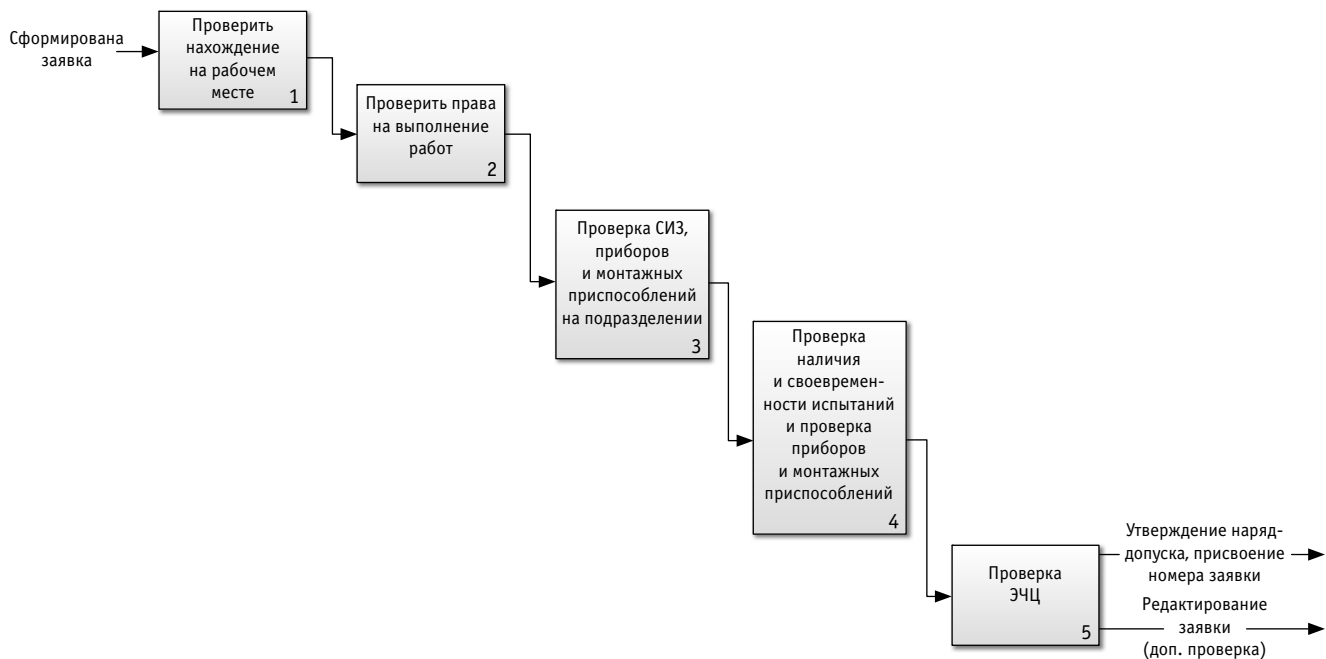


Рис. 6. Декомпозиция второго уровня, процесс «Выполнить проверку»

Итак, на основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Усовершенствованный алгоритм передачи и утверждения заявки, рассмотренный в статье, обеспечит максимальный эффект работы энергодиспетчера.

2. Внедрение разработанной информационной системы создания и проверки заявок в подразделениях ЭЧ позволит повысить надежность работы системы тягового электроснабжения, так как минимизирует вероятность ошибочных действий энер-

годиспетчера, которые становятся причиной не только нарушений в электроснабжении потребителей, но и снижения безопасности работы персонала.

3. Направлением дальнейшего развития разработанной функциональной модели может стать использование методов искусственного интеллекта для самообучения программы за счет решения множества сходных задач и анализа существующих алгоритмов [8, 9].

