

НАУКА И ТЕХНИКА ТРАНСПОРТА



I S S N 2 0 7 4 - 9 3 2 5



● Транспорт

● Информатика, вычислительная техника и управление

● Безопасность деятельности человека

2022 3

Научно-технический журнал

Входит в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по следующим научным специальностям:

- 2.3.1 — Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.3 — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки);
- 05.22.01 — Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки);
- 2.9.2 — Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки);
- 2.9.3 — Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки);
- 2.9.4 — Управление процессами перевозок (технические науки);
- 05.26.01 — Охрана труда (по отраслям) (технические науки).

Адрес редакции:

125315, Москва, Часовая ул., 22/2

Тел.: (495) 649-19-00 доб. 385.

125315, Chasovaya Str., 22/2, Russia, Moscow

Тел.: (495) 649-19-00 ext: 385. Fax: (499) 151-18-37

E-mail: nttmag@rgotups.ru,
<http://ntt.rgotups.ru>

Подписной индекс
в каталоге агентства «Урал-Пресс» — 69960.

Издатель: РУТ (МИИТ)

Тел.: (495) 649-19-00 доб. 385.

Журнал выходит 4 раза в год.

Свидетельство о регистрации выдано Роскомнадзором
ПИ №ФС77-82472 от 10 декабря 2021 г.

Выходит с 2002 года.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Редакция не несет ответственности за представленные материалы. Мнение редакции может не совпадать с мнением автора. Рукописи рецензируются и не возвращаются. Использованы фотоматериалы из открытых источников.

Отпечатано РОАТ РУТ (МИИТ):

125315, Москва, Часовая ул., 22/2

Подписано в печать 27.09.2022.

Усл. печ. л. 14,25

Формат 60×90¹/₈.

Тираж 60 экз.

Тип. зак. 15

© Наука и техника транспорта, 2022



Редакционный совет:

- д-р техн. наук, проф. Апатцев В.И. — председатель;
д-р техн. наук, проф. Бугреев В.А. — зам.председателя;
д-р техн. наук, проф. Горелик А.В.;
д-р техн. наук, проф. Космодамианский А.С.;
д-р техн. наук, проф. Безродный Б.Ф.;
д-р техн. наук, проф. Никитин А.Б.;
д-р ф.-м. наук, проф. Локтев А.А.;
д-р техн. наук, доц. Сычев В.П.;
д-р техн. наук, проф. Мондрус В.Л.;
д-р техн. наук, проф. Мкртычев О.В.;
д-р техн. наук, проф. Аксенов В.А.;
д-р техн. наук, проф. Шварцбург Л.Э.;
д-р техн. наук, проф. Николайкин Н.И.;
д-р техн. наук, проф. Сидоренко В.Г.;
д-р техн. наук, проф. Осьминин А.Т.;
д-р экон. наук, проф. Шкурина Л.В.;
д-р экон. наук, проф. Мирошниченко О.Ф.;
д-р экон. наук, проф. Белоусова Н.И.

Главный редактор

В.И. Апатцев

Ответственный редактор

В.А. Бугреев

Ответственный секретарь

В.А. Кочнев

Редакторы

Д.Н. Тихонычев, В.К. Тихонычева

Английский перевод

М.Л. Окулова

3' 2022

Транспорт



С.П. Вакуленко, К.А. Калинин

Применение подвижного состава на водородной тяге в условиях формирования единой транспортной системы

8



А.Е. Чекмарев, С.А. Васильев, А.Н. Кузнецова, А.В. Подорожкина

Оценка пропускной способности инфраструктуры транспортно-пересадочных узлов Московского центрального кольца

14



К.А. Сергеев, О.И. Мироненко, О.Ю. Кривич

Математическое описание ремонтируемых вагонов и их узлов

21



А.А. Локтев, А.В. Сычева, В.П. Сычев

Обоснование эффекта притормаживания упругой волны от воздействия колес подвижного состава на рельс с локализацией волны в зоне дефекта железнодорожного пути

25



Л.Н. Логинова, Д.А. Дидушок

Подходы к разработке интегрированных систем проверки знаний работников городских рельсовых транспортных систем

31



М.Н. Торопов, И.Е. Перков, А.С. Селиванов, Н.В. Васильев, П.П. Бегунов

Повышения ресурса и надежности систем водотеплоснабжения пассажирских вагонов на основе разработки энергоэффективной экологичной технологии водоподготовки

41



И.С. Абдуллаев, Н.И. Лукин

Инструментарий перехода от локального развития инфраструктуры объектов железнодорожного транспорта к полигонному подходу в проектировании

50



С.А. Синицын

Информационная методика интегральных оценок точности изготовления и измерения деталей и узлов транспортного машиностроения

55



А.Ф. Бельц, Л.Ю. Шевырёв, А.Н. Каплунов

Оптимизация совместной работы уборочно-транспортных комплексов на примере АО «Учхоз Зерновое» Зерноградского района Ростовской области

60



О.Н. Ларин, А. Оюунгарав, Д.А. Прибыткова, Ц. Моононхуу, С. Баасан

Особенности проектирования цифровых двойников цепи поставок

65



Д.Г. Евсеев, А.С. Уткин

Повышение надежности элементов тормозной системы электроподвижного состава метрополитена

71



М.В. Фуфачева, Е.М. Лыткина

Оптимальные схемы путевого развития станций при реконструкции для эффективного внедрения системы интервального движения поездов

75



Б.И. Давыдов, В.И. Чеботарев, К.С. Каблукова, Ю.О. Пазойский

Моделирование движения поезда с учетом статистических связей элементов траектории

81

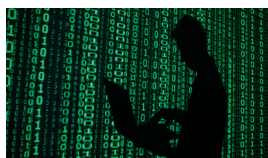


Д.С. Шутов, И.И. Лакин

Анализ надежности оборудования электропоездов «Москва-2020» Московского метрополитена

92

Информатика, вычислительная техника и управление



Б.Ф. Безродный, Л.В. Любимова

Обеспечение техносферной безопасности за счет снижения рисков от киберугроз

102

Безопасность деятельности человека



**В.А. Аксенов, А.В. Киселев, В.В. Самойлов,
Е.А. Киселева**

Повышение эффективности профилактики
производственного травматизма путем
совершенствования компетенции персонала

106



А.А. Кириллин, О.С. Сачкова, Д.В. Климова

Анализ эффективности средств индивидуальной
защиты работников инфраструктурного комплекса

110

Transport

S.P. Vakulenko, K.A. Kalinin

Use of Hydrogen-Powered Rolling Stock in Conditions of Common Transport System Organization. **8**

The article considers the prospects of using the hydrogen-powered rolling stock for railway transportation, including suburban and urban transportation. The effects of the introduction of hydrogen fuel cells into passenger and freight locomotives have been determined. The authors identify the most conforming scope of application for a new type of rolling stock.

Key words: passenger transportation, freight transportation, ecology, alternative energy, hydrogen, hydrogen traction

A.E. Chekmarev, S.A. Vasiliev, A.N. Kuznetsova, A.V. Podorozhkina

Traffic Capacity Assessment of Transport Hub Infrastructure of Moscow Central Circle **14**

The authors consider the possibilities of traffic capacity assessment of infrastructure elements of Moscow Central Circle transport hubs by means of a professional AnyLogic simulation package.

Key words: transport hub, passenger traffic simulation

K.A. Sergeev, O.I. Mironenko, O.Yu. Krivich

Mathematical Description of Being Repaired Railway Cars and their Elements **21**

The article suggests the mathematical description of the being repaired railway cars and their elements used in the technological design of objects and processes of car repair production. The general technique of variant design is described; and the procedure groups, the information model structure and recurring design tasks are formalized.

Key words: technological processes, automatic coupling equipment of cars, rolling stock, technological documentation

A.A. Loktev, A.V. Sycheva, V.P. Sychev

Justification of Braking Effect of Elastic Wave due to Rolling Stock Wheel Impact on Rail With Wave Localization on Railway Track Defect Zone **25**

Based on the assumption that the rail is an infinite string «adhered» to a rigid base, the task of this wave localizing is set and solved. The possibility of the rail track defect identification in the places of the string «detachment» is shown.

Key words: wave, elastic vibrations, rail track, wheel-rail system, defect, wave localization

L.N. Loginova, D.A. Didushok

Approaches to Development of Integrated Systems for Knowledge Testing of Urban Rail Transport Employees. **31**

The authors have analysed and formulated the requirements for a unified testing system for operational workers of urban rail transport systems. On the basis of the IDEF0 methodology the article proposes the process modelling of knowledge testing of employees, as well as a graphic structural analysis of the being implemented system.

Key words: urban rail transport systems, qualification, knowledge testing, integrated systems

M.N. Toropov, I.E. Perkov, A.S. Selivanov, N.V. Vasiliev, P.P. Begunov

Improving Resource and Reliability of Water Supply Systems of Passenger Cars Based on Development of Energy-Efficient And Environment-Friendly Water Treatment Technology . . . **41**

The article presents the material on the application of the energy method of water treatment on water heat supply systems of some 1200 passenger cars of domestic and international rail service manufactured by Russia and Siemens (Germany) at different operating periods, various heat carriers and assigned processing tasks.

Key words: water heat supply system, scale-corrosive deposits, excessive fuel and energy consumption

I.S. Abdullaev, N.I. Lukin

Toolset for Transition from Local Development of Railway Transport Infrastructure to Polygon Approach in Engineering 50

The article is devoted to the issue of optimal railway infrastructure development for the required traffic volumes. A polygon approach in engineering is proposed as a search problem solution of the optimal railway infrastructure development.

Key words: polygon approach in engineering, creation of integrated information base, optimal infrastructure development

S.A. Sinitsyn

Information Procedure for Integral Accuracy Criterion of Manufacturing and Measurement of Transport Engineering Parts and Elements 55

The author considers the theoretical bases of the information method of integral criteria for accuracy control of manufacturing of parts and elements of transport machines under conditions of using the serial technological equipment of continuous service. A feature of the method is the possibility of aggregate estimate of design parameters by measuring their systematic component in a variable uncertainty interval.

Key words: limit of measurability of point sets, integral criterion of measurement accuracy, measure and quantity of geometric information in linear measurements

A.F. Bel'ts, L.Yu. Shevryov, A.N. Kaplunov

Teamwork Optimization of Harvesting and Transport Complexes on the Example of JSC «Uchkhoz Zernovoe», Zernograd District of Rostov Region 60

The authors consider the necessity of teamwork optimization of harvesting and transport complexes on the example of JSC «Uchkhoz Zernovoe». The paper substantiates the economic effectiveness of teamwork optimization necessity.

Key words: harvesting and transport groups, crop rotation, organization of transportation, agricultural terms

O.N. Larin, A. Oyuungarav, D.A. Pribytkova, Ts. Moononhuu, S. Baasan

Design Features of Supply Chain Digital Twins 65

The article considers the design features of digital twins for monitoring business processes in supply chains. The authors propose to structure the information flow about the state of business processes in the links of the supply chain to obtain operational information about current outcomes and improve the forecast precision.

Key words: transport strategy, supply chain management, digital twin, artificial intelligence, Internet of Things

D.G. Evseev, A.S. Utkin

Reliability Improvement of Braking System Components of Underground Motor-Car Rolling Stock 71

The authors consider and analyse the possibilities of reliability improvement of the brake system components, in particular, due to the development of the brake resistor unit, and the article justifies the option of its heating temperature reduction during operation.

Key words: braking systems, pneumatic braking, electric braking, electro-pneumatic braking

M.V. Fufacheva, E.M. Lytkina

Optimal Schemes for Track Development of Stations during Reconstruction for Effective Implementation of Interval Regulation Train System 75

At present, more and more attention is paid to the digitalization of organization and operation of train traffic. The article discusses the method of introducing interval regulation of train operation in sections taking into account the number and capacity of the layout of intermediate and technical stations of the railway division.

Key words: digitalization, simulation modelling, interval regulation system, arrangement of tracks (station layout)

B.I. Davydov, V.I. Chebotarev, K.S. Kablukova, Yu.O. Pazoysky
Train Operation Modelling Taking into Account Statistical Links of Trajectory Elements **81**

The distribution of random deviation from the schedule when the train arrives at the terminus is obtained, a single-train stochastic model of train operation (introduced by the authors in the article in 2020) being used. The found distribution has an integral form and depends on the joint distribution of the deviation when departing from the penultimate station and the travel time from this station to the terminus.

Key words: stochastic model, deviation from schedule, delay distribution, fitting criterion

D.S. Shutov, I.I. Lakin
Equipment Reliability Analysis of Moscow-2020 Electric Trains of Moscow Metro **92**

An important role in the transportation process of the Moscow Metro is the equipment reliability of the operated cars. The condition of the motor-car rolling stock equipment directly affects the train movement safety and the same direction train interval because the equipment failure results in the unscheduled rolling stock repair and reducing the number of simultaneously operated trains on the line.

Key words: reliability indicators, motor-car rolling stock, equipment failures, reliability indicators

Computer science and control

B.F. Bezrodny, L.V. Lyubimova
Technosphere Safety Protection by Reducing Risks from Cyber Threats **102**

The authors consider the approach to technosphere safety protection in terms of reducing the risks of hazardous impacts on humans and the environment through cyber threats. The paper describes the method for quantitative efficiency estimation of strategies for protecting automated railway control systems from cyber threats.

Key words: safety, reducing risks, damage, automated railway control system, cyber threat, efficiency estimation

Safety of human activity

V.A. Aksyonov, A.V. Kiselev, V.V. Samoilov, E.A. Kiseleva
Efficiency Improvement of Occupational Injury Prevention by Personnel Competence Development **106**

The article considers the issues of personnel training in occupational safety, health and life protection at work, professional development and knowledge actualization of personnel working at the enterprise; in particular, it is proposed to use specialized GoContractor software which allows optimizing and simplifying safety training.

Key words: occupational safety, training, professional development, enterprise, personnel, injuries, prevention

A.A. Kirillin, O.S. Sachkova, D.V. Klimova
Analysis of Personal Protective Equipment Efficiency for Infrastructure Complex Employees. . **110**

The article is devoted to personal protective equipment for infrastructure complex employees involved in repair and construction work. An analysis of harmful and hazardous factors acting in the work area was carried out.

Key words: overalls, technologies, fabrics, occupational safety, environmental factors, chemical factors

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ВОДОРОДНОЙ ТЯГЕ В УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ



С.П. Вакуленко



К.А. Калинин

В статье рассмотрены перспективы применения железнодорожного подвижного состава на водородной тяге для перевозок железнодорожным транспортом, в том числе в пригородно-городских перевозках. Определены эффекты от внедрения водородных топливных элементов в пассажирские и грузовые локомотивы. Выделены наиболее подходящие для нового вида подвижного состава сферы применения.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, грузовые перевозки, экология, альтернативная энергия, водород, водородная тяга

EDN: YKWPXB

Поиск энергетических альтернатив для осуществления перевозочного процесса является значимой задачей в мировой практике железнодорожных перевозок. Наравне с совершенствованием конструкции тепловозов и электровозов, а также их гибридных версий развиваются проекты тягового подвижного состава на альтернативных источниках энергии, например, газотурбовозы [1;2], однако проблемой, возникающей при их массовом внедрении, становится их меньшая производительность по сравнению с тепловозами и электровозами (существующие проекты газотурбовозов обладают меньшей мощностью и коэффициентом полезного действия топлива по сравнению с современными аналогами на традиционной тяге).

Проблемой использования дизельного топлива является значительный объем выбросов загрязняю-

щих веществ, приводящий к образованию парникового эффекта и наносящий непосредственный вред здоровью человека. В некоторых случаях, при наличии кружности следования поездов с использованием тепловозной тяги, объем выбросов становится сопоставимым с выбросами автотранспорта, что дискредитирует железнодорожный транспорт как наиболее экологичный вид [3].

Проблемой использования электровозов на электрифицированных участках являются повышенные эксплуатационные расходы на содержание линии при небольших размерах движения поездов и повышенные капиталовложения в сооружение новых линий и участков. Мировая практика доказывает необходимость и эффективность применения для пассажирских и грузовых перевозок нового типа локомотивов,

Вакуленко Сергей Петрович, кандидат технических наук, профессор, директор Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: пропускные и перерабатывающие способности линий и станций, управление вагонными парками, логистика грузовых и пассажирских перевозок, мультимодальные перевозки, транспортные коридоры, техническое оснащение и технология работы станций (всех типов). Автор более 300 научных работ.

Калинин Кирилл Антонович, ассистент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: организация скоростного и высокоскоростного движения, моделирование работы транспортных систем, развитие пассажирской и грузовой инфраструктуры, внедрение инновационных технологий на железнодорожном транспорте. Автор 33 научных работ.

с использованием в качестве источника энергии свободного водорода [4–7].

Новый принцип работы тягового подвижного состава

Одним из наиболее современных и экологических технических решений в конструировании систем тяги поездов является применение водородных топливных элементов [8;9].

Водородный топливный элемент — это устройство, работающее по принципу гальванического элемента, в котором подача активного вещества (водорода в газообразном виде) для химической реакции происходит поточно из соответствующих резервуаров, в которых хранятся запасы топлива (водород) в жидком, сжатом (компримированном) и твердом (металлогидридном) виде. При регулярной и своевременной подаче топлива система, основанная на применении экологических возобновляемых источников энергии (ВИЭ), может обеспечивать подвижной состав автономной бесперебойной подачей энергии, достаточной для движения поезда без использования электроэнергии из контактной сети.

Конкурентные преимущества предлагаемой технологии

1. Отсутствие необходимости электрификации участков железнодорожных линий с низкой интенсивностью движения грузовых и пассажирских поездов. Гибридный локомотив с использованием водородных элементов сможет преодолевать электрифицированные участки, используя пантографный токоприемник для получения энергии, а неэлектрифицированные участки — на энергии, вырабатываемой топливным элементом. Это преимущество позволит эффективно применять данные локомотивы на малодеятельных линиях [10;11] и участках с размерами движения не превышающими 40 пар поездов в сутки, электрификация которых нецелесообразна. В качестве примера такой линии может служить проект развития инфраструктуры Северный широтный ход, интенсивность движения грузовых поездов по которому не будет превышать 30 пар поездов в сутки.

2. Исчерпание или моральное устаревание существующих технологий добычи энергии из углеводородов, замещение их альтернативными источниками энергии.

3. Отсутствие шумового загрязнения окружающей среды, что в долгосрочной перспективе позволит улучшить качество жизни и здоровья населения агломераций, в которых используется подвижной состав на водородных топливных элементах.

4. Развитие водородной тяги отвечает задачам поставленным Правительством РФ в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, а именно переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике.

Существует несколько технологических решений производства свободного водорода, пригодного для транспортировки и получения энергии: серый, голубой, желтый, зеленый, каждое из которых имеет свои преимущества и недостатки, при этом наиболее вероятные способы получения топлива для России — это получение голубого и желтого типов водорода [12].

Принцип работы тягового подвижного состава с использованием водородных топливных элементов

Общий вид и принцип работы водородных топливных элементов, применяемых на водородном и гибридном подвижном составе приведены на рис. 1:

- на анод подается топливо (водород в газообразном состоянии), которое окисляется на его поверхности, в результате образуются ионы, переходящие на катод через электролит, и электроны, переходящие на катод по внешней цепи;
- на катод подается окислитель (кислород), который восстанавливается до воды; неиспользованный кислород, вода и выделяющееся в процессе химической реакции тепло отводятся от топливного элемента.

Принципиальные схемы расположения основных элементов и узлов на подвижном составе с использованием водородного топлива и гибридного подвижного состава с применением водородных элементов приведены на рис. 2. При разработке нового типа подвижного состава на водородной тяге или в гибридном исполнении в конструкцию локомотива могут быть заложены передовые разработки по управлению режимом движения с целью экономии расхода водородного топлива [13–16].

Конструкция локомотива с использованием только водородных топливных ячеек может эффективно применяться на неэлектрифицированных магистральных участках железных дорог и на малодеятельных линиях в качестве замены дизельной тяги.

Гибридный тяговый подвижной состав, имеющий как водородные топливные элементы, так и токосъем от контактного провода, может использоваться в случаях, если большая часть маршрута находится на электрифицированном участке пути, и только на некоторой его части отсутствует контактный провод. Такие маршруты возможны в пригородных пассажирских перевозках на неинтенсивных пригородных маршрутах.

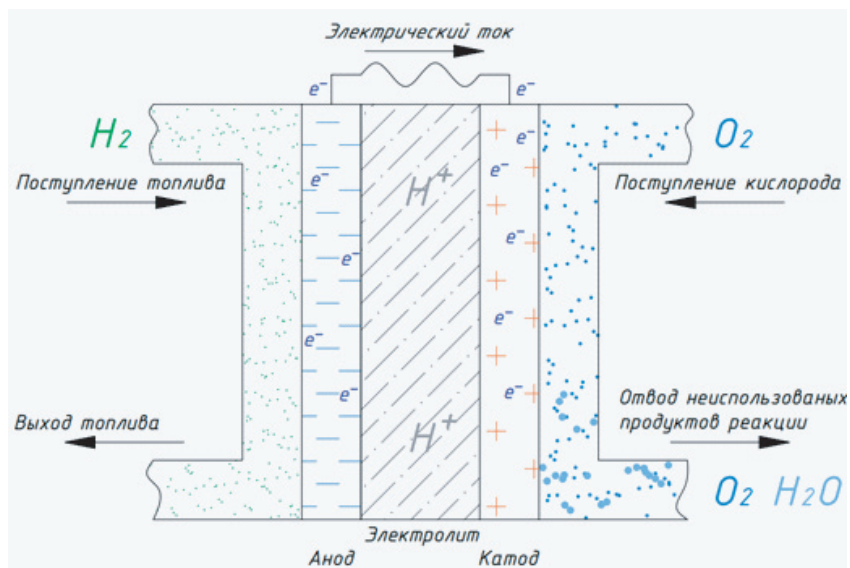


Рис. 1. Общий вид и принцип работы водородного топливного элемента

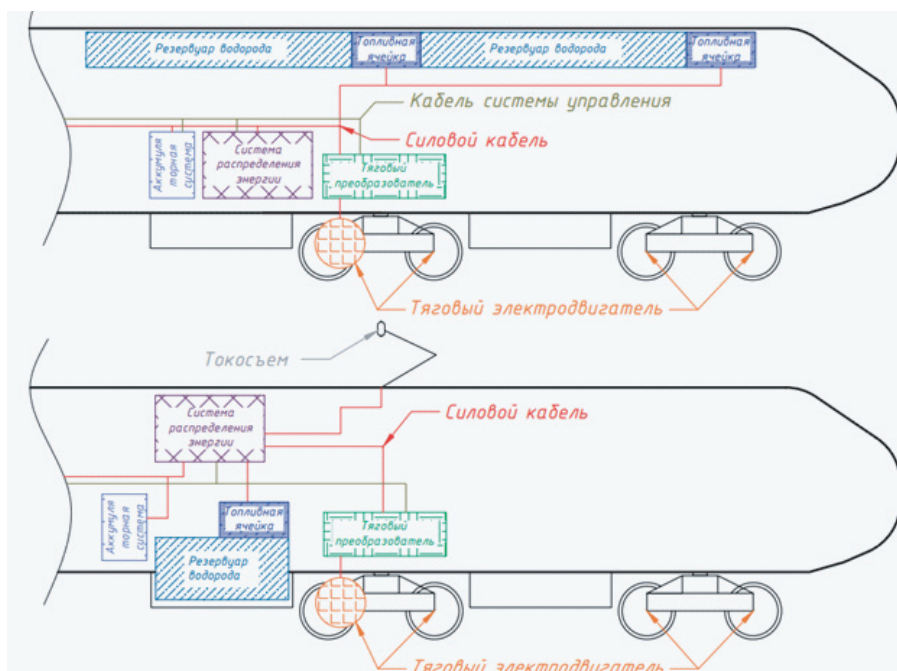


Рис. 2. Принципиальные схемы расположения резервуаров и устройств на локомотиве на водородном топливе и локомотиве с гибридной системой подачи энергии

В соответствии с мировой практикой внедрения водородной тяги на железнодорожном транспорте можно выделить следующие технологические ниши использования такого подвижного состава:

- в пригородно-городских железнодорожных пассажирских перевозках [17;18] при обращении на маршрутах длиной менее 100 км в режиме с частыми остановками или на неинтенсивных пригородных маршрутах;
- в межрегиональном пассажирском сообщении на маршрутах длиной более 100 км с неинтенсивным движением и редкими остановками;
- в маневровой работе с локомотивами средней мощности, при этом должны быть предусмотрены пункты экипировки локомотивов на водородной тяге [19];
- для магистральных локомотивов на неэлектрифицированных линиях.

Возможности применения водородной тяги в перспективных проектах развития железнодорожной сети

В качестве перспективного направления для организации перевозок грузов с использованием локомотивов на водородном топливе может рассматриваться Северный широтный ход — проект сооружения железнодорожной магистрали, общей протяженностью 707 км, которая свяжет западную и восточную части Ямало-Ненецкого автономного округа, а также Северную железную дорогу со Свердловской. Маршрут следующий: Обская—Салехард—Надым—Новый Уренгой—Коротчаево (рис. 3).

Потенциальными полигонами и участками для внедрения водородной тяги в пригородных пассажирских перевозках на сети железных дорог в России могут являться агломерации с числом жителей менее 1 млн человек, через которые проходят неэлектрифицированные железнодорожные линии, но существует острая необходимость в интенсификации пассажирских перевозок:

- Южно-Сахалинская агломерация: сквозной железнодорожный маршрут Корсаков—Южно-Сахалинск—Долинск протяженностью 85 км;
- Пензенская агломерация: два пересекающихся железнодорожных маршрута Пяша—Пенза—Селикса и Грабово—Пенза—Ардым протяженностью 31 и 42 км соответственно;
- Тамбовская агломерация: мультимодальный маршрут протяженностью 98 км Котовск—Тамбов—Мичуринск для пересадки на транзитные поезда дальнего следования, следующие в направлении Москвы и юга.

Внедрение пригородных пассажирских перевозок с использованием водородной тяги в крупнейших

агломерациях России, в Центральном и Санкт-Петербургском железнодорожных транспортных узлах позволит снизить экологическую и акустическую нагрузку на окружающую среду.

Замена эксплуатации электропоездов «Ласточка» на межрегиональных экспрессных маршрутах по технологии прицепки тепловоза ТЭП70БС к электропоезду на неэлектрифицированных участках, где такое сообщение показало высокий спрос:

- Москва—Владимир—Иваново;
- Санкт-Петербург—Выборг—Сортавала;
- Санкт-Петербург—Псков;
- Москва—Волоколамск—Ржев.

Выводы

Анализ мировой практики разработки и внедрения проектов развития тягового подвижного состава на водородной тяге позволил определить его конкурентную нишу и выделить полигоны и участки, наиболее подходящие для использования нового тягового подвижного состава в грузовом и пассажирском сообщении.

В пассажирском сообщении наиболее подходящими для внедрения технологии являются крупнейшие агломерации России, где использование водородной тяги позволит существенно снизить уровень экологического воздействия, а также агломерации, в которых на железнодорожной инфраструктуре отсутствует электрификация.

Одним из крупнейших инфраструктурных проектов по развитию грузового сообщения, где потенциально может быть применен подвижной состав с использованием водородных топливных элементов, является проект развития Ямало-Ненецкого автономного округа Северный широтный ход, для которого наиболее актуален вопрос целесообразности электрификации новой линии и применения альтернативных источников энергии.



Рис. 3. План развития железнодорожной инфраструктуры в рамках проекта Северный широтный ход

Литература

1. Пути решения проблемы перевода тепловозов на газообразное топливо / Е.Е. Коссов, В.В. Асабин, А.Г. Силюта [и др.]. — Текст: непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2021. — Т.80. — №4. — С. 191–200. — DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-4-191-200.
2. Повышение экологической безопасности тепловозных дизелей путем обогащения дизельного топлива водородом / Д.Я. Носырев, В.В. Асабин, А.А. Мишкин [и др.]. — Текст: непосредственный // Экология и промышленность России. — 2020. — Т.24. — №5. — С. 51–57. — DOI 10.18412/1816-0395-2020-5-51-57.
3. Экологический аспект организации грузового обхода в створе коридора «Центр-Юг» / С.П. Вакуленко, А.В. Колин, Д.Ю. Роменский, К.А. Калинин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2021. — №1(49). — С. 82–92. — DOI 10.20291/2079-0392-2021-1-82-92.
4. Sun, Y., Anwar, M., Hassan, N.M.S., Spiryagin, M. and Cole, C., 2021. A review of hydrogen technologies and engineering solutions for railway vehicle design and operations. *Railway Engineering Science*, 29(3), pp. 212–232.
5. Calvert, C., Allan, J., Amor, P., Hillmanssen, S., Roberts, C. and Weston, P., 2021. Concept development and testing of the UK's first hydrogen-hybrid train (HydroFLEX). *Railway Engineering Science*, 29(3), pp. 248–257.
6. Zenith, F., Isaac, R., Hoffrichter, A., Thomassen, M.S. and Møller-holst, S., 2020. Techno-economic analysis of freight railway electrification by overhead line, hydrogen and batteries: Case studies in Norway and USA. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 234(7), pp. 791–802.
7. D'ovidio, G., Ometto, A. and Valentini, O., 2020. A novel predictive power flow control strategy for hydrogen city rail train. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), pp. 4922–4931.
8. Попадьюко, Н.В. Водородная энергетика и мировой энергопереход / Н.В. Попадьюко, Г.И. Рожнятовский, Д.И. Дауди. — Текст: непосредственный // Инновации и инвестиции. — 2021. — №4. — С. 59–64.
9. Особенности использования водорода на железнодорожном транспорте: выбор агрегатного состояния и способы оснастки локомотива водородом / Ю.В. Бабков, Д.В. Котяев, Д.И. Прохор [и др.]. — Текст: непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — №2. — С. 107–118. — DOI 10.20295/2223-9987-2021-2-107-118.
10. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий / С.П. Вакуленко, А.В. Колин, Н.Ю. Евреенова [и др.]; Под редакцией С.П. Вакуленко. — Москва: Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2018. — 218 с. — Текст: непосредственный.
11. Вакуленко, С.П. Особенности интеграции малоинтенсивных линий с магистральными железнодорожными линиями / С.П. Вакуленко, А.В. Колин, Н.Ю. Евреенова. — Текст: непосредственный // Известия Транссиба. — 2019. — №4(40). — С. 61–69.
12. Перспективы применения водородной тяги на железных дорогах Российской Федерации / С.П. Вакуленко, О.Е. Пудовиков, К.А. Калинин, А.Г. Матвеева. — Текст: непосредственный // Железнодорожный транспорт. — 2022. — №5. — С. 38–41.
13. Баранов, Л.А. Изменение показателя производительности завода по производству сжиженного природного газа в зависимости от влияния метеорологического фактора / Л.А. Баранов, Н.В. Першин. — Текст: непосредственный // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. — 2020. — №4. — С. 2–5.
14. Совершенствование тягового подвижного состава на основе современных технологий энергосбережения / А.М. Евстафьев, Д.Е. Кирюшин, В.В. Никитин, О.Е. Пудовиков. — Текст: непосредственный // Электротехника. — 2021. — №2. — С. 2–6.
15. Пудовиков, О.Е. Система автоматического управления скоростью движения электропоезда городской транспортной системы / О.Е. Пудовиков, З.Т. Аунг. — Текст: непосредственный // Электротехника. — 2016. — №9. — С. 68–72.
16. Система автоматического управления скоростью грузового поезда с распределенной тягой / О.Е. Пудовиков, В.Г. Сидоренко, Н.Н. Сидорова, М.Д. Киселев. — Текст: непосредственный // Электротехника. — 2019. — №9. — С. 47–55.
17. Роменский, Д.Ю. Пригородно-городские железнодорожные пассажирские перевозки на диаметральных маршрутах крупных транспортных узлов (на примере Московского транспортного узла): специальность

05.22.08 «Управление процессами перевозок»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Роменский Дмитрий Юрьевич. — Москва, 2021. — 240 с. — Текст: непосредственный.

18. Эксплуатационные аспекты моделирования транспортных систем: учебное пособие для студентов направления бакалавриата «Технология транспортных процессов» всех профилей / С.П. Вакуленко, Н.Ю. Евреенова, Д.Ю. Роменский, К.А. Калинин. — Москва: Российская открытая академия транспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (МИИТ), 2021. — 129 с. — ISBN 978-5-7876-0396-5. — Текст: непосредственный.

19. Апатцев, В.И. Железнодорожные станции и узлы: [транспортные средства, эксплуатация железных дорог]: учебник для студентов, обучающихся по специальности 190401.65 «Эксплуатация железных дорог» и направлению подготовки 190700.62 «Технология транспортных процессов» ВПО / В.И. Апатцев, С.П. Вакуленко, А.К. Головнич [и др.]; под ред. В.И. Апатцева и Ю.И. Ефименко. — Москва: Учеб.-методический центр по образованию на ж.-д. трансп., 2014. — 854 с. — ISBN 978-5-89035-674-1. — Текст: непосредственный.

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ МОСКОВСКОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО КОЛЬЦА



А.Е. Чекмарев



С.А. Васильев

Рассмотрены возможности оценки пропускной способности элементов инфраструктуры транспортно-пересадочных узлов Московского центрального кольца посредством профессионального пакета имитационного моделирования AnyLogic.

Ключевые слова: транспортно-пересадочный узел, имитационное моделирование пассажиропотоков

EDN: RPCVXO

Развитие транспортной инфраструктуры городских агломераций является одним из ключевых направлений повышения транспортной доступности. При этом все ее элементы должны развиваться комплексно.

Транспортно-пересадочный узел (ТПУ) представляет собой хаб, где концентрируются пассажиропотоки взаимодействующих видов городского транспорта. Оценка пропускной способности ТПУ в условиях «пиковых» значений пассажиропотока с целью

выявления лимитирующих ее элементов (входные группы, лестничные марши, эскалаторы, турникетные линейки, рамки металлодетекторов, кассы, автоматы по продаже билетов и т.п.), приобретает особую актуальность [1;4].

Московское центральное кольцо (МЦК) открылось 5 лет назад и востребованность его только возрастает. За все время работы МЦК воспользовались 633 млн пассажиров [7], причем суточный пассажиропоток увеличился с 300 тыс. пассажи-

Чекмарев Александр Евгеньевич, заместитель директора научно-образовательного центра «Цифровые высокоскоростные транспортные системы» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: оптимизация транспортных систем и процессов, современные технологии работы транспортно-технологических систем и узлов, моделирование транспортных процессов. Автор 16 научных работ.

Васильев Сергей Александрович, инженер-исследователь отдела интеллектуального управления движением научно-образовательного центра «Управление мобильностью в транспортных системах агломераций» Академии «Высшая инженерная школа» Российского университета транспорта (АВИШ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: совершенствование технологии перевозочного процесса, современные технологии работы станций и узлов, моделирование транспортных процессов.

Кузнецова Анжелика Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортными процессами» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: совершенствование грузовых и пассажирских железнодорожных перевозок, современные методы организации перевозочного процесса, инновационные технологии на железнодорожном транспорте, организации движения поездов и пассажирских перевозок, информационные технологии в процессе управления перевозками. Автор 30 научных работ, в том числе одной монографии.

Подорожкина Алла Валентиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортными процессами» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: вопросы совершенствования технологии работы железнодорожных станций и участков, организации движения поездов и пассажирских перевозок, информационные технологии в процессе управления перевозками. Автор 36 научных работ, в том числе одной монографии.

ров в 2016 г. [8] до 650 тыс. пассажиров в 2021 г. [9]. Благодаря интеграции ТПУ МЦК и платформ пригородных железнодорожных направлений, на этих станциях пассажиропоток вырос на 30–50%. Примером служат такие ТПУ как «Ростокино» и «Нижегородская», также к ним можно будет отнести и ТПУ МЦК «Крымская», по окончании строительства станции метро «Крымская» (Севастопольский проспект). В связи с вышесказанным, на первый план выходят вопросы увеличения пропускной способности МЦК в целом, и отдельных ТПУ в частности, а также адекватной оценки пропускной способности их инфраструктуры.

Возникает необходимость прогнозирования и моделирования взаимодействия и динамики пассажиропотоков на транспортных объектах. Моделирование является наиболее эффективным способом решения задач, связанных с оптимизацией структуры ТПУ и движением пассажиропотоков внутри него с учетом разнообразия транспортных ситуаций и их случайного проявления. Кроме того, процессы прогнозирования и моделирования могут послужить своевременной оценке складывающейся ситуации при пиковых нагрузках по пассажиропотоку [10].

Поведение пассажиров является довольно сложным процессом, поэтому при планировании объектов с высокой плотностью пешеходного движения и ограниченным пространством для оптимизации потоков пешеходов, гарантированного предотвращения дискомфорта и снижения задержек, а также повышения безопасности движения, целесообразно проводить имитационное моделирование [2;4–6].

С использованием российского профессионального пакета имитационного моделирования AnyLogic были созданы имитационные модели и произведено имитационное моделирование пассажиропотоков на ТПУ МЦК «Крымская», «Ростокино», «Хорошево», «Верхние котлы», «Деловой центр».

AnyLogic поддерживает сбор статистики по плотности движущихся объектов в моделируемом пространстве и отображение этой информации на презентации в виде карты плотности [3].

Карта плотности пассажиропотока позволяет визуализировать соответствие цветов и численных значений плотности пассажиропотоков при моделировании в виде цветовой шкалы (заливки). Плотность потока измеряется в пассажирах на 1 квадратный метр. Красным цветом отображается критическая плотность пассажиропотока, 3 пасс./м². Желтый и зеленый цвета характеризуют пассажиропоток со средней плотностью, 1,5–2 пасс./м². Синий цвет используется для отображения низкой плотности, до 1,5 пасс./м².

При нулевой плотности на определенном участке уровня этот участок не закрашивается.

Для обобщенной оценки состояния работы ТПУ применяется цветовая градация. Каждому эксперименту после обработки присваивается тот или иной цвет в зависимости от результата эксперимента:

- красный цвет (нерабочий режим) — означает, что ТПУ не работает, образуются сгущения пассажиропотоков с низкой скоростью продвижения на входных группах, турникетных линиях, подходах к эскалаторам и других элементах инфраструктуры ТПУ, которые с течением времени увеличиваются, парализуя работу остановочного пункта;

- оранжевый цвет (терминальный режим) — означает, что ТПУ справляется с пропуском пассажиропотока, но присутствуют явные признаки перегруженности. Плотность пассажиропотока достигает критических значений и превышает их, образуются очереди на входных группах, турникетных линиях, подходах к эскалаторам и других элементах инфраструктуры ТПУ. Наблюдается динамика роста времени нахождения пассажиров на ТПУ и общего количества пассажиров на ТПУ;

- желтый цвет (устойчивый режим) — означает, что ТПУ работает стабильно, но на некоторых участках плотности пассажиропотока достигают критических значений по времени больше 20% от среднего времени нахождения пассажиров на ТПУ;

- зеленый цвет (комфортный режим) — означает, что ТПУ стабильно работает, а значения плотности пассажиропотока не превышают критических.

В процессе работы модели ТПУ, по каждому эксперименту отображаются параметры, характеризующие пассажиропотоки. В частности, визуализируются графики плотности, интенсивности пассажиропотоков в моделируемом пространстве ТПУ, длины очередей перед устройствами для обслуживания пассажиров, пропускной способности павильонов и др.

Текущие и перспективные значения пассажиропотока, которые служат исходными данными для моделирования, задает заказчик проекта.

В процессе имитационного моделирования создается базовая модель ТПУ, отображаемая в формате 2D и 3D. Его можно разделить на несколько этапов. На схеме остановочного пункта выделяются базовые элементы, к которым относятся: лестницы, эскалаторы, переходы, тоннели, зоны досмотра, двери и т.д. Определяется маршрут следования пассажиропотоков по назначениям, описывается каждый маршрут по элементам с учетом разграничения встречных потоков, скорость движения пассажиропотоков вычисляется отдельно для каждого элемента пути и зависит от плотности пассажиропотока. Определяется коли-

чество пассажиров по назначениям, прошедшее по элементу в максимальный час. Определяются наиболее загруженные элементы и их параметры, исходя из которых рассчитывается максимальная пропускная способность элементов (чел./ч). Рассчитывается интенсивность пассажиропотока каждого назначения на подходах к загруженным элементам.

На следующем этапе, модель адаптируется для использования на конкретном ТПУ. Учитывается:

- распределение пассажиропотока между павильонами как на вход, так и на выход;
- распределение пассажиров между входами одного павильона;
- распределение пассажиров на платформе;
- соотношение пассажиров, приобретающих проездные билеты в кассах и билетных терминалах;
- распределение времени на обслуживание одного пассажира в кассе, билетном терминале, турникете;
- скорость движения пассажиров;
- населенность поезда;
- интервал движения поездов;
- время стоянки поезда;
- наличие одновременного прибытия поездов с обоих направлений (залповое прибытие пассажиров).

Работа ТПУ считается стабильной, если за исследуемый период времени (час пик с 8:00 до 9:00) не возникает затруднений при передвижении пассажиров в ТПУ и их обслуживании в сервисах.

Для каждого ТПУ проводится оценка пропускной способности при текущих значениях пассажиропотока в час пик с возможностью 2D и 3D-визуализации модели. В качестве примера на рис. 1 приведен вид (3D) модели ТПУ МЦК «Крымская».

По результатам экспериментов на модели ТПУ при текущих пассажиропотоках устанавливают следующие параметры функционирования ТПУ в условиях «пиковых» нагрузок:

- очереди на турникетных линиях на вход и выход, а также у сходов на платформы во время залпового прибытия пассажиров и продолжительность их наличия;
- общее количество пассажиров, находящихся в павильонах ТПУ и на пассажирской платформе и наличие или отсутствие тенденции роста;
- время, затраченное как на посадку (от входных групп до двери вагона), так и на выход (от двери вагона до входных групп) для павильонов и наличие или отсутствие тенденции роста;
- диапазон изменения значений плотности пассажиропотока в павильонах и достижение им критических границ;
- диапазон изменения значений плотности пассажиропотока на платформе и достижение им критических границ;
- наличие или отсутствие на ТПУ зон со значениями плотности пассажиропотока приближающимися к критическим в соответствии с картой плотности пассажиропотока.



Рис. 1. Вид (3D) модели ТПУ МЦК «Крымская», при текущих значениях пассажиропотока

Пакет AnyLogic позволяет, в процессе реализации каждого эксперимента получить визуализацию результатов в виде графиков изменения соответствующей величины во времени.

На основе проведенных экспериментов на модели ТПУ выполняется оценка режима работы ТПУ (нерабочий, терминальный, устойчивый, комфортный).

Затем проводится аналогичная оценка пропускной способности ТПУ при заданных значениях пассажиропотока в «час пик» на перспективу.

В том случае, если на основе проведенных экспериментов получены результаты о функционировании ТПУ в терминальном режиме, присутствии признаков перегруженности, наличии очередей переходящих в заторы, то тогда делается вывод о целесообразности реконструкции ТПУ. Предлагаются проектные решения, направленные на увеличение площади павильонов, количества входных групп, турникетов, эскалаторов или разделение пассажиропотоков в ограничивающем элементе инфраструктуры реконструкции, а также другие в зависимости от того, какой конкретно ТПУ рассматривается и какие результаты моделирования были получены.

Так, например:

- график, приведенный на рис. 2, свидетельствует о том, что в восточном павильоне рассматриваемого ТПУ очереди на турникетных линиях на вход и выход превышают 150 человек, очередь у схода на платформу во время залпового прибытия пассажиров достигает 250 человек. Очереди имеют устойчивую тенденцию роста, идет накопление пассажиров в павильоне;

- график, приведенный на рис. 3, свидетельствует о том, что общее количество пассажиров, находящихся в павильонах ТПУ и на пассажирской платформе, имеет устойчивую тенденцию роста;

- график, приведенный на рис. 4, свидетельствует о том, что в восточном павильоне наблюдается устойчивый рост времени, затраченного как на посадку (от входных групп до двери вагона), так и на выход (от двери вагона до входных групп);

- график, приведенный на рис. 5, свидетельствует о том, что плотность пассажиропотока в западном павильоне рассматриваемого ТПУ, принимает средние значения, а плотность пассажиропотока на платформе и в восточном павильоне превышает критическое значение 3 пасс./м², что свидетельствует о формировании сгущения пассажиропотоков с низкой скоростью продвижения;

- на карте плотности пассажиропотока ТПУ (рис. 6) наблюдаются обширные зоны с критическими значениями плотности пассажиропотока (свыше 3 пасс./м²).

По результатам экспериментов, проведенных для модели ТПУ «Крымская» выявлено, что он функционирует в терминальном режиме (оранжевый цвет) около 20 минут, затем переходит в нерабочий режим — красный цвет; присутствуют явные признаки перегруженности, на элементах ТПУ формируются очереди переходящие сгущения пассажиропотоков с низкой скоростью продвижения; практически все элементы ТПУ восточного павильона (турникеты, эскалаторы, входные группы) не в состоянии освоить данные размеры пассажиропотока.