Литература

1. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: утв. приказом Минэнерго России от 19.06.2003 г. № 229 (с изменениями и дополнениями). URL: <https://base.garant.ru/186039/?ysclid=l6lyeis964705326803> (дата обращения: 23.07.2022).
2. Меркурьев Г. В. Оперативно-диспетчерское управление энергосистемами / Центр подготовки кадров энергетики. Санкт-Петербург, 2002. 116 с.
3. Инструкция энергодиспетчера, управляющего электроустановками дистанции электроснабжения ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 19.12.2013 г. № 2802р. Москва : ОАО «РЖД», 2013. 94 с.
4. Об утверждении Правил оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике (с изменениями и дополнениями): постановление Правительства Российской Федерации от 27.12.2004 г. № 854. URL: <https://base.garant.ru/187737> (дата обращения: 23.07.2022).
5. Сиромаха В. Н. Автоматизация диспетчерского управления электроснабжением железнодорожного транспорта: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2009. 24 с.
6. Кара-Ушанов В. Ю. Функционально-структурное моделирование в системе Ramus Educational / УрФУ. Екатеринбург, 2019. 67 с.
7. Методология функционального моделирования IDEF0 / Госстандарт России. Москва, 2000. 75 с.
8. Маниковский А. С., Комогорцев М. Г. Автоматизация диспетчерского управления на железнодорожном транспорте с использованием систем машинного интеллекта // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2019. Т. 1. С. 67–70.
9. Интеллектуальная система повышения эффективности оперативно-диспетчерского управления дистанцией электроснабжения / Н. А. Попова, П. А. Бодров, А. В. Бутенко, М. К. Попов // Труды РГУПС. 2021. № 3 (56). С. 32–36. ISSN 1818–5509.

Объем статьи 0,73 авторских листа

References

1. Engineering instructions of electric stations and networks Russian Federation [Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektricheskikh stantsiy i setey Rossiyskoy Federatsii]: approved by the Order the Ministry of Energy of the Russian Federation dated 19.06.2003 No. 229 (with additions and amendments). URL: <https://base.garant.ru/186039/?ysclid=l6lyeis964705326803> (access date: 23.07.2022).
2. Merkuriev G. V. Operational and dispatching control of energy systems [Operativno-dispetcherskoe upravlenie energosistemami] / Centre for energy personnel training. St. Petersburg, 2002. 116 p.
3. Manual for power dispatcher who controls power installations of the JSC «RZD» power supply division [Instruktsiya energodispetchera, upravlyayushhego elektroustanovkami distantsii elektrosnabzheniya ОАО «RZhD»]: approved by the Order of JSC «RZD» dated 19.12.2013. No. 2802r. Moscow : JSC «RZD», 2013. 94 p.
4. On approval of Rules of operational and dispatching control in electrical power engineering (with additions and amendments) [Ob utverzhdenii Pravil operativno-dispetcherskogo upravleniya v elektroenergetike (s izmeneniyami i dopolnениями): the Order of the Government of the Russian Federation dated 27.12.2004 No. 854. URL: <https://base.garant.ru/187737> (access date: 23.07.2022).
5. Siromakha V. N. Automation of dispatcher control of railway power supply [Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya elektrosnabzheniem zheleznodorozhnogo transporta]: Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2009. 24 p.
6. Kara-Ushanov V. Yu. Functional and structural modeling in the Ramus Educational system [Funktional'no-strukturnoe modelirovanie v sisteme Ramus Educational] / UrFU. Ekaterinburg, 2019. 67 p.
7. Methodology of IDEF0 functional modeling [Metodologiya funktsional'nogo modelirovaniya IDEF0] / Committee of the Russian Federation for Standardization, Metrology and Certification. Moscow, 2000. 75 p.
8. Manikovskiy A. S., Komogortsev M. G. Automation of the control room on the railway transport with the use of intelligent machine systems [Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya na zheleznodorozhnom transporte s ispol'zovaniem sistem mashinnogo intellekta] // Scientific, technical and economic cooperation of countries of the Asia-Pacific region in the XXI century. 2019. Vol. 1. Pp. 67–70.
9. Intelligent efficiency improvement system operational dispatch management power supply distance [Intellektual'naya sistema povysheniya effektivnosti operativno-dispetcherskogo upravleniya distantsiyey elektrosnabzheniya] / N. A. Popova, P. A. Bodrov, A. V. Butenko, M. K. Popov // Works of RGUPS. 2021. No. 3 (56). Pp. 32–36. ISSN 1818–5509.

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-vypusnikov-urgups>

Извещение	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: 667001001 ИНН: 6670317893 ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192 в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795 Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2022 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: 667001001 ИНН: 6670317893 ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192 в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795 Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2022 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала» DOI:10.20291/1815-9400

№ 3 (74), 2022 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Пресса России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 30.09.2022 Выход в свет 30.12.2022

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–60) Формат 60×90/8

Цена 489,09 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 27

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2022