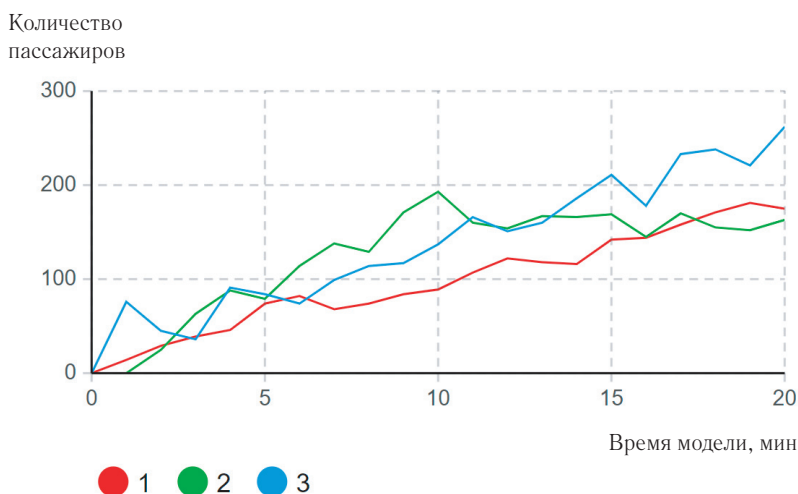


Рис. 2. Очередь перед элементом восточного павильона: 1 – турникетная линия на вход; 2 – турникетная линия на выход; 3 – сход на платформу

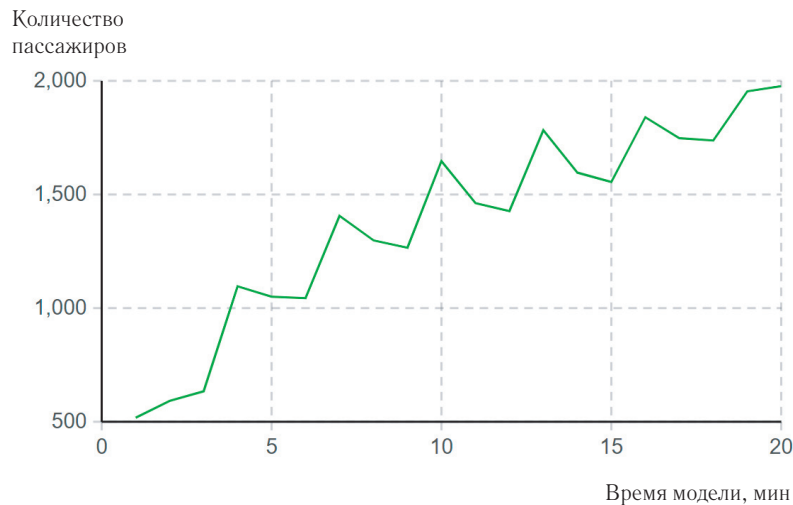


Рис. 3. Количество пассажиров на ТПУ

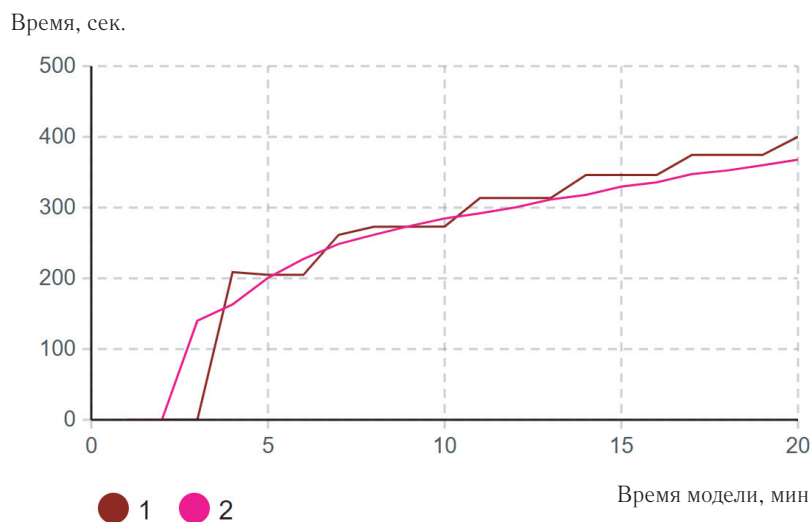


Рис. 4. Время затраченное пассажирами: 1 – на вход; 2 – на выход в восточный павильон

Следовательно, для устойчивой работы ТПУ при перспективных значениях пассажиропотоков необходима реконструкция с увеличением площадей павильонов, количества турникетов, эскалаторов.

Используя приведенный выше подход для оценки пропускной способности ТПУ «Крымская», МЦК «Ростокино», «Хорошёво», «Верхние котлы», «Деловой центр» было произведено имитационное моделирование пассажиропотоков на ТПУ и даны рекомендации для разработки проектных решений на перспективу до 2030 г.

В результате проведенных экспериментов имитационного моделирования можно сделать вывод о том, что при достаточной верификации и валидации моделей данный метод оценки пропускной способности:

- подходит для оценки пропускной способности параметров ТПУ различной конфигурации, с разным количеством платформ, входных групп и других инфраструктурных особенностей;
- дает объективную картину загруженности ТПУ;
- показывает проблемные элементы, зоны, влияние одних элементов на другие;
- позволяет оценить величину предельного пассажиропотока на ключевых элементах ТПУ, визуализировать их работу для разных условий;
- позволяет организовать движения пассажиров в пределах зданий и помещений пассажирского комплекса (пассажирских платформ, тоннелей, турникетных линий и т.д.);
- выработать рекомендации по развитию инфраструктуры.

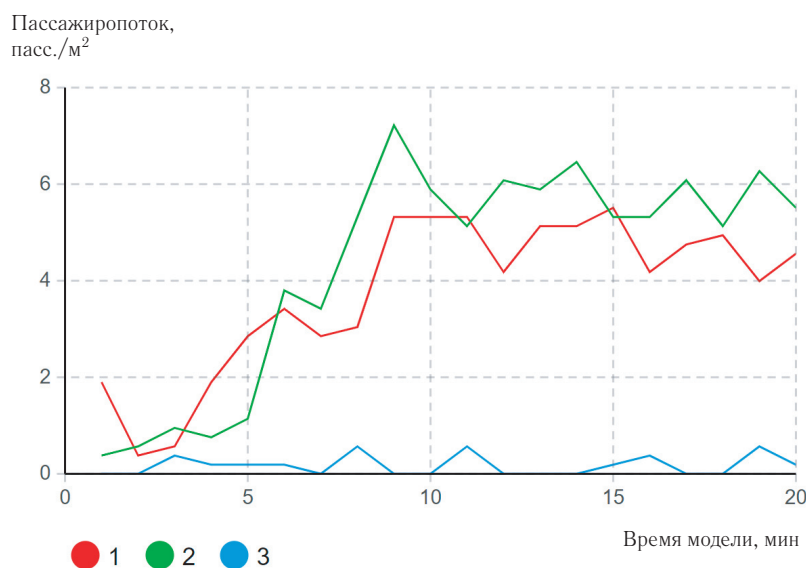


Рис. 5. Плотность пассажиропотока: 1–платформа; 2–восточный павильон; 3–западный павильон

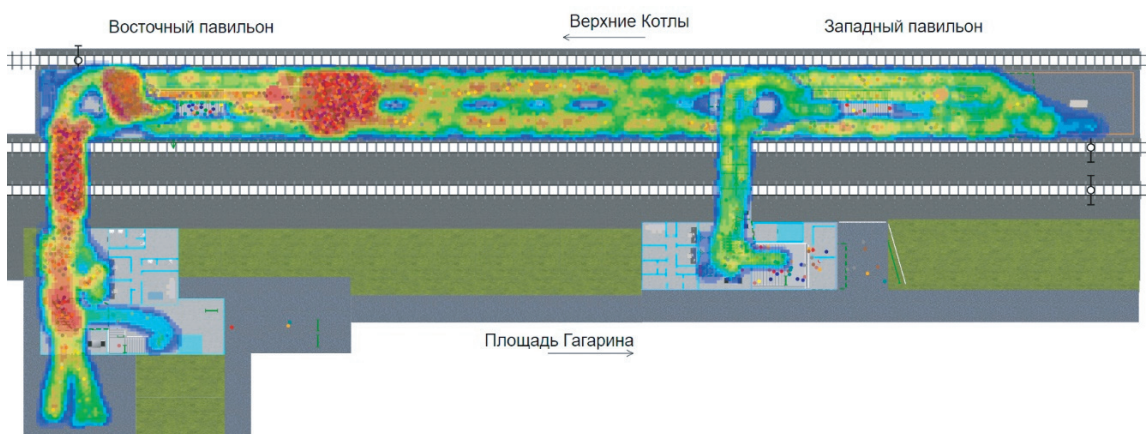


Рис. 6. Карта плотности пассажиропотока

Литература

1. Евреенова, Н.Ю. Выбор параметров транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: диссертация кандидата на соискание ученой степени кандидата технических наук / Евреенова Надежда Юрьевна — Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). — Москва, 2014. — 197 с. — Текст: непосредственный.
2. Лычкина, Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов: учебное пособие для слушателей программы eMBI / Н.Н. Лычкина, В.В. Годин. — Москва: Государственный университет управления, 2005. — 250 с. — Текст: непосредственный.
3. Киселева, М.В. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: учебно-методическое пособие / М.В. Киселева. — Екатеринбург: УГТУ — УПИ, 2009. — 87 с. — Текст: непосредственный.
4. Левченко, М.А. Имитационное моделирование транспортно-пересадочных узлов / М.А. Левченко. — Текст: непосредственный // Молодой учёный. — 2017. — № 11. — С. 79–81.

5. Моделирование пешеходных потоков: [сайт]. — URL: <http://www.simulation.su>. (дата обращения: 25.11.2021).
6. Имитационное моделирование как основной способ поддержки принятия решений в современном мире. Об организации имитационных исследований в России / В.В. Девятков, Н.Б. Кобелев, А.А. Емельянов, В.А. Половников, А.М. Плотников. — Текст: непосредственный // Третья всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2007. Сборник докладов. Пленарные доклады. — 2007. — Т1. — С. 37–46.
7. Информационная служба портала Стройкомплекса: [сайт]. — URL: <https://stroimsk.ru/news/mtsk-pierieviezlo-633-milliona-passazhirov-za-piat-let-sobianin> (дата обращения: 25.11.2021).
8. Информационная служба портала Стройкомплекса: [сайт]. — URL: <https://stroimsk.ru/news/bolieie-300-tysiach-passazhirov-pierieviezlo-mtsk-9-noiabria> (дата обращения: 25.11.2021).
9. Федеральное государственное унитарное предприятие «Информационное телеграфное агентство России (ИТАР-ТАСС)»: [сайт]. — URL: <https://tass.ru/moskva/9105893> (дата обращения: 25.11.2021).
10. Савостьянов, А.В. Современные методы прогнозирования пассажиропотоков / А.В. Савостьянов, Я.В. Храменкова, А.Н. Кузнецова. — Текст: непосредственный // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. — 2018. — № 14. — С. 36–39.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕМОНТИРУЕМЫХ ВАГОНОВ И ИХ УЗЛОВ

В статье показано математическое описание ремонтируемых вагонов и их узлов, используемое при технологическом проектировании объектов и процессов вагоноремонтного производства. Описана общая методика вариантного проектирования, формализованы группы процедур, структура информационных моделей и типовые задачи проектирования.

Ключевые слова: технологические процессы, автосцепное устройство вагонов, подвижной состав, технологическая документация

EDN: RJOCQO



К.А. Сергеев



О.И. Мироненко

Математическое описание конструкции вагона (или его узла) представим в виде:

$$S(K) = \langle K, R^k, C^k \rangle \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} K &= \{K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_n\}; \\ R^k &= \{R^k_1, R^k_2, \dots, R^k_i, \dots, R^k_n\}; \\ C^k &= \{C^k_1, C^k_2, \dots, C^k_i, \dots, C^k_n\}; \\ K_i &= \{k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{ij}, \dots, k_{iM_i}\}, (k_{ij} K_i, 1 < j < M^k_i); \\ R^k_i &= \{r^k_{i1}, r^k_{i2}, \dots, r^k_{ij}, \dots, r^k_{iS_i}\}, (r^k_{ij} R^k_i, 1 < j < S^k_i); \\ C^k_i &= \{c^k_{i1}, c^k_{i2}, \dots, c^k_{ij}, \dots, c^k_{iF_i}\}, (c^k_{ij} C^k_i, 1 < j < F^k_i). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где K — элементы вагона;

Сергеев Константин Александрович, доктор технических наук, доцент кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: технологическая подготовка производства вагоноремонтных предприятий. Автор 137 научных работ, в том числе двух монографий.

Мироненко Олег Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика систем, организация вагонной отрасли, дистанционные образовательные технологии. Автор 26 научных работ, в том числе четырех учебных пособий.

Кривич Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, начальник Учебного отдела учебно-методического многофункционального центра Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: повышение эффективности технологической подготовки вагоноремонтного производства, оценка потребительских свойств продукции железнодорожного транспорта. Автор 55 научных работ.

R^k — связи между элементами;

C_i^k — свойства элементов;

$K_1 = \{k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1j}, \dots, k_{1M_1}\}$ — элементы уровня №1, ($k_{1j} \in K_1, 1 < j < M_1^k$);

$K_2 = \{k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2j}, \dots, k_{2M_2}\}$ — элементы уровня №2, ($k_{2j} \in K_2, 1 < j < M_2^k$);

$K_i = \{k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{ij}, \dots, k_{iM_i}\}$ — элементы уровня № $\langle i \rangle$, ($k_{ij} \in K_i, 1 < j < M_i^k$);

$K_n = \{k_{n1}, k_{n2}, \dots, k_{nj}, \dots, k_{nM_n}\}$ — элементы уровня № $\langle n \rangle$, ($k_{nj} \in K_n, 1 < j < M_n^k$);

$M^k i$ — количество элементов уровня № $\langle i \rangle$.

$R_1^k = \{r_{11}^k, r_{12}^k, \dots, r_{1j}^k, \dots, r_{1S_1}^k\}$ — связи элементов уровня №1, ($r_{1j}^k \in R_1^k, 1 < j < S_1^k$);

$R_2^k = \{r_{21}^k, r_{22}^k, \dots, r_{2j}^k, \dots, r_{2S_2}^k\}$ — связи элементов уровня №2, ($r_{2j}^k \in R_2^k, 1 < j < S_2^k$);

$R_i^k = \{r_{i1}^k, r_{i2}^k, \dots, r_{ij}^k, \dots, r_{iS_i}^k\}$ — связи элементов уровня № $\langle i \rangle$, ($r_{ij}^k \in R_i^k, 1 < j < S_i^k$);

$R_n^k = \{r_{n1}^k, r_{n2}^k, \dots, r_{nj}^k, \dots, r_{nS_n}^k\}$ — связи элементов уровня № $\langle n \rangle$, ($r_{nj}^k \in R_n^k, 1 < j < S_n^k$);

$S^k i$ — количество связей уровня № $\langle n \rangle$.

$C_1^k = \{c_{11}^k, c_{12}^k, \dots, c_{1j}^k, \dots, c_{1F_1}^k\}$ — свойства элементов уровня №1, ($c_{1j}^k \in C_1^k, 1 < j < F_1^k$);

$C_2^k = \{c_{21}^k, c_{22}^k, \dots, c_{2j}^k, \dots, c_{2F_2}^k\}$ — свойства элементов уровня №2, ($c_{2j}^k \in C_2^k, 1 < j < F_2^k$);

$C_i^k = \{c_{i1}^k, c_{i2}^k, \dots, c_{ij}^k, \dots, c_{iF_i}^k\}$ — свойства элементов уровня № $\langle i \rangle$, ($c_{ij}^k \in C_i^k, 1 < j < F_i^k$);

$C_n^k = \{c_{n1}^k, c_{n2}^k, \dots, c_{nj}^k, \dots, c_{nF_n}^k\}$ — свойства элементов уровня № $\langle n \rangle$, ($c_{nj}^k \in C_n^k, 1 < j < F_n^k$);

F_i^k — количество свойств уровня № $\langle i \rangle$.

k_{ij} — обозначение элемента № $\langle j \rangle$ на уровне № $\langle i \rangle$;

$r_{ij}^k = \{r_{ij}^{k(1)}, r_{ij}^{k(2)}, \dots, r_{ij}^{k(\alpha)}\}$ — связи элемента № $\langle j \rangle$ на уровне № $\langle i \rangle$;

$c_{ij}^k = \{c_{ij}^{k(1)}, c_{ij}^{k(2)}, \dots, c_{ij}^{k(\beta)}\}$ — свойства элемента № $\langle j \rangle$ на уровне № $\langle i \rangle$;

(α) — количество связей элемента № $\langle j \rangle$ на уровне № $\langle i \rangle$;

(β) — количество свойств элемента № $\langle j \rangle$ на уровне № $\langle i \rangle$.

Формула (3) описывает свойства вагона на уровне связей

$$R^k = \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & \dots & k_j & \dots & k_n \\ (k_1, k_1) & (k_1, k_2) & \dots & (k_1, k_j) & \dots & (k_1, k_n) & k_1 \\ (k_2, k_1) & (k_2, k_2) & \dots & (k_2, k_j) & \dots & (k_2, k_n) & k_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (k_i, k_1) & (k_i, k_2) & \dots & (k_i, k_j) & \dots & (k_i, k_n) & k_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (k_n, k_1) & (k_n, k_2) & \dots & (k_n, k_j) & \dots & (k_n, k_n) & k_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

где $(k_1, k_2) = r_{12}^k$ — связь элементов k_1 и k_2 ;

$(k_1, k_j) = r_{1j}^k$ — связь элементов k_1 и k_j ;

$(k_n, k_1) = r_{n1}^k$ — связь элементов k_n и k_1 ;

$(k_i, k_j) = r_{ij}^k$ — связь элементов k_i и k_j .

Связи между элементами опишем графом (4):

$$G_R^k = \langle K, R^k \rangle, \quad (4)$$

где K — элементы вагона;

R^k — связи между элементами.

На рис. 1, 2 приведены структурная схема структуры автосцепного устройства и граф, являющийся математическим описанием этой структуры.

По вышеизложенной методике может быть создано математическое описание как вагона в целом так и любого его узла. Матрицы смежности и инцидентий графа, являющиеся математическим (цифровым) описанием конструкции, позволяют хранить и передавать в электронном виде качественные (структурные) характеристики вагона и его составных частей. На базе этого описания технолог вагоноремонтного предприятия может наиболее эффективным образом выполнять разузлование конструкции и планировать состав комплектов технологической документации на ремонт вагонов. 

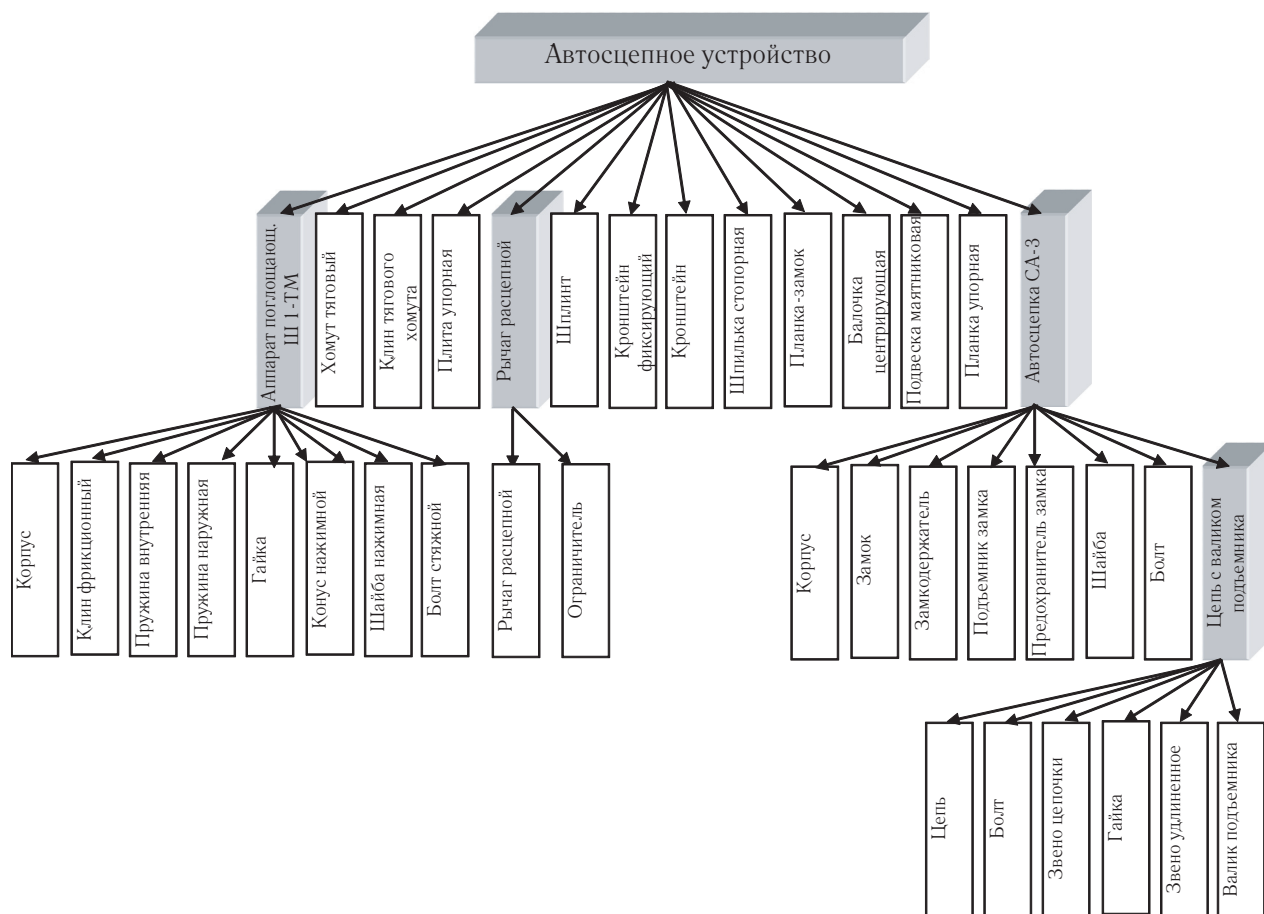


Рис. 1. Структурная схема автосцепного устройства

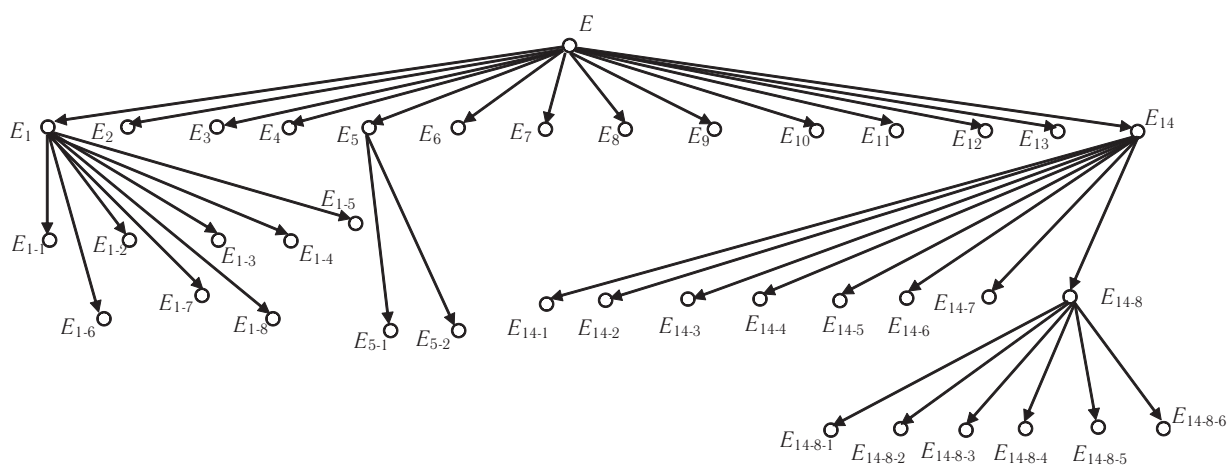


Рис. 2. Граф структуры автосцепного устройства:

$E - E_{14-8-6}$ — элементы автосцепного устройства.

E	E_9	E_{1-1}	E_{5-2}	E_{14-8-1}
E_1	E_{10}	E_{1-2}	E_{14-1}	E_{14-8-2}
E_2	E_{11}	E_{1-3}	E_{14-2}	E_{14-8-3}
E_3	E_{12}	E_{1-4}	E_{14-3}	E_{14-8-4}
E_4	E_{13}	E_{1-5}	E_{14-4}	E_{14-8-5}
E_5	E_{14}	E_{1-6}	E_{14-5}	E_{14-8-6}
E_6		E_{1-7}	E_{14-6}	
E_7		E_{1-8}	E_{14-7}	
E_8		E_{5-1}	E_{14-8}	

Рис. 2. Окончание

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПРИТОРМАЖИВАНИЯ УПРУГОЙ ВОЛНЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОЛЕС ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА РЕЛЬС С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ ВОЛНЫ В ЗОНЕ ДЕФЕКТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

На основе предположения, что рельсовая нить есть бесконечная струна, «прилипшая» к жесткому основанию, ставится и решается задача локализации этой волны. Показывается возможность выявления дефектов железнодорожного пути в местах «отлипания» струны.

Ключевые слова: волна, упругие колебания, железнодорожный путь, система колесо-рельс, дефект, локализация волны

EDN: ZXFZPY



А.А. Локтев



А.В. Сычева

Применение теории волновых процессов в системе взаимодействия «колесо-рельс» основано на предположении, что одним из показателей воздействия колеса на рельс является запись вагона-путеизмерителя о состоянии рельсовой колеи, которую условно считаем случайным процессом в пространстве [1].

Теоретически железнодорожный путь есть конструкция последовательно соединенных упругих элементов (пружин), которые сопротивляются упругим деформациям под воздействием подвижного состава [2]. Это весьма упрощенное представление было во второй половине XX века развито А.А. Шестаковым, и позже его учениками Ю.М. Черкашиным и О.В. Дружининой [3–7], которые предложили оценивать устойчивость железнодорожного пути как решение

задачи детерминистической теории устойчивости замкнутых множеств относительно обыкновенной дифференциальной системы. Стохастическая дифференциальная система в общем виде представлялась как [7]:

$$dx(t) = b(x(t))dt + \sigma(x(t))dW(t), \quad (1)$$

где, $b(x) = (b_1(x), \dots, b_n(x))$; $\sigma(x) = \|\sigma_{ij}(x)\|$, $ij = 1, 2, \dots, n$.

Постановка задачи

Предположим, что рельсошпальная решетка является сплошной средой, лежащей на упругом основании, к которой прикреплена рельсовая нить как бесконечная струна, находящаяся под воздействием динамических и вибрационных нагрузок от подвижного состава (упрощенно представлено на рис. 1). Система

Локтев Алексей Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: механика деформированного тела, моделирование объектов транспортной инфраструктуры, железнодорожный путь, реконструкция объектов исторического и архитектурного наследия. Автор 188 научных работ, в том числе трех монографий.

Сычева Анна Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: инженерное обеспечение строительства, инженерная геология. Автор 57 научных работ.

Сычев Вячеслав Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: создание новых технологий и технических средств для повышения эффективности технического обслуживания железнодорожного пути. Автор 156 научных работ. Имеет 20 патентов на изобретения.

«колесо-рельс» обладает инерционными, диссипативными и жесткими свойствами. Тогда (1) есть частный случай системы дифференциальных уравнений в форме Коши, которая представлена как:

$$\ddot{x}_k = \sum_{j=1}^{\frac{n}{2}} \beta_j \dot{x}_{kj} + \sum_{j=1}^{\frac{n}{2}} c_j x_{kj} + d_k \dot{W}_k, \quad (2)$$

$$k = 1, 2, \dots, \frac{n}{2}.$$

где x_j и $\dot{x}$ — относительные перемещения и скорости; β_j и c_j — коэффициенты, описывающие свойства системы «колесо-рельс», а W_k — ограниченный гауссов белый шум, как производная от случайного возмущения [8]. Система взаимодействия «колесо-рельс» есть динамическая система со случайными возмущениями, которую можно представить в виде стохастической дифференциальной системы и, в частном случае, ее можно представить в виде линейной системы дифференциальных уравнений в форме Коши, которыми описывают пространственные колебания вагона, движущегося по железнодорожному пути со случайными неровностями [9].

Решение задачи

Задача решается локализацией колебаний [10], вызванных «отслоением» струны от упругого основания. Частный случай решения задачи — оценка дефектности скреплений, определение дефектности промежуточного скрепления, не обеспечивающего крепление рельса к упругому основанию [11].

Характер затухания волны определяется минимальной частотой этих бегущих волн [12]. При прохождении состава по железнодорожному пути жесткость верхнего строения, как полубесконечной струны характеризуется кубической нелинейностью, а в каче-

стве нагрузки $P(f, t)$ принимается сосредоточенная сила вида

$$P_0 \delta(f - f_0) \delta(t), \quad (3)$$

где δ — дельта-функция Дирака; f — пространственная координата; t — время.

Уравнение, описывающее волновые процессы в струне, есть уравнение Клейна-Гордона [13] с кубической нелинейностью и дельтаобразной правой частью, а именно:

$$T y_{ff} - p y_{tt} - k y - V y^3 = P_0 \delta(f - f_0) \delta(t - 0), \quad (4)$$

где T — натяжение струны; p — ее линейная плотность; $V y^3$ — нелинейный вклад, вносимый упругим основанием.

Граничные условия:

$$y(f, 0) = y_t(f, 0) = 0,$$

$$y(\infty, t) = y_t(\infty, t) = 0.$$

На упругой натянутой струне сосредоточена масса M , тогда применим второй закон Ньютона для сосредоточенного включения M :

$$T y_{f|f=0} = M(y_{tt})_{f=0}. \quad (5)$$

Частота колебаний локализованной волны зависит [14] от амплитуды волны, а бегущие волны кратной частоты отводят энергию от локализованной волны и приводят к ее затуханию.

Определение дефектов железнодорожного пути по положению минимальной частоты бегущих волн относительно частоты отсечки. Задача решается на основе приближенной теории поперечного удара о балку Сен-Венана, заключающейся в предположении о неупругом и немгновенном характере удара. Частично подобная задача решалась ранее [15], но в настоящей работе развита следующим образом.

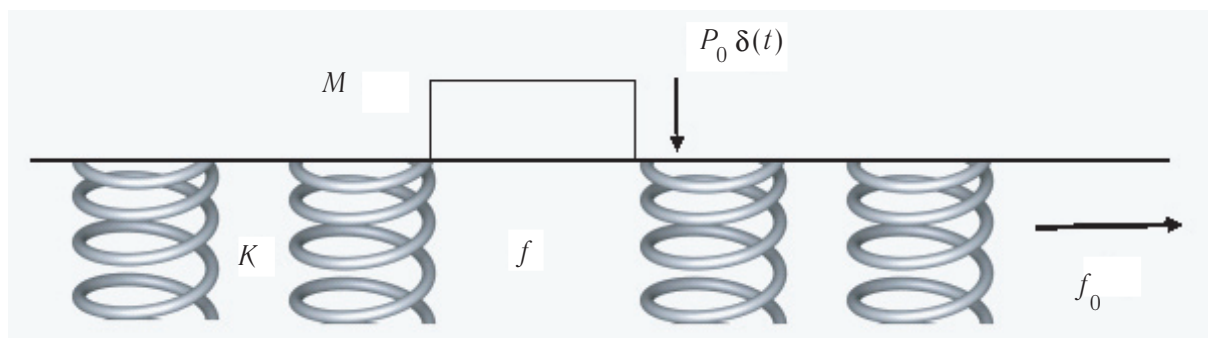


Рис. 1. Полубесконечная струна – рельсовая нить на упругом основании жесткостью K сосредоточенной массой M

Для нахождения явного вида функции $P=P(t)$ предлагается применить теорию удара С.П. Тимошенко для случая динамического контакта колеса и рельса на упругом основании.

Граничные условия устанавливаются из условия, что длина рельса такова, что колебания от первого контакта колеса с рельсом не дошли до конца плети до второго контакта, а именно:

$$y(x)|_{x=0}=y(x)|_{x=l}=0.$$

Скорость распространения упругих волн в стали имеет порядок $5 \cdot 10^3$ м/с. Найдя нулевые значения $P(\tau)=0$ общей зависимости $P=P(t)$, можно определить время контакта и оценить расстояние, на которое распространится упругое возмущение.

Динамический контакт двух тел происходит при выполнении условия, что общая нормаль в точке прикосновения недеформированных поверхностей колеса и рельса проходит через центр инерции тела вертикально. Уравнение поверхности колеса в точках начального касания с рельсом и их окрестностях свободно от аналитических особенностей, а кривизна колесной пары в тех же точках не должна быть равна нулю.

Дифференциальное уравнение колебаний стержня имеет вид

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{\rho}{EI} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{q(x,t)}{EI}, \quad (6)$$

где ρ — погонная масса рельса.

Предполагается, что начало координат находится на левом торце рельса длиной l , а координатная ось Ox направлена вправо. При этом выполняются начальные условия:

$$y(x,0)=0; \quad \frac{\partial y(x,0)}{\partial t}=0. \quad (7)$$

Предположим, что рельс по краям закреплен шарнирно, тогда:

$$(x)|_{x=0} = y(x)|_{x=l} = 0; \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}|_{x=0} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}|_{x=l} = 0. \quad (8)$$

После интегрального преобразования Лапласа из уравнения (6) получим

$$\frac{d^4 y^*}{dx^4} = -\frac{\rho}{EI} p^2 y^* + \frac{q^*(x,p)}{EI}. \quad (9)$$

Здесь функция $y^*(x,p)$ является представлением функции $y(x,t)$ в пространстве изображений, а $q^*(x,p)$ — изображением $q(x,t)$. Функция $y^*(x,p)$ удовлетворяет тем же краевым условиям, что и ее оригинал $y(x,t)$.

Если обозначить силу взаимодействия между колесом и рельсом как $P^*(p)$, задача определения $y^*(x,p)$ подобна задаче определения прогибов рельса, находящегося под действием силы $P^*(p)$ при соответственных краевых условиях. В прогибы $y^*(x,p)$ не входит местная деформация сжатия в области контакта колеса и рельса.

Прогибы рельса y^* , свободно опертого по концам, возникшие под действием силы P^* , можно представить в форме

$$y^*(x,p) = \frac{2P^* l^3}{EI \pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{p^2 n^4} \sin \frac{n \pi a}{l} \sin \frac{n \pi x}{l}, \quad (10)$$

где a — координата точки приложения силы $P^*(p)$.

Прогиб рельсовой плети, приведенный к силе взаимодействия между колесом и рельсом записывается в виде

$$u(x,p) = \frac{y^*(x,p)}{P^*(x,p)} = \frac{2l^3}{EI \pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{p^2 n^4} \sin \frac{n \pi a}{l} \sin \frac{n \pi x}{l}, \quad (11)$$

где $u(x,p)$ — изображение прогиба от единичной силы, точка приложения которой имеет координату a .

Дифференциальное уравнение движения центра инерции колесной пары с учетом действующего на нее приведенного веса имеет вид

$$m_1 \frac{d^2 s}{dt^2} = m_1 g - P(t). \quad (12)$$

Начальные условия динамического взаимодействия могут быть записаны в следующем виде:

$$s|_{t=0} = 0; \quad \frac{ds}{dt}|_{t=0} = v_0. \quad (13)$$

Используя интегральное преобразование и начальные условия, можно записать определяющее уравнение в виде

$$P^*(p) = -m_1 p^2 s^*(p) + m_1 p v_0 + m_1 g. \quad (14)$$

Здесь $s^*(p)$ — изображение перемещения $s(t)$.

Вертикальное перемещение колесной пары s можно представить в виде

$$s(t) = \infty(t) + y(x,t). \quad (15)$$

В пространстве изображений уравнение (15) примет вид

$$s^*(p) = \infty^*(p) + y^*(x,p). \quad (16)$$

Здесь $\infty^*(p)$ — местное смятие рельса и колеса в пространстве изображений.

Выражение (14) принимает вид

$$P^*(p) = -m_1 p^2 (\infty^* + y^*) + m_1 p v_0 + m_1 g. \quad (17)$$

Зависимость между местным смятием $\propto$ и силой взаимодействия $P(t)$ в общем случае выражается формулой:

$$\propto^* = kP^{*q}, \quad (18)$$

где параметр q имеет вид рациональной дроби. Значение $q=2/3$ соответствует начальному касанию в точке, а $q=1-\frac{1}{2n+1}$ — плотному начальному контакту.

С учетом зависимости для местного смятия и представления вертикальной скорости контактирующих тел в пространстве изображений, получим

$$P^*(p)(1+m_1p^2u) = -m_1p^2kP^{*q}(p) + m_1pV^*. \quad (19)$$

Для решения инженерной задачи и получения приближенного решения функционального уравнения предлагается применить алгоритм последовательных приближений, а уравнение (19) записать в виде

$$P^{*q} [km_1p^2 + (1+m_1p^2u)P^{*1-q}] = m_1pV^*. \quad (20)$$

Из (20) можно найти зависимость для силы взаимодействия в пространстве изображений

$$P^* = \left(\frac{V^*}{k} \right)^{\frac{1}{q}} p^{-\frac{1}{q}} \frac{1}{\left[1 + (1+m_1p^2u) \frac{P^{*1-q}}{km_1p^2} \right]^{\frac{1}{q}}}. \quad (21)$$

Предлагаемый алгоритм позволяет решить характеристическое уравнение третьего порядка, определяющего $P^*(p)$ и удовлетворяющего начальным и граничным условиям задачи.

Если динамический контакт колеса и рельса происходит в точке с координатой $a=l/2$, то имеем

$$u\left(\frac{l}{2}, p\right) = \frac{2l^3}{E\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p^2}{n^4}. \quad (22)$$

Силу взаимодействия в этом случае можно представить в виде

$$P^* = \left(\frac{v_0}{k} \right)^{\frac{1}{q}} \left(1 + \frac{g}{v_0q} p^{-1} + \frac{(1-q)g^2}{2!v_0^2q^2} p^{-2} + \frac{(1-q)(1-2q)g^3}{3!v_0^3q^3} p^{-3} + \dots \right) p^{-\frac{1}{q}} \times \left\{ \begin{aligned} & \left[1 - \frac{v_0^{\frac{1-q}{q}}}{qm_1k^q} \left(1 + \frac{(1-q)g}{v_0q} p^{-1} + \frac{(1-q)(1-2q)g^2}{2!v_0^2q^2} p^{-2} + \frac{(1-q)(1-2q)(1-3q)g^3}{3!v_0^3q^3} p^{-3} + \dots \right) \right] \times \\ & \times p^{-\frac{1+q}{q}} \left[1 + \frac{2m_1l^3}{E\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \right] + \frac{(1-q)v_0^{\frac{2-2q}{q}}}{2q^2m_1^2k^q} \times \\ & \times \left(1 + \frac{(2-2q)g}{v_0q} p^{-1} + \frac{(2-2q)(2-2q)g^2}{2!v_0^2q^2} p^{-2} + \frac{(2-2q)(2-2q)(2-4q)g^3}{3!v_0^3q^3} p^{-3} + \dots \right) \times \\ & \times p^{-\frac{2+2q}{q}} \left[1 + \frac{2m_1l^3}{E\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \right]^2 - \dots \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

Задаваясь различными значениями q , соответствующими различным условиям контакта и наличия дефектов в области взаимодействия, получим выражения для силы взаимодействия. Коэффициент k представляет собой параметр, объединяющий различные упругие постоянные:

$$k = \left[\frac{2 \cdot 4 \dots 2n}{1 \cdot 3 \dots (2n-1)} A \right] \left[\frac{2n+1}{2n} \cdot \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{2 \cdot 4 \dots 2n} \cdot \frac{\pi(\vartheta_1 + \vartheta_2)}{2A} \right]^{\frac{2n}{2n+1}}. \quad (24)$$

Здесь $\vartheta_i = \frac{\lambda_i + 2\mu_i}{4\pi\mu_i(\lambda_i + \mu_i)}$, $A = \frac{1}{2n!} \left(\frac{d^{2n} z_{1,2}}{dr^{2n}} \right)_{r=0}$, а λ_i

и μ_i — упругие постоянные Ляме для первого и второго тела соответственно.

На рис. 2 представлен пример расчета нормального перемещения рельса для следующих условий: $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\vartheta=0,3$, $q=2/3$, $A=1$, $n=1$, приведенная масса колесной пары m , начальная скорость v_0 контакта, который происходит в середине рельса длиной $l=20$ м. Скорость продольной волны $u_*=5000$ м/с. Время первого контакта равно $1,8 \cdot 10^{-4}$ с. В промежутке времени $t \in [4,06 \cdot 10^{-5}; 8,04 \cdot 10^{-5}]$

ускорение рельса $a(t) = \frac{P(t)}{m_3} \geq u_*$. При $t \in [4,06 \cdot 10^{-5};$

$9,81 \cdot 10^{-5}] \tilde{u}_0(t) = u_*$.

Несложно определить оптимальное управление на интервале времени $t \in [0; 4,06 \cdot 10^{-5}]$, поскольку из фактически линейной зависимости ускорения балки от времени на этом интервале можно представить $\tilde{u}_0(t) = u_* \sigma_0(t - t_0)$, где t_0 определяется перебором нескольких дискретных значений в окрестности середины интервала на основе минимизации модуля смещения рельса относительно основания, а $\sigma_0(t)$ — единичная функция Хэвисайда.

Для рассматриваемого случая можно записать:

$$\tilde{u}_0(t) = u_* \sigma_0(t - t_0),$$

при $t_0 = 0,192 \cdot 10^{-4}$ и $t \in [0; 9,81 \cdot 10^{-5}]$. (25)

При этом максимальное отрицательное смещение рельса относительно основания будет равно $2,7478 \cdot 10^{-3}$ м, а максимальное положительное смещение составляет $3,077 \cdot 10^{-3}$ м, в то время как для случая

мгновенного удара будем иметь $\tilde{I}_1(\tilde{u}_0) = \frac{v_0^2}{2u_*} = 0,01$ м.

График смещения рельса относительно основания по времени приведен на рис. 2.

Заключение

1. Предлагается способ выявления дефектов скреплений по эффекту «притормаживания» с локализацией упругой волны от подвижного состава, движущегося по упругому основанию — железнодорожному пути.

2. Применение теории динамического контакта С.П. Тимошенко при решении задачи о динамическом поведении контактирующих колеса и рельса позволило уточнить традиционные решения по максимальному смещению рельса относительно основания при аппроксимации вязкоупругого элемента в зоне контакта рельса и шпалы абсолютно жесткой связью.

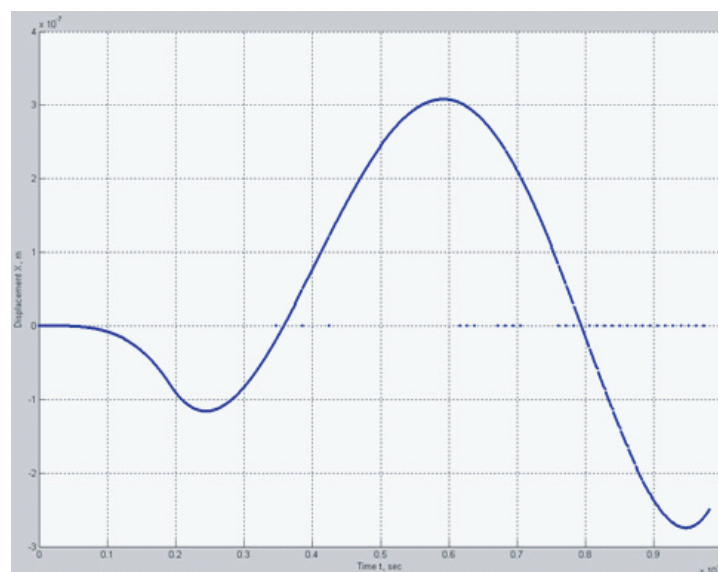


Рис. 2. Смещение рельса относительно основания при оптимальном управлении $\tilde{u}_0(t)$ на протяжении первого контакта с колесом

Литература

1. Сычев, В.П. Методы оценивания железнодорожного пути характеристиками случайных процессов / В.П.Сычев. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2007. — №3. — С. 84–88.
2. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта / В.В. Виноградов и [др.]; Под ред. В.В. Виноградова, А.М. Никонова. — Москва: Маршрут, 2003. — 485 с. — Текст: непосредственный.
3. Шестаков, А.А. Индексные и дивергентные признаки устойчивости автономной системы дифференциальных уравнений / А.А. Шестаков, А.Н. Степанов. — Текст: непосредственный // Дифференциальные уравнения. — 1979. — Т.18, №4. — С. 650.
4. Дружинина, О.В. Необходимые и достаточные условия существования автоколебаний в конечно-мерной непрерывной динамической системе / О.В. Дружинина, А.А. Шестаков. — Текст: непосредственный // Доклады Академии наук. — 2008. — Т. 418, №1. — С. 37–41.
5. Сычев, В.П. О задаче обеспечения системной безопасности железнодорожного пути / В.П. Сычев, О.В. Дружинина, Ю.М.Черкашин. — Текст: непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. — 2009. — №12. — С. 2–4.
6. Дружинина О.В. О равномерной устойчивости состояния равновесия дифференциального уравнения, зависящего от многомерного параметра / О.В. Дружинина, А.А. Шестаков. — Текст: непосредственный // Доклады Академии наук. — 2001. — Т.377, №4. — С. 458.
7. Об устойчивости движения стохастической дифференциальной системы / Ю.М. Черкашин, А.А. Шестаков. — Текст: непосредственный // Современные методы расчета вагонов на прочность, надежность и устойчивость. Сборник научных трудов. Сер. «Труды ВНИИЖТ» Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. — Москва. 1986. — С. 28–36.
8. Бабешко, В.А. Динамика неоднородных линейно-упругих сред / В.А. Бабешко, Е.В. Глушков, Ж.Ф. Зинченко. — Москва: Наука, 1989. — 343 с. — Текст: непосредственный.
9. Исследование особенностей динамической реакции верхнего строения пути от подвижного состава на основе модели трансверсально-изотропной пластины на деформируемом основании / А.А. Локтев, А.В. Сычева, Е.В. Запольнова, В.П. Сычев, В.Г. Дмитриев. — Текст: непосредственный // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2018. — №2. — С. 55–65.
10. Индейцев, Д.А. Локализация нелинейных волн в упругих телах с включениями/ Д.А. Индейцев, Е.В. Осипова. — Текст: непосредственный // Акустический журнал. — 2004. — Т 50, №4. — С. 496–503.
11. Сычева, А.В. Способ оценки дефектности элементов железнодорожного пути локализацией волновых процессов взаимодействия «колесо-рельс»/ А.В. Сычева, Н.В. Кузнецова. — Текст: непосредственный // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. — 2020. — Т. 16, №16 (16). — С. 114–121.
12. Сычева, А.В. Управление жесткостью пути на переходных участках / А.В. Сычева, А.А. Локтев, В.П. Сычев. — Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. — 2021. — №2. — С. 16–20.
13. Денисов, Г.Г. К задаче об устойчивости одномерных безграничных упругих систем / Г.Г. Денисов, Е.К. Кугушева, В.В. Новиков. — Текст: непосредственный // Прикладная математика и механика. — 1985. — Т. 49, вып. 4. — С. 691–696.
14. Локтев, А.А. Метод определения параметров железнодорожного пути на основе оценки анизотропных свойств грунтов геологической особенности местности / А.А. Локтев, А.В. Сычёва. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2014. — №4. — С. 40–47.
15. Автоматизированная система выявления дефектов колес подвижного состава на основе оценки ударного неосесимметричного воздействия колеса на рельс при моделировании верхнего строения пути ортотропной пластиной / А.А. Локтев, В.П. Сычев, Д.А. Локтев, В.Г. Дмитриев. — Текст: непосредственный // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2017. — №4. — С. 59–60.

ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ РАБОТНИКОВ ГОРОДСКИХ РЕЛЬСОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Проанализированы и сформулированы требования к комплексной системе тестирования оперативных работников городских рельсовых транспортных систем. В статье на основе методологии IDEF0 предлагается моделирование процесса проверки знаний работников, а также проведен графический структурный анализ внедряемой системы.

Ключевые слова: городские рельсовые транспортные системы, квалификация, проверка знаний, интегрированные системы

EDN: MMUNOT



Л.Н. Логинова



Д.А. Дидушок

В быстро развивающемся современном мире транспорт играет ключевую роль в обеспечении перевозок пассажиров. В условиях урбанизации и автоматизации мегаполисов увеличивается нагрузка на транспортную систему, а именно, на городские рельсовые транспортные системы (ГРТС): метрополитен, трамвай и пригородные электропоезда, т.к. именно эти системы обеспечивают перевозку пассажиров точно в срок. Управлением и обеспечением бесперебойной работы ГРТС занимаются оперативные работники, под которыми понимаются поездные диспетчеры, принимающие ключевые решения в случае сбойных ситуаций. Квалификация управляющего и обслуживающего персонала предполагает наличие определенного уровня подготовки для выполнения

служебных обязанностей. В основе квалификации работника лежат полученные знания, опыт работы, а также профессиональные навыки и периодические повышения квалификации [1].

Главным критерием качества управления движением городского рельсового транспорта является обеспечение безопасности и удобства в перевозке пассажиров, а также правильные действия при возникновении чрезвычайной ситуации. При устранении сбоев и неполадок в работе оперативные работники ГРТС должны следовать инструкциям, которые прописаны в положениях Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, инструкции по сигнализации на железных дорогах Российской Федерации, а также инструкции по дви-

Логинова Людмила Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: теория автоматического управления, управление и планирование движения поездов, оценка качества управления движением поездов, обучение оперативных работников транспортных систем. Автор 36 научных работ.

Дидушок Диана Александровна, магистрант кафедры «Управление и защита информации» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: теория автоматического управления, оценка качества управления движением поездов, обучение оперативных работников транспортных систем. Автор пяти научных работ.

жению поездов и маневровой работе на железных дорогах Российской Федерации (на которых основано движение Московского центрального кольца и Московских центральных диаметров в рамках работы ГУП «Московский метрополитен»). Оперативные работники должны знать инструкцию по движению поездов и маневровой работе на метрополитенах Российской Федерации [2], Типовые правила технической эксплуатации метрополитена в г. Москве, (на которых основана работа ГУП «Московский метрополитен»).

Одним из средств повышения безопасности движения поездов ГРТС является постоянное обучение и контроль знаний работников, который предпочтительнее вести в условиях, приближенных к действительности. Обучение персонала — это непрерывный процесс получения сотрудниками новых знаний, усвоения ими новых навыков и приемов работы. Все чаще обучение сотрудников выполняется с помощью обучающих программ.

Они представляют собой унифицированную форму обучающего материала, который может включать как текстовую информацию, так и графическую, видео- и аудиолекции для удобного и наглядного представления учебного материала. В настоящее время обучающие программы все чаще используются и в стандартном варианте обучения в школах и высших учебных заведениях. Еще несколько лет назад электронные учебные пособия использовались только в дистанционном обучении.

К наиболее значимым формам обучения, проверки знаний и повышения квалификации работников городских рельсовых транспортных систем (ГРТС) относятся [3]:

- тестовая форма или тестирующая система, которая применяется для проверки теоретических знаний документации, правил и положений организации пассажирских перевозок. Тестовая форма применяется с использованием различных форм тестовых заданий [3];

- с применением событийных абстрактных моделей;

- с применением моделей реального объекта ГРТС, работающих в реальном времени.

В основе форм тестирования с применением моделей, как правило, лежит имитационная модель, на которой воспроизводятся процессы управления и движения, происходящие в реальной жизни [4].

Для проверки знаний сотрудников ГРТС используются тестирующие системы, в которых работник должен выбрать один или несколько правильных вариантов ответа или установить соответствие между предложенными вариантами в задании.

Тестирующие системы можно разделить на две большие категории [5]:

- онлайн системы тестирования;
- нативные информационные системы.

На сегодняшний день существует множество компаний, которые имеют собственные системы автоматического тестирования знаний оперативных работников. Однако на российском рынке не существует решения, которое позволяет проверять знания у оперативных работников всех ГРТС, к которым относятся Московский метрополитен, Московские центральные диаметры, Московское центральное кольцо [6] и Московский трамвай.

Системы тестирования активно разрабатываются и внедряются как в российских, так и в зарубежных компаниях. Как правило, логикой и композицией системы идентичны, но отличаются набором тестовых вопросов. Так, например, в ОАО «РЖД» используют корпоративную автоматизированную систему контроля знаний работников ОАО «РЖД» [7], которая создана на базе системы дистанционного обучения (СДО) с целью формирования общедоступной образовательной онлайн-системы, приводящей профессиональные знания сотрудников всех предприятий ОАО «РЖД» к единому квалифицированному стандарту. Любой работник ОАО «РЖД», независимо от подразделения, может пройти переподготовку дистанционно, по единому регламенту. Система выполняет свои функции по оценке знаний сотрудников, но не запоминает фамилию и имя пользователя, дату и время прохождения им теста, а также полученный результат, что можно отнести к недостаткам данной системы.

Проект «Росавиатест» [8] был создан на добровольной основе и выполняет свои функции при оценке знаний сотрудников авиакомпаний. В основу тестов легли официальные вопросы, утвержденные приказом Министерства транспорта Российской Федерации. Автоматизированная система «Росавиатест» выполняет свои функции при оценке знаний сотрудников авиакомпаний, по окончании тестирования отражает количество правильных ответов, процентное отношение верных и неверных ответов, а также предоставляет рекомендации для устранения пробелов в знаниях сотрудников.

Для подготовки специалистов к аттестации в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) также используется система автоматического тестирования. Система [9] предназначена для подготовки специалистов к аттестации и проверке знаний на предприятиях Ростехнадзора, содержит актуальные бесплатные типовые онлайн-тесты для подготовки специалистов к аттестации и проверке знаний в комиссии

Ростехнадзора, формирует отчет, который в подробностях показывает пробелы в знаниях.

Зарубежные компании активно разрабатывают системы тестирования во многих областях промышленности, так, например, в [10] приводится описание системы имитационного обучения, которая предназначена для обучения навыкам работы в электрических системах. Обзор систем моделирования в обучении в [11] показывает, что использование компьютерного моделирования (симуляторов) — практичная альтернатива дорогостоящим физическим моделям. Симуляторы предлагают обучение там, где физическая подготовка не может быть проведена (стихийные бедствия, крупномасштабный терроризм). Вопросы о функциях обучения, необходимые для поддержки обучения и инноваций на уровне всей организации в век цифровой трансформации, рассматриваются в [12]. Системы тестирования студентов, с помощью которых можно упростить и облегчить проверку знаний обучающихся, созданы с использованием современных интернет-технологий. Разработана платформа [13], которая ускоряет процесс учебного процесса, в том числе обучения письму, а также обеспечивает удобство оценки знаний студентов. Для оперативных работников и сотрудников ГРТС данные аспекты играют важнейшую роль.

На кафедре «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) разработана и внедрена Система автоматизированной проверки знаний поездных диспетчеров линии метрополитена, которая обеспечивает проведение обучения и проверки знаний поездных диспетчеров [14]. Входящая в состав системы подмодель генерации тестовых заданий, ориентированная на проверку знаний сотрудника положений инструкции по движению поездов и маневровой работе, содержит разные формы традиционных гомогенных тестовых заданий: задания с выбором одного правильного ответа, с выбором нескольких правильных ответов, задания на установление соответствия, задания на установление правильной последовательности [14].

Обзор существующих систем тестирования позволяет сформулировать следующие требования к интегрированной системе проверки знаний работников ГРТС:

- обеспечивать прохождение тестирования по всем темам инструкции по движению поездов ГРТС;
- инкапсулировать данные о пройденных тестах в базу данных для того, чтобы обучающийся или руководитель мог просмотреть результаты прохождения процедуры проверки знаний;

- обладать внутренней системой управления для учета руководителей и идентификационных данных пользователей;

- обеспечивать выдачу вопросов в случайном порядке без повторения вопросов;

- обеспечить заданный порядок проверки знаний по соответствующим темам, при этом доступ к новой теме должен быть предоставлен пользователю после прохождения темы с приоритетом ниже;

- процесс проверки знаний должен подвергаться контролю со стороны назначенных лиц, которые следят за процессом обучения и оповещают об успешной/неуспешной аттестации вышестоящее руководство;

- располагать систему тестирования в облачном хранилище для обеспечения работника или проверяющего возможностью воспользоваться услугами системы проверки знаний «в любом месте и в любое время на любом устройстве, не привязываясь к рабочему месту».

Процесс проверки знаний и обучения может быть рассмотрен как бизнес-процесс, который следует внедрить в организации для определения уровня знаний работников ГРТС. На рис. 1 представлено моделирование бизнес-процессов после внедрения интегрированной системы (ИС) проверки знаний работников ГРТС с функцией тестирования знаний с помощью методологии IDEF0. При внедрении ИС данные о сотрудниках, ответственных за проведение тестирования (руководителях), а также учебные материалы и тесты должны храниться в базе знаний (базе данных). Таким образом, обучение и проверку знаний целесообразно проводить с использованием ИС автоматизировано. Процесс автоматического формирования отчетной документации позволит повысить качество выходной информации.

Первым этапом работы является учет сотрудников, которые должны проходить обучения или проверку знаний. Далее выполняется обучение сотрудников. Обучение может проходить в форме лекций, семинаров, дистанционных занятий и т.д. После окончания обучающего процесса, сотрудникам предлагается пройти тестирование полученных знаний. По окончании тестирования знаний для каждого сотрудника составляется ведомость результатов тестирования, которая анализируется ответственным сотрудником.

В случае неудовлетворительных результатов тестирования принимаются соответствующие управленческие решения в зависимости от количества полученных баллов. Анализ результатов проводится как отдельно по сотрудникам, так и по всей учебной группе.

На рис. 2 представлена декомпозиция процесса «Тестирование сотрудников». Перед проведением учебных занятий предполагается, что руководитель загружает учебные материалы в базу данных. Учебные материалы доступны всем сотрудникам. Руководитель составляет тест или выбирает тест из представленных, назначает тестирование для группы сотрудников. При назначении теста сотрудник получает электронное письмо-оповещение о необходимости повторить пройденный материал и пройти тестирование.

На рис. 3 представлена декомпозиция процесса «Анализ результатов тестирования».

ИС должна автоматически проверять результаты тестирования каждого сотрудника и сохранять результаты в базе данных. Руководитель и работник ГРТС получают доступ к результатам тестирования после авторизации в системе.

На рис. 4 представлена диаграмма процесса «Формирование отчетов», которая обеспечивает автоматическое формирование отчетов и облегчение работы с отчетной документацией.

Систему проверки знаний и обучения следует относить к обучающим информационным системам (ОИС), так как под информационной системой понимается, как правило, взаимосвязанная совокупность средств, методов и персонала, используемых для хранения, обработки и выдачи информации в интересах достижения поставленной цели [15].

Проведем графический структурный анализ, описывающий внешние по отношению к ИС источники и адресаты данных, логические функции, потоки данных и хранилища данных, к которым осуществляется доступ. Одним из основных инструментов структурного анализа и проектирования информационных систем является диаграмма потоков данных (*data flow diagram, DFD*). На рис. 5 представлена DFD-диаграмма потоков данных ИС проверки знаний сотрудников ГРТС.

После внедрения ИС значительно упрощен процесс анализа результатов проведенного тестирования

знаний работников ГРТС. Результаты анализа целесообразно использовать при формировании управленческих и аттестационных решений.

Информационной обучающей системой, описание которой приведено в данной статье на рис. 5, является известная система под названием «Система автоматизированной проверки знаний поездных диспетчеров линии метрополитена». Система прошла адаптацию и проверена на адекватность с помощью проведенных многочисленных опытов. Работа с системой показала целесообразность проведения обучения оперативных работников метрополитена. На основе существующей системы, с целью ее дальнейшего совершенствования, на основе предложенных в статье подходов к моделированию возможна трансформация системы в «Интегрированную систему проверки знаний работников городских рельсовых транспортных систем».

Заключение

Для того, чтобы обеспечивать стабильную бесперебойную работу ГРТС, необходимо постоянно обучать и тестировать сотрудников. Для разработки систем тестирования следует опираться на опыт существующих отечественных и зарубежных систем тестирования, а также внедрять современные методы и решения. Таким решением является создание и внедрение интегрированной системы проверки знаний сотрудников ГРТС, с помощью которой может быть значительно упрощен процесс анализа результатов проведенного тестирования, а результаты анализа целесообразно использовать при формировании управленческих и аттестационных решений. 

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сирius», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001.

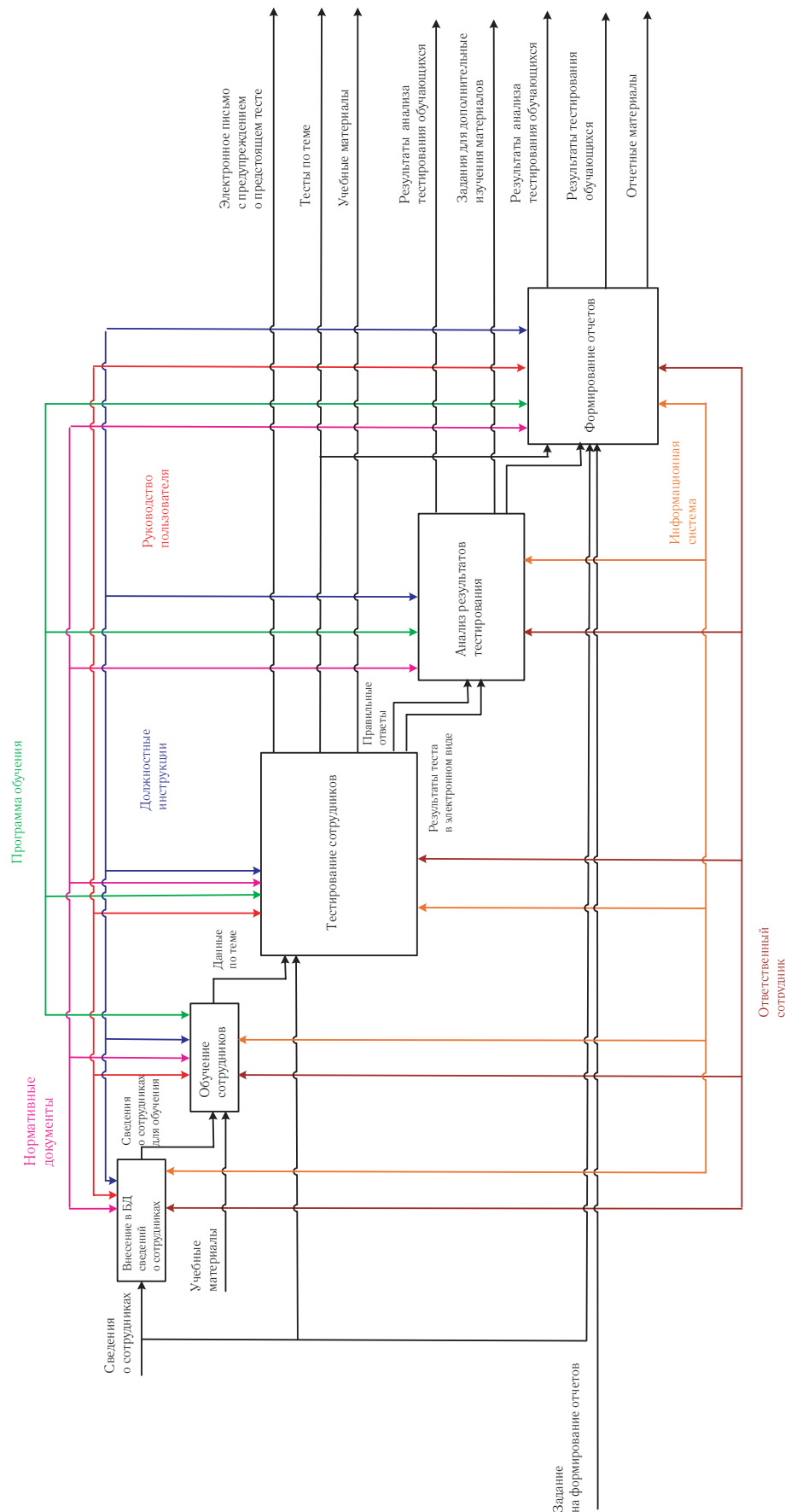


Рис. 1. Декомпозиция контекстной диаграммы «как будет»

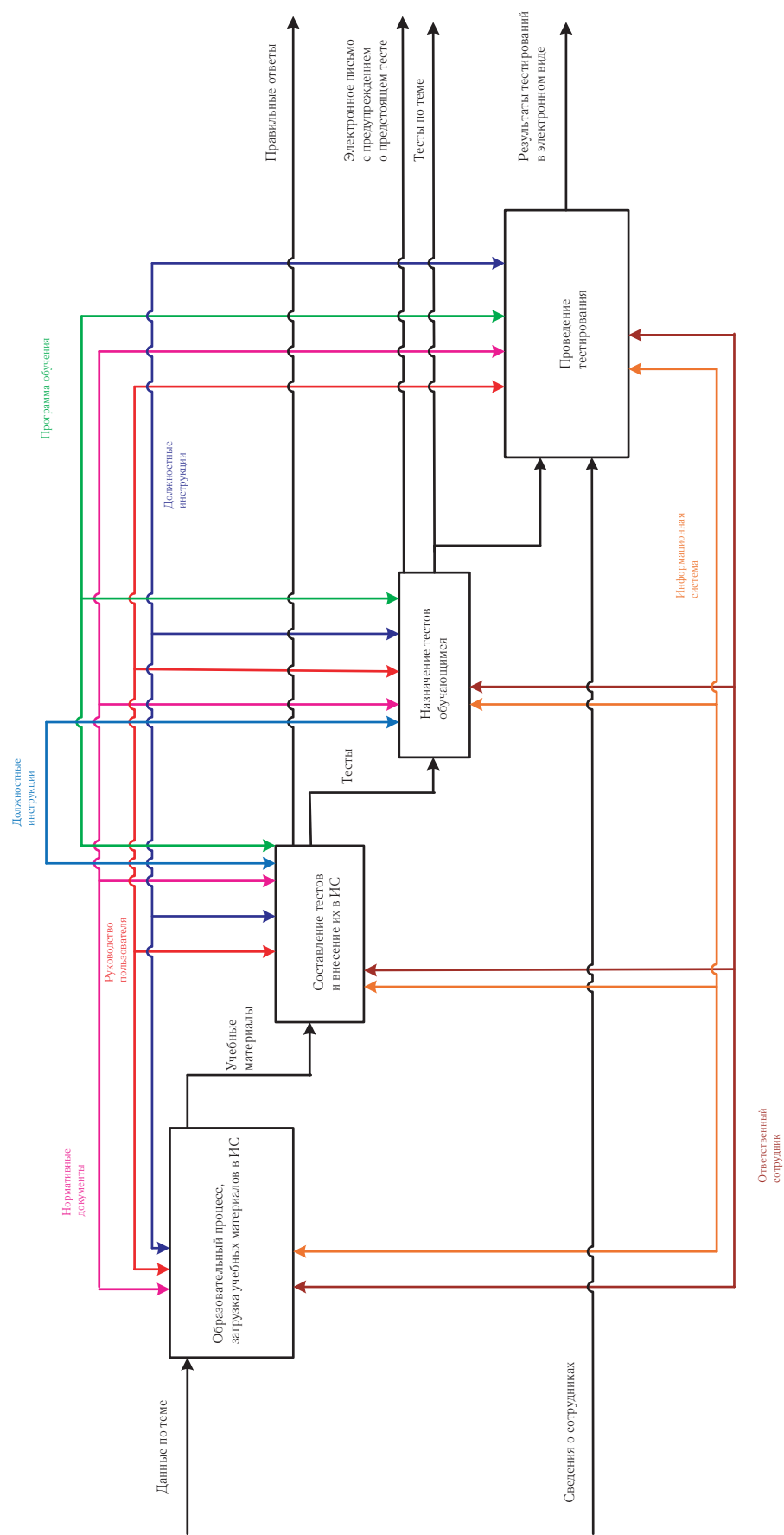


Рис. 2. Декомпозиция процесса «Тестирование сотрудников»

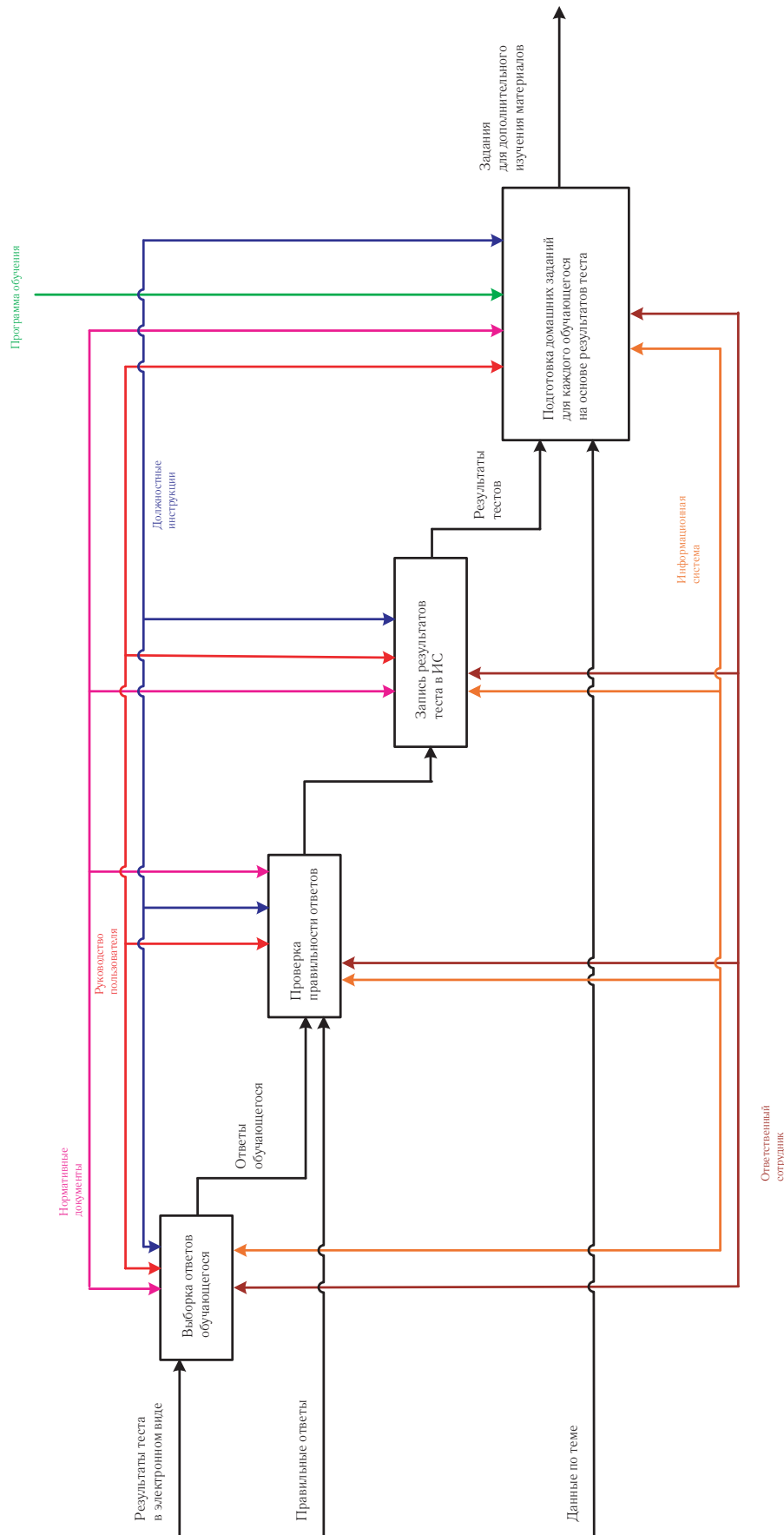


Рис. 3. Декомпозиция процесса «Анализ результатов тестирования»

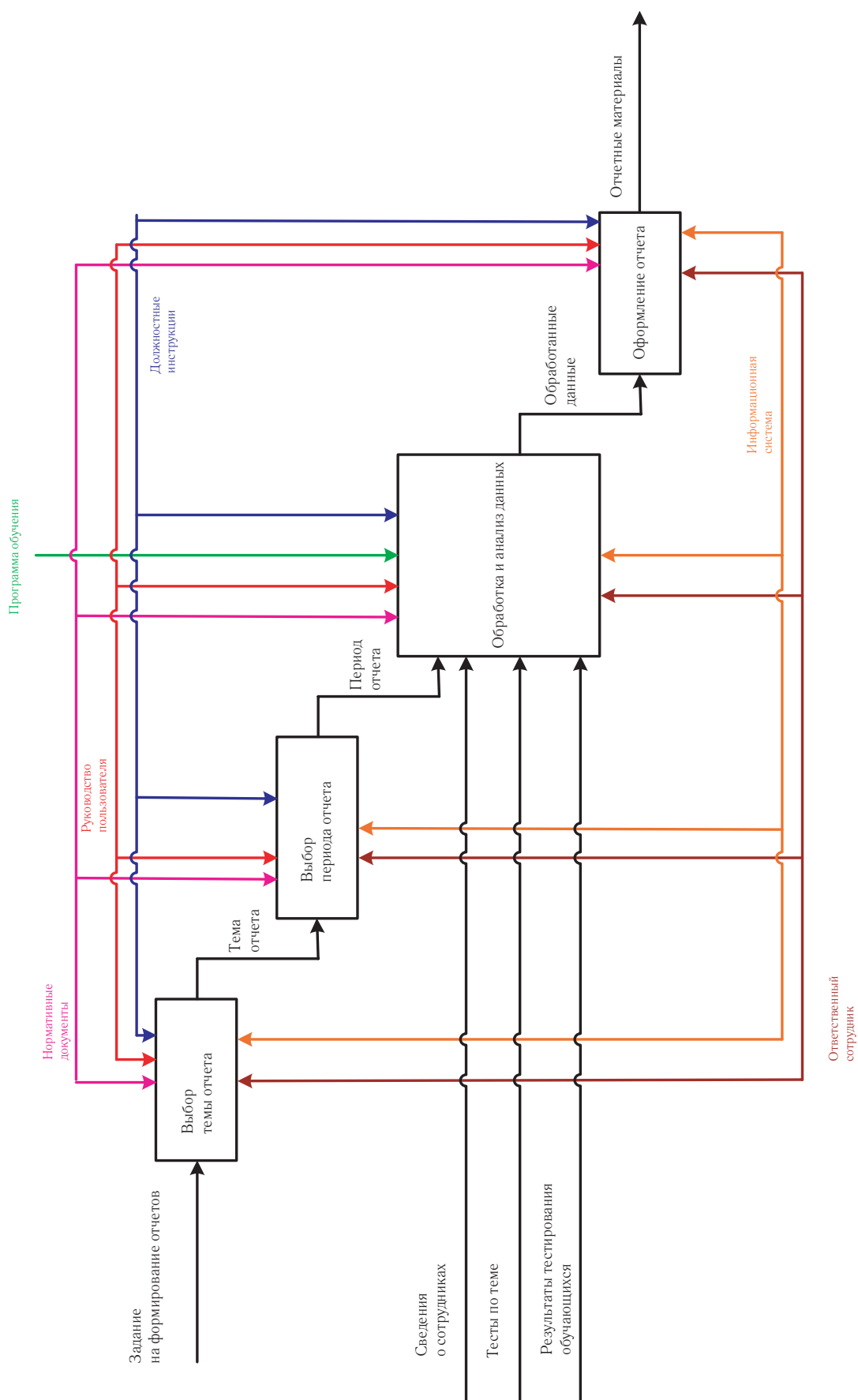


Рис. 4. Декомпозиция процесса «Формирование отчетов»

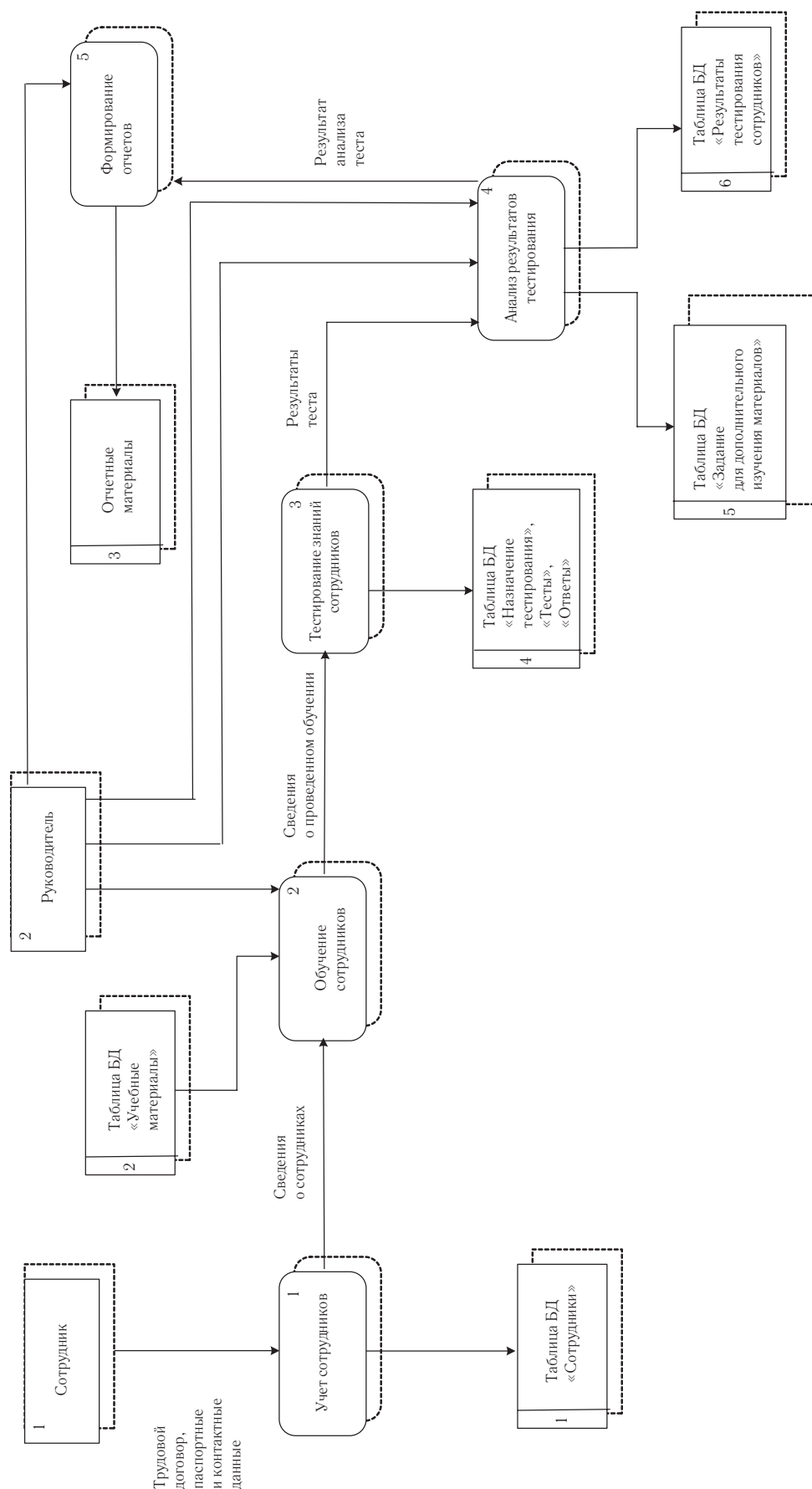


Рис. 5. DFD-диаграмма потоков данных

Литература

1. Интеграционный подход в обучении оперативных работников городских рельсовых транспортных систем / Л.А. Баранов, В.Г. Сидоренко, Е.П. Балакина, Л.Н. Логинова. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2021. — №2. — С. 22–31.
2. Инструкция по движению поездов и маневровой работе на метрополитенах Российской Федерации / Редакционная коллегия: Г.И. Минаев, С.Б. Сухов, А.Г. Федоров, М.В. Фурсалиев, С.Н. Мизгнев. — Москва, 2003. — 128 с. — Текст: непосредственный.
3. Логинова, Л.Н. Роль системы автоматизированной проверки знания поездных диспетчеров линии метрополитена в повышении качества обучения / Л.Н. Логинова. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2011. — №1. — С. 62–65.
4. Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения / Л.А. Баранов, В.Г. Сидоренко, Е.П. Балакина, Л.Н. Логинова. — Текст: непосредственный // Надежность. — 2021. — Т.21, №2. — С. 17–23. — DOI 10.21-683/1729-2646-2021-21-2-17-23.
5. Яшкова, Е.В. Специфика систем онлайн-тестирования способностей сотрудников организации / Е.В. Яшкова, Л.В. Лаврентьева, А.С. Гончаренко. — Текст: непосредственный // Наука Красноярья. — 2021. — Т.10, №2–3. — С. 178–182.
6. Комплексное решение задач планирования и управления движением городских рельсовых транспортных средств / Л.А. Баранов, В.Г. Сидоренко, Е.П. Балакина [и др.]. — Текст: непосредственный // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года. — Москва: Российский университет транспорта, 2021. — С. 56–64. — DOI 10.47581/2022/Obrazcov.09.
7. Замышляев, А.М. Автоматизация процессов комплексного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта: специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Замышляев Алексей Михайлович. — Москва, 2013. — 45 с. — Текст: непосредственный.
8. Росавиатест [сайт]. — URL: <https://www.rosaviatest.ru/TestProcess> (дата обращения: 03.10.2021).
9. Тестирование сотрудников Ростехнадзора [сайт]. — URL: <https://prombez24.com> (дата обращения: 03.10.2021).
10. Gao, F., et al. The Research and Development of Integrated Operation-Maintenance Simulation Training System. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2, 2015, P. 470-476. .<http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.24063>.
11. Jason Barles, Mark Dras, Manolya Kavakli, Debbie Richards and Anders Tychsen «An overview of training simulation research and systems». — URL : https://www.researchgate.net/publication/245364812_An_overview_of_training_simulation_research_and_systems (дата обращения: 03.07.2022).
12. Kashtanova E, Zaharov D. «Digital Transformation of the Corporate Training System», «Management of the personnel and intellectual resources in Russia 10», 2021. — P. 37–43.
13. Changchun Yu «Design and Research on Writing and Testing Training System Geared to Practical Writing», 2nd International Conference on Education Technology, Management and Humanities Science (ETMHS 2016), 2016. — P. 868–872.
14. Логинова, Л.Н. Цифровизация образования оперативного персонала, связанного с обеспечением безопасности движения поездов / Л.Н. Логинова // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: межвузовский сборник научных трудов ; Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.А. Бугреева. — Текст: электронный. — Москва: РУТ (МИИТ). РОАТ, 2020. — С. 334–338. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
15. Избачков, Ю.С. Информационные системы: учебник для вузов / Ю.С. Избачков, В.Н. Петров. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2006. — 656 с. — Текст: непосредственный.

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА И НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ВОДОТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ЭКОЛОГИЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОДОПОДГОТОВКИ

Представлен материал по применению энергетического метода водоподготовки (ЭМВ) на системах водотеплоснабжения порядка 1200 пассажирских вагонов внутрироссийского и международного сообщений производства России и фирмы Siemens (Германия) при разных сроках их эксплуатации; различных теплоносителях и поставленных задачах обработки.

Ключевые слова: система водотеплоснабжения, накипно-коррозионные отложения, перерасход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР)

EDN: XFZZP



М.Н. Торопов



И.Е. Перков

Системы водотеплоснабжения обеспечивают поддержание параметров микроклимата в пассажирском вагоне и потребности в горячей и холодной воде. При этом качество воды должно соответствовать требованиям санитарно-эпидемиологических нормативных документов.

Некоторые технологические особенности систем водотеплоснабжения пассажирских вагонов

Конструкция систем отопления вагонов в основном водяная, с водогрейным котлом объемом около

0,8 м³. Нагрев воды комбинированный: с применением твердого топлива и электроэнергии. Часто в качестве теплоносителя используются низкотемпературная жидкость марки 40 по ГОСТ159-52.

Система водоснабжения самотечная общим объемом 0,95–1,20 м³, включает в себя два сообщающихся между собой бака холодной воды, смывные баки, распределительные трубопроводы различных диаметров и запорно-регулирующую арматуру.

В условиях эксплуатации на поверхностях, контактирующих с жидкостью, возникают накипно-коррозионные отложения, в некоторых случаях толщиной

Торопов Михаил Николаевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией кафедры «Электропоезда и локомотивы» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: прочность и надежность конструкций, улучшение качества воды. Автор более 170 научных работ.

Перков Иван Евгеньевич, технический эксперт АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»). Область научных интересов: энергоэффективность и повышение ресурса объектов водотеплоснабжения железнодорожного транспорта. Автор более 10 научных работ.

Селиванов Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: системы тепло- и водоснабжения, водно-химический режим источников теплоты, тепловых сетей, систем теплопотребления и водоснабжения, водоподготовка. Автор более 50 научных работ.

Васильев Николай Викторович, инженер-теплоэнергетик Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: водоподготовка и применение экологически чистых методов для уменьшения скорости коррозии в морской и пресной воде на затопленных конструкциях. Автор более 10 научных работ.

Бегунов Пётр Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика» Петербургского университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). Область научных интересов: очистка воды, ее обеззараживание через активацию, реконструкция и модернизация сооружений (водоснабжения и канализации), сетей (водоснабжения, канализации и теплоснабжения). Автор более 110 научных работ.

более 10 мм (рис. 1). Это значительно уменьшает теплоотдачу трубопроводов и оборудования, способствует перерасходу ТЭР, значительно ухудшает качество воды. В 60–70% случаев это происходит за счет вторичного загрязнения воды накипно-коррозионными отложениями.

Основные причины увеличения затрат при ремонте и эксплуатации систем водотеплоснабжения пассажирских вагонов, а также методы и затраты на их устранение приведены в табл. 1.

Масштаб проблемы можно представить, обратившись к данным годового отчета АО «ФПК» за 2020 г. (табл. 2).

Конструкция разводящих и отопительных ветвей на одном пассажирском вагоне включает в себя более 200 м трубопроводов, что для всего парка составляет порядка 4000 км. Принимая средний износ вагонного парка 55,5% приходим к выводу, что около 2000 км отопительных систем находятся если не в аварийном, то в предаварийном состоянии и требуют работ по их замене или ремонту. И это только отопление.

Создание инновационных вагонов не исключает рассматриваемую проблему, а зачастую еще более усложняет ее. Так, например, использование пурифайеров в вагонах модельного ряда «Вагон 2019», в какой-то мере решает проблему качества питьевой воды для пассажира, но значительно удорожает ее стоимость, вводит дополнительные операции по обслуживанию дорогостоящего оборудования, требует закупки расходных материалов, таких как амальгамные ультрафиолетовые лампы высокой мощности и электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА) для их розжига с дальнейшей их утилизацией. Это также требует постоянного расхода электроэнергии.

При этом система водоснабжения не только остается, но конструктивно значительно усложняется.

Концепция двухэтажных вагонов в рамках проекта «Вагон 2020», также подразумевает использование пурифайеров, плюс к этому душевая кабина в каждом вагоне. Система водоснабжения усложняется, появляются дополнительные нагревательные элементы, а также емкости для утилизации отработанной воды. Остаются прежние проблемы: коррозия элементов системы и накипно-коррозионные отложения на ее внутренней поверхности.

Взаимосвязь коррозионной агрессивности и интенсивности накипеобразования воды, заправляемой в системы водотеплоснабжения, с технологическими параметрами их эксплуатации

Для определения взаимосвязи качества воды с технологическими параметрами систем (таких как скорость коррозии, перерасход ТЭР) проводились исследования качества воды в пунктах заправки вагонов на обширных территориях (рис. 2).

Было выявлено, что на территории РФ, на которой осуществляется железнодорожное пассажирское сообщение, существует семь из девяти возможных классов воды.

Вода обладает характерными для каждого из ее классов особенностями. Данный момент был учтен при разработке технологии обработки.

Была оценена интенсивность накипеобразования при нагревании воды взятой из заправочных гидрантов целого ряда железнодорожных станций, таких как Архангельск, Вологда, Воркута, Киров, депо Москва 3 и др. Также оценен индекс стабильности воды j , харак-

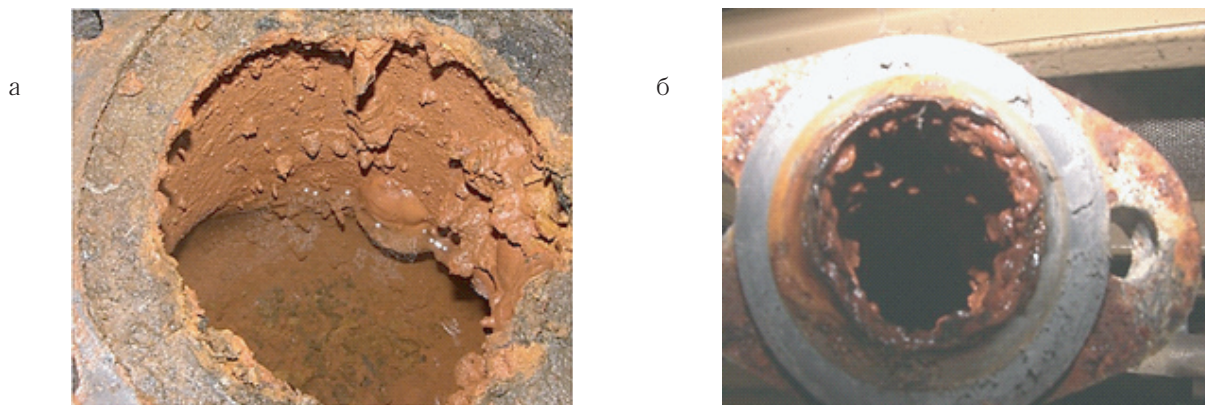


Рис. 1. Накипно-коррозионные отложения на внутренних поверхностях трубопроводов водоснабжения пассажирского железнодорожного комплекса: а – система заправки вагонов водой; б – система холодного водоснабжения пассажирского вагона

Таблица 1

**Основные причины увеличения затрат при ремонте
и эксплуатации систем водотеплоснабжения**

№ п/п	Статьи	Причина	Значения скорости коррозии и содержание железа и взвесей в воде		Методы и затраты на ликвидацию проблемы	Примечания
			Фактические значения	Критические значения, ПДК		
1	Низкий ресурс эксплуатации систем	Высокая коррозионная агрессивность среды. Высокие жесткость, щелочность, солесодержание воды, в том числе и технической	0,26 мм/год	0,2 мм/год (аварийная скорость коррозии)	1. Полная замена систем. 1,0–1,2 млн руб./вагон. 1. Капитальный и деповской ремонты систем. 30–32 тыс руб./вагон. 1. Различные методы антикоррозионной обработки. 6–70 тыс.руб/м ³ · год	1. Трубы меняют при 30% износе. 2. Указанные методы не решают проблему, так как не уменьшают коррозионности среды. 3. Чем «хуже» техническая вода, тем больше затраты на ремонт и удорожание конструкций
2	Перерасход ТЭР	Низкая теплопередача поверхностей конструкций. Высокая интенсивность накипеобразования воды.	10–30% при толщине отложений 0,4–3,9 мм	—	Целая гамма технологий временного устранения отложений. 6–70 тыс.руб/м ³ · год	1. Указанные методы не решают проблему, так как не уменьшают интенсивности накипеобразования водной среды
3	Низкое качество воды (содержание железа, взвесей)	Смешение воды из разных пунктов экипировки и ее вторичное загрязнение	Железо: 0,4–0,9 мг/л Взвеси: 1,6–4,8 мг/л	Железо (ПДК) — 0,3 мг/л Взвеси (ПДК) — 1,5 мг/л	Водоподготовка в пунктах экипировки водой. При ее средней стоимости 100 руб/м ³ и потреблении воды 830 м ³ /год · вагон — 83 тыс. руб./вагон	1. Порой даже кипячение не спасает от избытка железа. 2. Водоподготовка для системы отопления не проводится.

теризующий уровень ее коррозионной агрессивности в тех же пунктах.

Полученные результаты сравнивались со скоростью коррозии и перерасходом электроэнергии на пассажирском подвижном составе регулярно и длительное время курсирующем по направлениям: Москва–Воркута; Москва–Архангельск), а также Москва–Улан-Батор (рис. 3,4).

Установлено, что коррозионность воды и интенсивность накипеобразования в конечном итоге определяют перерасход ТЭР на отопление вагонов и ресурс эксплуатации систем.

Так на условном Восточном направлении перерасход электроэнергии составил 10,6% за срок наблюдения 4 года, а на Северном 29,7% за тот же срок.

При этом скорость коррозии металла в системах водотеплоснабжения вагонов также больше на Северном направлении, что определяет и большие затраты на ремонт указанных систем.

Разработка технологии повышения ресурса системы водотеплоснабжения пассажирского вагона

В течение 2004–2013 гг. (см. рис. 2) в пассажирском комплексе проведены широкомасштабные испытания ЭМВ [1;2]. Метод позволяет решить проблему повышения ресурса эксплуатации систем водотеплоснабжения за счет кратного снижения скорости коррозии и интенсивности накипеобразования в трубопроводах и оборудовании. Кроме того, в результате

Таблица 2

Структура вагонного парка в 2020 г., ед.

Тип вагона	Характеристика вагона	Парк 31.12.2020	Средний возраст 31.12.2020, лет	Средний износ, %
Люкс	Купейный (купе с индивидуальным душевым модулем, умывальником и туалетной кабиной)	114	13,2	46,2
СВ	СВ (двухместное купе)	499	14,6	50,0
РИЦ	Купейный, европейского габарита	267	11,9	37,2
МИКСТ	Вагон с купе типа люкс и СВ	13	8	20,6
К	Купейный (4-местное купе)	7 576	18,9	64,3
П	Плацкартный	6 569	14,9	44,4
С	Межобластной	637	15,1	53,0
Б	Багажный	166	21,9	79,9
ВР	Вагон-ресторан	714	27	72,1
Прочие	Электростанции и служебно-технические вагоны	41	22,2	64,2
Итого		16 596	17,3	55,5



Рис. 2. Основные направления движения пассажирских вагонов, системы водотеплоснабжения которых обработаны с применением ЭМВ

применения ЭМВ обеспечивается прямое воздействие на водную среду с приведением ее качества в соответствие с нормативными значениями. При этом обработанная конструкция длительное время сохраняет свой защитный потенциал. Особенно это важно для питьевого контура.

Испытанию технологии на реальных объектах предшествовало утверждение в ЦЛ ОАО «РЖД» «Технического задания на внедрение технологии по удалению накипи, продуктов коррозии и отложений с защитой от их дальнейшего образования, с улучшением качества воды в системах тепловодоснабжения

пассажирского вагона». Техническое задание согласовано с ВНИИЖТ, ВНИИЖГ (Роспотребнадзор) ПКБ ЦЛ, Вагонреммаш, пожарной службой и санитарными врачами.

На его основании с применением ЭМВ обработаны системы водотеплоснабжения двух вагонов из состава поезда Москва—Воркута (№№ 11910 и 25429). По результатам применения метода получены положительные заключения ВНИИЖТ и ВНИИЖГ.

В частности, Роспотребнадзор разрешил применение технологии и на питьевом контуре, о чем говорят данные химического анализа до и после обработки

систем водотеплоснабжения с применением ЭМВ (рис. 5).

Кроме того, проведенные микробиологические исследования доказали бактерицидное действие состава, что подтверждалось неоднократно.

После проведения обработки системы очистились от отложений. Причем срок службы котлов и трубопроводов был 13–15 лет, отложения в трубопроводах 6–12 мм, а в котлах – 3...4 мм. Все поверхности трубопроводов и оборудования, контактирующие с водой, покрылись защитной пленкой.

По результатам выполненных работ в ОАО «РЖД» утверждена «Технологическая инструкция по применению комплексного подхода к проблеме водотеплоснабжения пассажирских вагонов в условиях пассажирских вагонных депо».

Была разработана методика определения сравнительного расхода электроэнергии. Поэтому допол-

нительно к Технологической инструкции утверждена «Схема подключения приборов контроля времени наработки к системе электрооборудования пассажирских вагонов 7 модификаций (ГДР, Хартрон-Экспресс, АО «Латво», ЗАО «Кросна-Электра», ПАО «Днепровагонремстрой», ООО НПЦ «Экспресс» и ЗАО «ЭлСиЭл»).

Восемь вагонов были снабжены приборами учета времени работы систем отопления пассажирских вагонов (рис. 6). Подключение приборов учета времени наработки позволило провести сравнительные измерения расхода электроэнергии на отопление в вагонах с обработанными и необработанными системами водотеплоснабжения.

Кроме факта очистки, в рамках проводимой работы, подтверждена экономия электроэнергии на отопление обработанных с применением ЭМВ вагонов в размере 24–25 % по сравнению с необработанными.

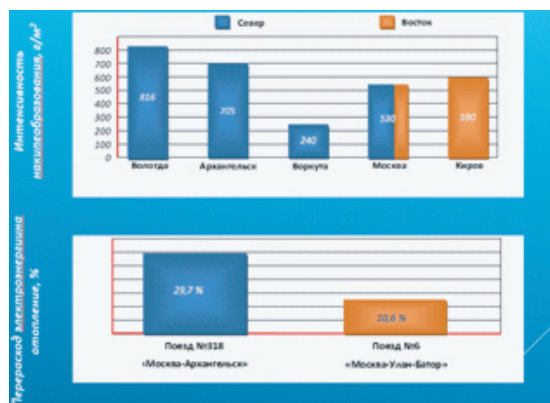


Рис. 3. Взаимосвязь интенсивности накипеобразования в заправочных гидрантах и перерасхода электроэнергии на отопление вагона поездов Северного и Восточного направлений

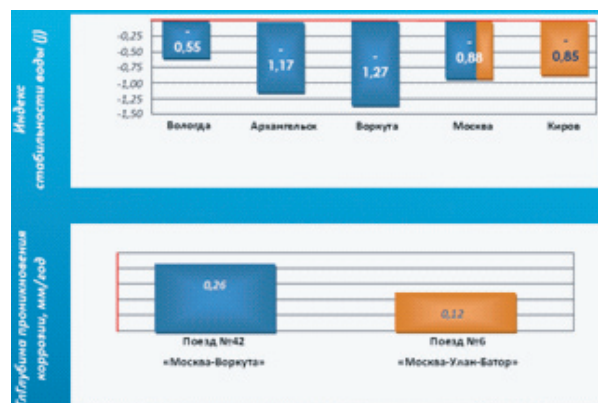


Рис. 4. Взаимосвязь коррозионной агрессивности воды в пунктах экипировки вагонов водой и скорости коррозии в системах водотеплоснабжения поездов Северного и Восточного направлений

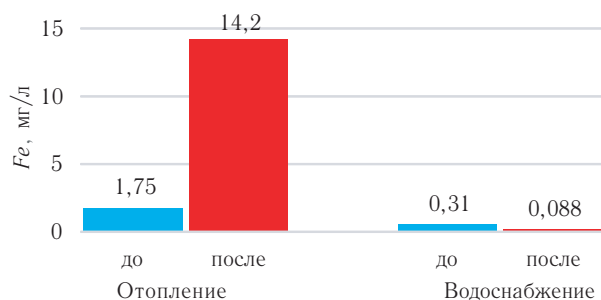


Рис. 5. Зависимость содержания железа общего в отопительном и питьевом контурах до и после применения ЭМВ

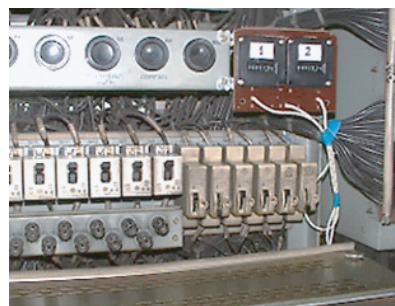


Рис. 6. Расположение приборов учета времени работы систем отопления в вагоне

На основании полученных результатов обработаны еще 100 систем водотеплоснабжения пассажирских вагонов, курсирующих в поездах по направлениям Москва–Воркута, Москва–Архангельск, Москва–Улан-Батор.

На 50 из них проведены исследования: качества воды и коррозионные. Данная работа подтвердила высокие технико-экономические параметры технологии в части повышения ресурса эксплуатации, уменьшения расхода электроэнергии до 25–40% и приведения качества воды в соответствие нормам.

К примеру, скорость коррозии на исследуемых системах снизилась с 0,258 до 0,086 мм/год, т.е. в 2,4 раза. Системы очистились от отложений. Уменьшилась скорость коррозии и улучшилось качество воды (рис. 7,8).

Отмечена положительная динамика изменения содержания железа в холодной воде в результате обработки (рис. 9).

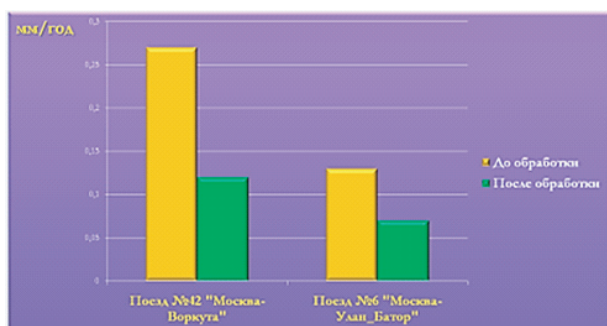


Рис. 7. Динамика изменения глубины проникновения коррозии в системах водотеплоснабжения в результате обработки

По полученным данным были проведены выборочные обследования систем водотеплоснабжения 400 пассажирских вагонов, регулярно курсирующих в поездах по направлениям Москва–Владивосток, Москва–Архангельск, Москва–Воркута, Москва–Вологда, включая весь подвижной состав поезда «Россия» сообщением Москва–Владивосток.

Масштабность проводимых работ позволила разработать технологию поточной обработки систем водотеплоснабжения пассажирских вагонов с применением ЭМВ в пунктах экипировки вагонов водой в условиях эксплуатационных пассажирских депо (рис. 10). Одновременно обрабатываются 4–5 систем. Время обработки одного состава 25–30 минут.

По существу, рассматриваемая технология позволяет за счет применения ЭМВ продлевать ресурс систем водотеплоснабжения в условиях эксплуатационных депо, выполняя здесь более 20 операций депоовского и капитального ремонтов.

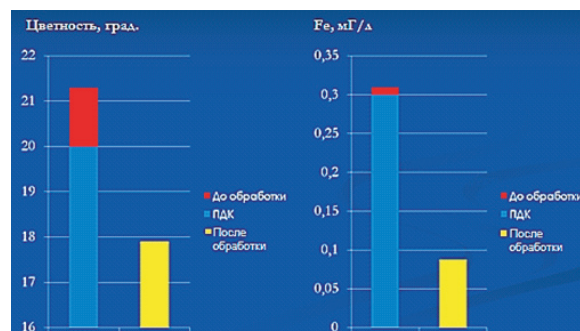


Рис. 8. Улучшение качества питьевой воды в пассажирских вагонах после обработки

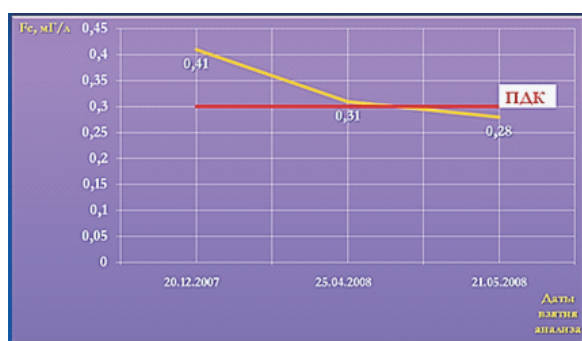


Рис. 9. Динамика изменения содержания железа в холодной воде в результате обработки



Рис. 10. Поточная обработка систем водотеплоснабжения пассажирских вагонов в эксплуатационном депо

Исследования подтвердили факт очистки систем от накипно-коррозионных отложений (рис. 11).

Показатели качества и коррозионности воды улучшились, что видно на примере динамики изменения коррозионности воды в вагонах со сроками службы 15 и более лет (рис. 12).

Были сформированы обобщенные данные по скорости коррозии в системах водотеплоснабжения вагонов (рис. 13). Во всех случаях она не превышает допустимые значения 0,085 мм/год. Обеспечен безнакипный режим работы на срок не менее пяти лет.

Образование защитной пленки создало условия для консервации систем в период отстоя. Отмечено значительное улучшение качества воды с положительной динамикой изменения содержания железа общего в процессе эксплуатации после обработки (рис. 14).

Уменьшился расход электроэнергии на отопление пассажирских вагонов на 8,2–11,6%.

На технико-экономические показатели существенно влияет своевременная гидравлическая промывка. Содержание взвесей в системах водотеплоснабжения у вагонов с однократной промывкой значительно ниже, чем у вагонов без промывки и со временем эта тенденция не изменяется.

В соответствии с Руководствами по депоовскому и капитальным ремонтам пассажирских вагонов [3–5], промывка является одной из обязательных операций. С целью интенсификации процесса разработан проект моечной станции с экономной технологической схемой, обеспечивающей высокие показатели очистки и микробиологические показатели. Проект моечной станции разработан в мобильном и стационарном исполнении.

Станция состоит из блока очистки с применением активированных алюмосиликатных адсорбентов (ААА), блока обеззараживания с применением



Рис. 11. Состояние системы отопления после обработки

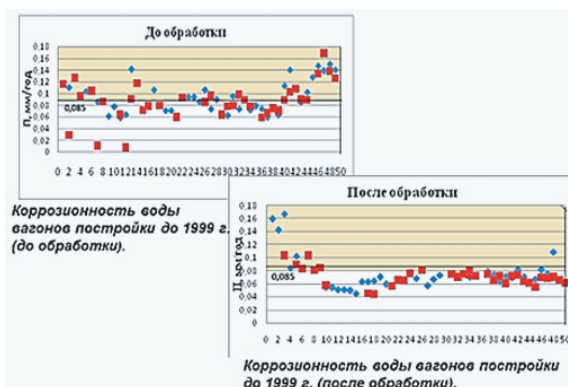


Рис. 12. Динамика изменения коррозионности воды в процессе обработки

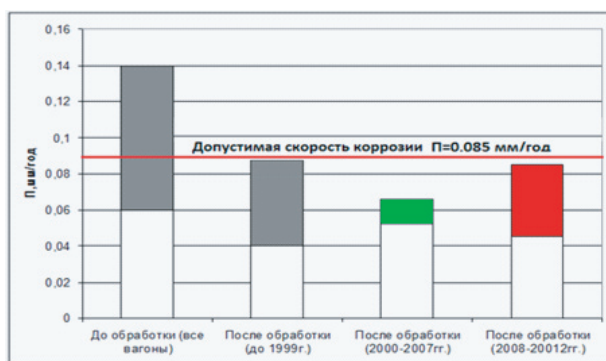


Рис. 13. Обобщенные данные по глубине проникновения коррозии в системах водотеплоснабжения обработанных и необработанных вагонов трех групп

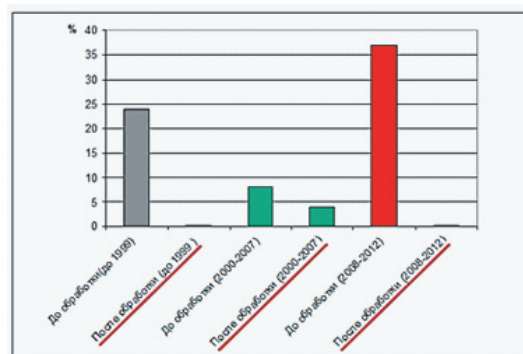


Рис. 14. Процент вагонов, где содержание железа общего выше норм СанПиН

электрохимически активированных растворов (ЭХАР) и системы с обратной подачей воды. Способы очистки и обеззараживания выбраны из соотношения цена-качество как наиболее эффективные и малозатратные. Были оценены укрупненные затраты на обеззараживание воды и оценены ее качественные показатели обязательные по СанПиН (табл. 3,4).

При загрузке 3000 вагонов в год и стоимости около 10 млн руб. окупаемость произойдет за 1,0–1,5 года за счет экономии воды и экономического эффекта от обработки с применением ЭМВ. Оценена структура расходов до и после внедрения проекта.

Практически эта схема, при высоком качестве воды, обеспечивает пассажирские вагоны дешевой и качественной питьевой водой (рис. 15). В рамках данной технологии удалось устранить в питьевой воде колифаги, не устраняемые другими традиционными методами.

Экономическая эффективность от применения ЭМВ на пассажирских вагонах будет складываться из уменьшения расходов ТЭР на отопление вагонов, увеличения срока службы систем водотеплоснабжения, а также уменьшения числа операций при депоковом и капитальном ремонтах (табл. 5,6).

Выводы

1. Разработан технологический процесс поточной обработки систем водотеплоснабжения пассажирских вагонов, позволяющий за счет очистки систем от накипно-коррозионных отложений и улучшения качества питьевой и технической воды устранять причину коррозионных и температурных разрушений при значительном уменьшении коррозионности среды и интенсивности ее накипеобразования с повышением ресурса и надежности систем в эксплуатации.

Таблица 3

Укрупненные удельные затраты на обеззараживание воды, руб./м³

№ п/п	Способ обеззараживания	Капитальные затраты	Эксплуатационные расходы	Годовые приведенные затраты
1	Хлорирование	19,5	2,22	4,56
2	Хлорирование с дехлорированием	20,82	2,76	5,25
3	Озонирование	4,5	22,44	29,2
4	Ультрафиолетовое облучение	33,0	5,4	9,36
5	ЭХАР	1,1	0,5	1,6

Таблица 4

Качественные показатели обеззараживания воды

№ п/п	Способ обеззараживания	Качественные показатели обеззараживания
1	Хлорирование	Несоответствие норм СанПиН 2.1.4.1074-01 по 3 показателям из 6 нормируемых
2	Хлорирование с дехлорированием	Несоответствие норм СанПиН 2.1.4.1074-01 по 3 показателям из 6 нормируемых
3	Озонирование	Образование высокотоксичных формальдегида, глиоксала, метилглиоксала. Усиление биообрастаний трубопроводов
4	Ультрафиолетовое облучение	Не обеспечивает остаточного дезинфицирующего действия в сети водопровода
5	ЭХАР	Качество воды удовлетворяет нормам СанПиН. Обеспечивает остаточное дезинфицирующее действие в сети водопровода

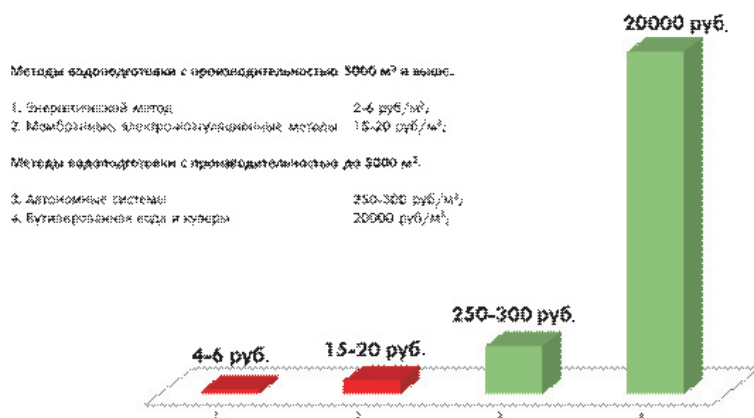


Рис. 15. Сравнительная стоимость одного кубического метра воды, прошедшего различные методы водоподготовки

Таблица 5

**Экономическая эффективность обработки
систем водотеплоснабжения
пассажирских вагонов**

Статьи затрат	До обработки		После обработки	
	Объем работ	Стоимость работ, руб.	Объем работ	Стоимость работ, руб.
Замена трубопроводов	200/(3/0,26)=17,3	4522	200/(3/0,086)=5,7	1490
Электроэнергия по направлению, кВт х Ч: Москва-Воркута Москва-Пекин	77644,8 159437	112586 231184	48384 118886	70156 172386
Уголь по направлению, т.т.т.: Москва-Воркута Москва-Пекин	30,84 0	29394 0	26,9 0	25556 0
ИТОГО по направлению: Москва-Воркута Москва-Пекин		146502 235706		97202 173876
Экономия средств: Москва-Воркута 49300 руб./год на вагон Москва-Пекин 61830 руб./год на вагон		+ Сокращение затрат по уменьшению объема ремонта и числа операций и экономия средств на водоподготовку		

Таблица 6

**Некоторые статьи и причины увеличения
затрат при эксплуатации и ремонте
систем водотеплоснабжения
пассажирских вагонов**

Статьи увеличения затрат	Причины	Затраты на традиционные методы	Затраты на энергетический метод
Низкий ресурс эксплуатации систем	Высокая коррозионная агрессивность среды. Высокие жесткость, щелочность, содержание солей, в том числе и технической.	Различные методы антикоррозионной обработки. 6-70 тыс руб/м³*год	Э н е р г е т и ч е с к и й
Перерасход ТЭР	Низкая теплоотдача поверхностей конструкций. Высокая интенсивность накипеобразования технической воды.	Целая гамма технологий временного устранения отложений. 6-70 тыс руб/м³*год	
Низкое качество воды (содержание железа, взвесей и т.д.)	Смешение воды из разных пунктов заправки и ее вторичное загрязнение	Водоподготовка в пунктах заправки водой. При ее средней стоимости 100 руб/м³ и потреблении в воды 830 м³/год*вагон – 83 тыс.руб./вагон	
Итого затрат, тыс.руб.		119-503	30 (на 5-7 лет)

2. Поточная обработка систем может проводиться в условиях эксплуатационных депо, не нарушая технологический процесс перевозки пассажиров внутрироссийского и международного сообщения.

3. Как показал более чем десятилетний опыт применения технологии на системах водотеплоснабжения свыше 1000 пассажирских вагонов отечественного и зарубежного производства, значительно сокращается количество операций депоовского и капитального ремонтов (более 20), что удешевляет и убыстряет их процесс при резком увеличении ресурса эксплуатации систем и уменьшением расхода ТЭР на отопление.

4. Положительные результаты получены на системах новых вагонов, вагонов со сроком эксплуатации более 13 лет, сезонных вагонов, когда осуществлена консервация систем, а также вагонах при работе систем на антифризах.

5. В результате обработки системы водоснабжения заполняются питьевой водой, соответствующей требованиям СанПиН, полученной по минимально возможной цене. 

Литература

1. Торопов, М.Н. Энергоэффективная, экологичная технология повышения надежности и ресурса систем водотеплоснабжения / М.Н. Торопов, И.Е. Перков, П.П. Бегунов. – Текст: непосредственный // Инженерные системы. – АВОК Северо-Запад. – 2019. – №1. – С. 34–42.
2. Энергетический метод водоподготовки применительно к объектам транспорта / М.Н. Торопов, П.П. Бегунов, И.Е. Перков, А.С. Селиванов, Н.В. Васильев. – Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2022. – №2. – С. 26–33.
3. Вагоны пассажирские. Руководство по депоовскому ремонту 055 ПКБ ЦЛ-2010РД. – Текст: непосредственный.
4. Вагоны пассажирские. Руководство по капитальному ремонту (КР-1) 056 ПКБ ЦЛ-2010РК. – Текст: непосредственный.
5. Вагоны пассажирские. Руководство по капитальному ремонту (КР-2) ЛВ1.0030РК. – Текст: непосредственный.

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПЕРЕХОДА ОТ ЛОКАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА К ПОЛИГОННОМУ ПОДХОДУ В ПРОЕКТИРОВАНИИ



И.С. Абдуллаев



Н.И. Лукин

Статья посвящена вопросу оптимального развития железнодорожной инфраструктуры для освоения потребных объемов перевозок. В качестве решения задачи поиска оптимального развития железнодорожной инфраструктуры предлагается полигонный подход в проектировании.

Ключевые слова: полигонный подход в проектировании, создание единой информационной базы, оптимальное развитие инфраструктуры

EDN: WFWPID

Со времен появившегося в период тотальной плановой экономики метода «планирования от достигнутого», когда для того, чтобы получить больший объем финансирования, раздувался объем потребностей, и до настоящего времени принципы «максимального проектирования» отдельных пунктов, инженерных сетей, зданий и сооружений, искусственных сооружений и перегонной инфраструктуры остаются, к сожалению, неизменными. Причастные подразделения, сначала Министерства путей сообщения, а сейчас компании ОАО «РЖД», при согласовании задания на проектирование, руководствуясь нормативной базой, закладывают максимально возможные по местным условиям технические и технологические параметры. Такой подход, с одной стороны, обеспечивает необходимый запас прочности, позволяющий гарантированно освоить потребные размеры движения,

повысить надежность технических средств и создать резерв для маневренности на непредвиденную ситуацию (увеличение объемов перевозок, отказы технических средств, внутрисуточная неравномерность, неблагоприятная эксплуатационная или метеорологическая обстановка и т.п.). С другой же стороны, такой подход в масштабах сети железных дорог приводит, прежде всего, к колоссальному перерасходу собственных денежных средств компании на избыточную инфраструктуру, к неакцентированному решению поставленной задачи и не рациональному использованию как финансовых, так и строительных ресурсов.

Невольно вспоминается забытый лозунг «Экономика должна быть экономной». Найти баланс между избыточной и недостаточной оснащенностью — одна из важнейших задач любого хозяйствующего субъекта.

Абдуллаев Ильдар Салимович, кандидат технических наук, заместитель начальника Управления комплексной экспертизы проектов ОАО «РЖД». Область научных интересов: поиск оптимального решения по развитию железнодорожной инфраструктуры и рациональной этапности его реализации, применение инновационных технологий на железнодорожном транспорте. Автор четырех научных работ.

Лукин Николай Иванович, первый заместитель начальника Управления комплексной экспертизы проектов ОАО «РЖД». Область научных интересов: разработка и актуализация нормативно-правовой базы в области проектирования и строительства, поиск комплексных подходов по развитию объектов железнодорожного транспорта.

Здесь очень многое зависит от непосредственных участников формирования задания на проектирование (конкретный проектный институт, региональный заказчик и причастные руководители железной дороги), от уже сложившейся практики работы в регионе, от эксплуатационных проблем в конкретный промежуток времени, от целей и задач, поставленных перед железной дорогой и многих других факторов.

В конечном итоге такой несистематизированный и вольный подход приводит к большому разнообразию технических и технологических решений, применяемых на объектах железнодорожного транспорта, схожих по своим характеристикам, но находящихся в разных регионах. Причем все предлагаемые к реализации решения могут соответствовать требованиям федеральных и отраслевых нормативных документов. Наиболее критично, когда такая ситуация складывается на сопредельных участках пропуска транзитного вагонопотока, что негативно влияет на «сквозную» технологию организации движения.

В качестве примера можно привести инициативу Октябрьской железной дороги по организации пропуска порожних поездов длиной 100 условных вагонов по маршруту Лужская—Входная, для чего требуются инвестиции на удлинение станционных путей станций Беломорск и Волховстрой-1 до 1500 метров. Но данная инициатива рассмотрена исключительно в границах одной железной дороги без проведения комплексной оценки возможности дальнейшего пропуска таких поездов по Северной, Горьковской, Свердловской и Западно-Сибирской железным дорогам. В конечном итоге из-за неготовности инфраструктуры всего маршрута к пропуску поездов повышенной длины на перечисленных дорогах снизится пропускная способность и участковая скорость, возрастут риски нарушения графика движения поездов.

Другим примером отсутствия комплексного подхода в проектировании могут служить несинхронизированные между собой инфраструктурные инвестиционные проекты различных хозяйств в рамках одного полигона. Так, на железных дорогах Восточного полигона дополнительно к мероприятиям по развитию инфраструктуры в рамках 1 и 2 этапов реализуются мероприятия по инвестиционным программам Трансэнерго и Центральной дирекции инфраструктуры, которые предусматривают строительство новых тяговых подстанций, усиление контактной сети и оборудование участков Транссибирской магистрали комплексом устройств системы АЛСО на базе аппаратуры АБТЦ-МШ [3]. Данная аппаратура позволяет повысить пропускную способность инфраструктуры за счет сокращения межпоездного интервала до 4–6 минут [4], но на практике реализовать данное преимущество

современной системы интервального регулирования невозможно до завершения всех мероприятий по усилению устройств электроснабжения, необходимых для снижения межпоездного интервала.

К сожалению, подобных примеров инвестиционных предложений по развитию инфраструктуры без рассмотрения сквозных технологических эффектов на сети довольно много. Причины излишне или недостаточно заложенных мероприятий по развитию железнодорожной инфраструктуры и поверхностный подход к оценке сопутствующих объемов работ по окружающим железную дорогу объектам связаны с неполнотой используемых при подготовке инвестиционных проектов исходных данных, а также отсутствием комплексного подхода в оценке предлагаемого к реализации мероприятия и его взаимной увязки с существующими и перспективными полигонными технологиями работы. Узконаправленное построение доказательной базы без учета возможного влияния изменений инфраструктуры и технологии эксплуатационной работы на всех участников перевозочного процесса, как следствие, приводит к нерациональному использованию средств компании [2].

Основной причиной указанных системных недостатков является отсутствие комплексной исчерпывающей информационной базы параметров существующей железнодорожной инфраструктуры и показателей ее эксплуатации или их разрозненность по разным автоматизированным системам, что не только негативно отражается на качестве проработки документации, но и значительно увеличивает трудоемкость сбора и обработки данных.

В настоящее время, в связи с увеличением объемов разрабатываемой предпроектной и проектной документации, назрела потребность повышения доступности данных, упрощения их свода и системного анализа. Возможным решением существующей проблемы может стать разработка отдельной автоматизированной информационной базы параметров железнодорожной инфраструктуры и показателей ее эксплуатации, либо доработка существующих систем.

Информационная база должна впитать в себя максимум информации по параметрам объектов инфраструктуры и эксплуатационным показателям, позволять пользователю осуществлять выбор произвольного полигона железнодорожной инфраструктуры и набора данных в зависимости от рассматриваемого проекта. Создание актуальной базы позволит всем участникам инвестиционного процесса сократить сроки сбора информации и повысит качество их анализа и проработки мероприятий.

На рисунке приведена Концепция формирования описанной информационной базы, которая предпола-

гает выполнение работ по ее реализации в несколько этапов: формирование свода первоочередных данных с их экспертным анализом и автоматизация сбора и обработки данных с расширением их перечня и охватом всех хозяйств.

Говоря о дальнейших перспективах развития информационной базы, необходимо отметить возможность ее использования в рамках BIM-технологий. Это процесс создания и использования информации по строящимся и завершенным объектам для координации входных данных, организации совместного производства и хранения данных, а также их использования для различных целей на всех стадиях жизненного цикла.

Основные цели применения BIM-технологий совпадают с целями создания информационной базы:

- снижение итоговой стоимости строительства объектов;
- сокращение сроков строительства объектов;
- повышение качества проектной документации.

В настоящее время в строительном комплексе ОАО «РЖД» ведется активная работа по внедрению BIM-технологий, в то время как на зарубежных железных дорогах технологии информационного моделирования уже широко применяются.

Так, в процессе внедрения инноваций BIM в практику заметную роль сыграл строительный проект Crossrail или ныне маршрут в Лондоне, известный

Концепция формирования информационной базы параметров существующей железнодорожной инфраструктуры

Цель: повышение качества и сокращение срока экспертизы проектной продукции за счёт формирования единой актуальной информационной базы с реализацией возможности формирования произвольных маршрутов по выбору пользователя

Основные направления: Кузбасс – Ванино-Совгаванский узел и порты Приморского края
Кузбасс – порты Северо-Западного бассейна
Кузбасс – порты Азово-Черноморского бассейна
Центр – Юг

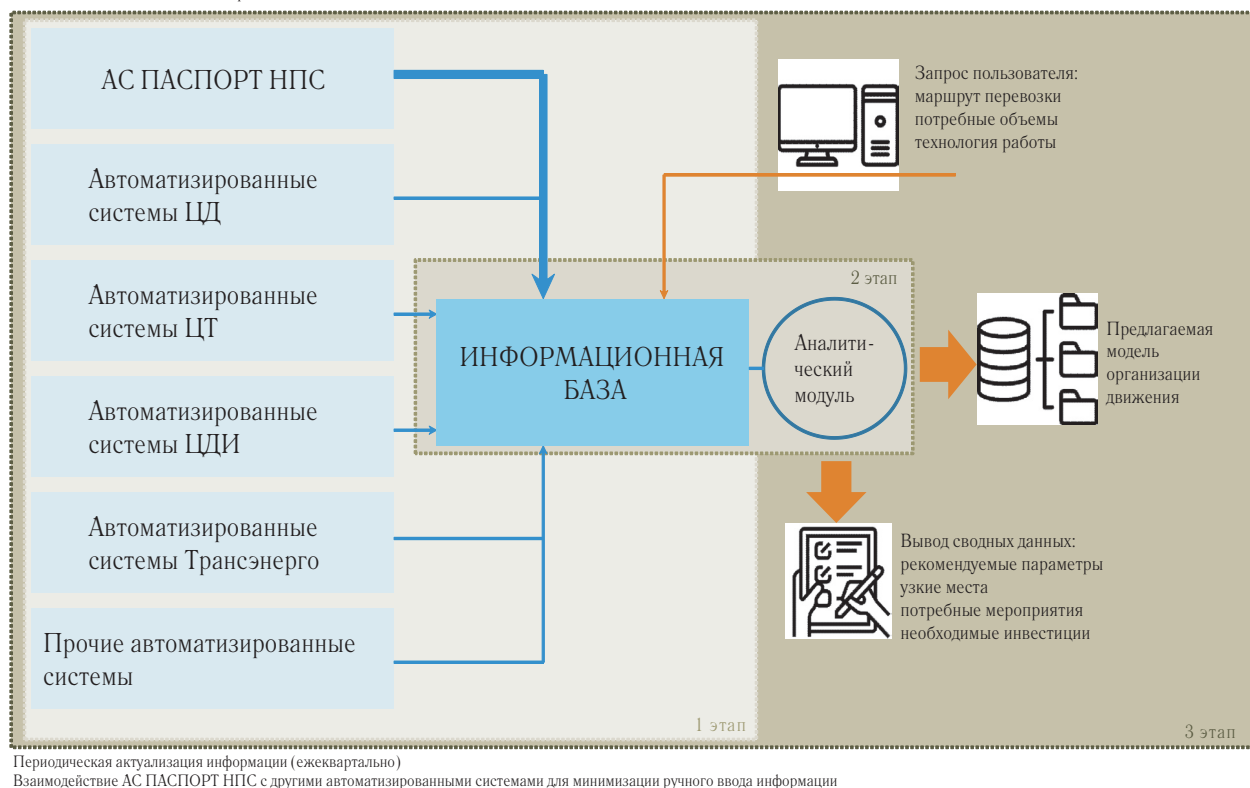


Рисунок. Концепция формирования информационной базы параметров существующей железнодорожной инфраструктуры

как линия Элизабет, который был запущен осенью 2019 г.

Это крупнейший в Европе инфраструктурный проект с общей протяженностью железнодорожной линии более 100 км, проходящей через 40 станций из Хитроу и Рединга на западе, в Эбби Вуд и Шенфилд на востоке через 42 км новых тоннелей под центральным Лондоном. Линия Элизабет (Elizabeth) предназначена для увеличения пропускной способности лондонских железных дорог на 10%. Данная линия позволяет вдвое сократить время, необходимое для поездки из аэропорта Хитроу в деловой район Кэнэри-Уорф.

Использование BIM-технологий при реализации инфраструктурного проекта Crossrail привело к следующему:

- были созданы виртуальные активы, которые ускорили как строительство самой железнодорожной инфраструктуры, так и создание ее цифрового двойника;
- была обеспечена интеграция данных на всех стадиях жизненного цикла;
- была создана единая и доступная база данных.

Также были обеспечены следующие преимущества:

- снижено количество конфликтов;
- повышена эффективность сотрудничества и взаимодействия;
- минимизированы потери данных;
- уменьшены программные риски;
- повышена производительность и эффективность цифрового моделирования;
- реализован инновационный механизм по управлению активами.

В проекте Crossrail было использовано:

- более 5 млн документов;
- более 450 тыс. чертежей;
- сформировано 660 тыс. активов;
- 8250 пользователей информационной базы данных;
- в коллективной работе одновременно участвовало 450 пользователей.

На базе опыта Crossrail был сформулирован подход, сегодня известный как «цифровой близнец», который состоит из различной информации, которая нужна заинтересованным сторонам для принятия решений в нужное время и в нужном месте [1].

Примером применения BIM-технологий в международном масштабе может служить проект Rail Baltica, который направлен на создание железной дороги европейского стандарта, соединяющей Эстонию,

Латвию и Литву с Польшей и остальной частью европейской железнодорожной системы с шириной колеи 1435 мм. Rail Baltica предусматривает непрерывную двухпутную электрифицированную высокоскоростную железнодорожную линию из Таллинна в Варшаву, проходящую через крупные экономические центры в странах Балтии и способствующую экономическому развитию в Северо-Восточной Европе.

Проект Rail Baltica включает 870 км железнодорожных путей и более 400 мостовых сооружений (мосты, путепроводы, виадуки, пешеходные переходы и переходы для животных), а также три грузовых терминала и семь международных пассажирских станций. Кроме того, имеются объекты технического обслуживания подвижного состава, энергосистема и сигнализация [1].

Помимо этого, опыт реализации железнодорожных инфраструктурных проектов на основе BIM-технологий с использованием информационной базы данных и информационного моделирования уже имеют такие страны, как Китай, Южная Корея, Италия, США, Индия, Швеция, Дания, Норвегия, Франция.

Таким образом, концепция единой информационной базы параметров существующей железнодорожной инфраструктуры — это не просто необходимый шаг для развития BIM-технологий на железнодорожном транспорте, но и принципиально новая идея создания цифрового продукта, который позволит автоматизировать следующие основные процессы:

- выбор оптимальных параметров для развития инфраструктуры под заданные объемы перевозок, исходя из действующей технологии и технического оснащения выбранного полигона или участка;
- расчет стоимости потребных инфраструктурных мероприятий на основе качественного подбора объектов-аналогов;
- определение оптимальной этапности развития выбранного полигона или участка на основе множества факторов, влияющих на строительство (финансы, сроки реализации, производственные мощности, возможность предоставления «окон» и т.д.);
- формирование модели организации движения, включая этап моделирования.

Создание единой информационной базы параметров существующей железнодорожной инфраструктуры может стать эффективным инструментом поиска оптимального набора мероприятий по развитию инфраструктуры объекта и этапности его реализации, исходя из стратегических задач, существующего развития всего направления, а также перспективной технологии работы полигона.



Литература

1. Опыт внедрения и применения технологии информационного моделирования на зарубежных железных дорогах. — Москва: Центр научно-технической информации и библиотек ОАО «РЖД», 2020. — 58 с. — Текст: непосредственный.
2. ОНЦКРЖ 81-02-07-2017. Отраслевые укрупненные сметные нормативы. Железные дороги. — Москва, 2017 // Техэксперт: [сайт]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/456079969> (дата обращения: 11.05.2022).
3. Перечень систем, аппаратуры и оборудования железнодорожной автоматики и телемеханики, разрешенных по результатам приемочных испытаний к проектированию для объектов ОАО «РЖД» [утвержден начальником Управления автоматики и телемеханики Э.Г. Ореховым от 02.03.2022 № ЦДИ-73]. — Москва, 2022. — 102 с. — Текст: непосредственный.
4. СП 235.1326000.2015. Свод правил. Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования [утвержден и введен в действие приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 6 июля 2015 года № 205]. — Москва, 2015 // Техэксперт: [сайт]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/12-00124320> (дата обращения: 11.05.2022).

ИНФОРМАЦИОННАЯ МЕТОДИКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Рассмотрены теоретические основы информационного метода интегральных оценок при контроле точности изготовления деталей и узлов транспортных машин в условиях применения серийного технологического оборудования длительной эксплуатации. Особенностью метода является возможность совокупной оценки конструктивных параметров по измерению их систематической составляющей в изменяемом интервале неопределенности.



С.А. Синицын

Ключевые слова: предел измеримости точечных множеств, интегральная оценка точности измерений, мера и количество геометрической информации в линейных измерениях

EDN: BOLAFV

Процесс конструирования и изготовления деталей и узлов транспортных машин связан с высокоточными технологиями и измерениями, которые далеко не всегда могут быть обеспечены оборудованием в силу объективных условий, например, из-за старения и износа самого технологического оборудования. Кроме того, необходимо учитывать, что не все детали и узлы должны быть изготовлены с высокой точностью, неоправданно завышающей стоимость самого изделия. Такие обстоятельства в ряде случаев вызывают необходимость совокупных или интегральных оценок, учитывающих не только возможную или допустимую точность измерений на доверительных интервалах, но и числовые величины систематических составляющих самих конструктивных параметров.

Прежде, чем исследовать количественную сторону информационного содержания некоторой точки

поверхности детали, как универсального объекта измерения, необходимо выявить наиболее характерные свойства, определяющие содержательную часть информации, т.е. выявить ее семантическую структуру. Решение такой задачи имеет двоякий смысл. С одной стороны, выявляются основные компоненты информационного содержания точки как независимого формообразующего объекта поверхности детали, с другой стороны, выявляются математические характеристики или меры количества информации, приемлемые для решения данной задачи.

Одной из главных причин методических неудач в попытках применения информационного метода для решения широкого класса задач конструирования технических объектов, в том числе их поверхностей, стало прямое использование достижений классической, энтропийной теории информации, разрабо-

Синицын Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: прикладная геометрия, геометрическое и ситуационное моделирование в области искусственного интеллекта. Автор более 200 научных работ, в том числе семи монографий.

танной К. Шенноном в середине прошлого века для решения специфических задач в области связи при передаче информации.

Уместно вспомнить, что энтропийная теория была разработана для решения определенного класса задач теории связи, в которых неопределенность информации вычисляется на различных стадиях существования одного и того же конкретного сигнала. При этом полезный сигнал η существует в момент передачи по каналу связи, и его неопределенность характеризуется энтропией $H(\eta^*)$. Этот же сигнал существует после приема сообщения, но его неопределенность уменьшается до величины $H(\eta^0)$. Разность этих двух энтропий определяет количество информации, полученной в результате передачи сигнала. Такая задача имеет определенное смысловое содержание, не требующее выявления систематической составляющей [1].

Иная задача ставится в процессе технического конструирования, которое непосредственно связано с систематическими составляющими геометрических и прочих проектных параметров, вычисляемых в некоторых диапазонах достоверности. Такие диапазоны достоверности характеризуются энтропийными свойствами, но не содержат полезной информации в отсутствии систематической составляющей технического параметра.

Всякая геометрическая модель относится к классу технических объектов, которые конструируются по схеме иерархической, многоэтапной конкретизации изделия, элементы поверхности которого эта модель описывает [2]. Поэтому ее информационное содержание должно оцениваться на основе математической меры, учитывающей систематическую и случайную составляющие ее параметров.

Чтобы определить эти составляющие, присущие любому геометрическому параметру модели, рассмотрим элемент поверхности, представленный на рис. 1. Для его геометрической определенности зададим декартову систему координат $OXYZ$, а также масштабные единицы измерения по соответствующим осям: ΔX , ΔY , ΔZ . Далее определим координаты множества точек ξ_i , принадлежащих этой поверхности, либо множество образующих L_j , принадлежащих поверхности S , которые, в свою очередь, также определяются координатами точек ξ_i и рядом дополнительных дифференциально-геометрических условий.

Каждая координата точки в заданной системе отсчета является общей характеристикой любого геометрического элемента и определяет его детерминированные свойства. Такая координата задает целое число масштабных единиц измерений ΔX , ΔY , ΔZ , размещенных на координатном отрезке [3]. Измеренная длина координатного отрезка — случайная величина,

отличающаяся от своего истинного значения в пределах доверительного диапазона $\Delta \xi_i$, значение которого обычно принимается равным масштабу измерения по соответствующим осям. Доверительный диапазон координатных отрезков несет в себе случайную составляющую измерения.

Таким образом, общей характеристикой любой точки поверхности проектируемого объекта является свойство измеримости координатных отрезков, величины которых содержат две компоненты — систематическую (количество единиц измерения координат) и вероятностную (доверительный диапазон измерения): $\bar{X}_{\xi_i} = \bar{\xi}_{xi} \cdot \Delta X$.

В соответствии с семантической структурой параметров, измерение информационного содержания геометрических элементов должно выполняться на основе математической меры, учитывающей обе составляющие измеряемой величины — систематическую и случайную [4]. Параметры геометрической модели принимают случайные значения в соответствующих доверительных диапазонах $\Delta g_i^{(j)}$, где j — этап моделирования; i — номер параметра модели.

Каждый доверительный диапазон характеризуется величиной и законом распределения вероятностей значений, принимаемых при измерении координатных отрезков. В связи с чем, наиболее полной его характеристикой может быть энтропия, выраженная одним числом, учитывающим оба указанных свойства и обладающая аддитивностью относительно параметров геометрической модели. Практическое вычисление энтропии геометрических параметров требует знания вероятностных свойств их доверительных диапазонов, что не всегда оказывается возможным в реальных условиях моделирования [5]. Тогда приходится вводить дополнительную неопределенность путем рассмотрения равновероятных законов распределения, заданных размерными интервалами.

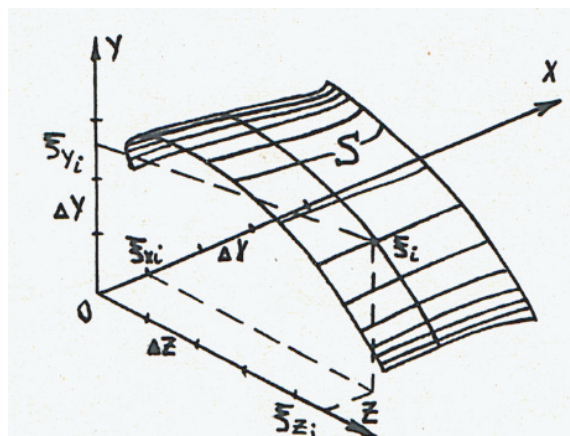


Рис. 1. Элемент поверхности каркасной структуры

Энтропия равномерного закона максимальна и ее расчет выполняется по простой формуле

$$H(g_i^{(j)}) = \ln \Delta g_i^{(j)}, \quad (1)$$

где $\Delta g_i^{(j)}$ — величина размерного доверительного диапазона i -го параметра модели на j -м этапе моделирования.

Вычисление энтропии по формуле (1) связано со значительными трудностями работы с размерными множествами $\Delta g_i^{(j)}$, в связи с чем возникает необходимость искусственного нормирования и обезразмеривания величин параметров геометрической модели. Все эти трудности вызывают серьезные проблемы в использовании энтропии в качестве самостоятельной математической меры для исследования информационных свойств геометрических моделей [6]. Чтобы упростить задачу, введем в рассмотрение меру количества информации, учитывающую энтропийные свойства объекта наряду с детерминированными.

Количество информации, приобретенное любым параметром в результате измерения, обычно определяется разностью

$$\text{Inf}(\Delta g_i^{(j)}) = H(\Delta g_i^{(j-1)}) - H(\Delta g_i^{(j)}), \quad (2)$$

где $H(\Delta g_i^{(j-1)})$ — энтропия i -го параметра геометрической модели на $(j-1)$ -м этапе ее применения;

$H(\Delta g_i^{(j)})$ — энтропия того же параметра на следующем этапе моделирования.

Если в правой части равенства (2) прибавить и вычесть одно и то же постоянное число C , то равенство сохранится:

$$\text{Inf}(\Delta g_i^{(j)}) = H(g_i^{(j-1)}) - H(g_i^{(j)}) + C - C. \quad (3)$$

В качестве постоянной C , с учетом свойства стационарности геометрических моделей в широком смысле, выберем геометрическую характеристику постоянную для j -го и $(j-1)$ -го этапов моделирования — логарифм математического ожидания параметра $g_i^{(j)}$:

$$\begin{aligned} \text{Inf}(g_i^{(j)}) &= \log(M[g_i^{(j)}]) - H(g_i^{(j)}) - \\ &- \log(M[g_i^{(j-1)}]) + H(g_i^{(j-1)}). \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку слева в равенстве (4) остается информация, то на основании базового соотношения измерения информации (2) можно утверждать, что каждое выражение в квадратных скобках (4) есть не что иное, как мера количества информации на различных этапах моделирования [7].

Введем обозначения:

$$\begin{cases} \text{ГИ}(g_i^{(j-1)}) = \log(M[g_i^{(j-1)}]) - H(g_i^{(j-1)}); \\ \text{ГИ}(g_i^{(j)}) = \log(M[g_i^{(j)}]) - H(g_i^{(j)}). \end{cases} \quad (5)$$

Преобразуем правые части равенства (5) с учетом формулы (1) и свойств логарифма:

$$\begin{cases} \text{ГИ}(g_i^{(j-1)}) = \log(M(g_i^{(j-1)}) / \Delta g_i^{(j-1)}); \\ \text{ГИ}(g_i^{(j)}) = \log(M(g_i^{(j)}) / \Delta g_i^{(j)}). \end{cases} \quad (6)$$

В дальнейшем будем называть выражения в левой части (6) геометрической информативностью, которая наиболее полно отражает семантические свойства геометрических параметров модели.

Геометрическая информативность представляет часть общего информационного тезауруса, определяющего характерные геометрические свойства плоских и пространственных объектов. Она может быть единой мерой для различных видов геометрических моделей только в том случае, если ее количественная оценка выполняется на основе семантических признаков общих для всех видов моделирования. Поэтому выявление таких общих свойств моделей является первоочередной задачей.

Для любого вида геометрических моделей наиболее общим свойством является измеримость составляющих ее геометрических элементов. Свойство измеримости непосредственно связано с масштабной единицей измерения, а сам процесс измерения состоит в установлении соответствия между измеряемым объектом и целым числом единиц масштаба. При этом минимальный измеренный параметр не должен быть меньше масштабной единицы измерения. В противном случае процесс измерения невозможен [8].

Помимо свойства измеримости геометрических объектов, существует их позиционная привязанность к заданной системе отсчета. Позиционная привязанность (или определенность) выражает вторую составляющую общих семантических признаков. Характерным геометрическим объектом является точка на плоскости или в пространстве, которая обладает единственным информационным признаком — позиционной определенностью.

На основании признаков метрической и позиционной определенностей будем различать две одноименные составляющие геометрической информации, сумма которых выражает полную геометрическую информацию в выбранной системе отсчета. Уместно вспомнить, что объект в евклидовом пространстве обладает тремя геометрическими свойствами: метрикой, формой и положением. Поскольку форма объекта описывается метрическими параметрами, то будем считать ее заданной, если метрические свойства определены заранее.

В соответствии с семантикой геометрической информации определим информационные свойства геометрических элементов на плоскости и в про-

пространстве [2]. Для этого зададим в пространстве R^3 декартову систему координат $OXYZ$ (рис. 2) с равными масштабами по всем осям ($\Delta X = \Delta Y = \Delta Z$). Определим некоторую точку $\eta(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$ координатными отрезками:

$$X_\eta = \eta_x \Delta X; Y_\eta = \eta_y \Delta Y; Z_\eta = \eta_z \Delta Z. \quad (7)$$

Далее, относительно точки $\eta(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$, как угловой, построим некоторый куб со стороной ΔX . Такой куб представляет собой предельный пространственный геометрический объект измеримого информационного содержания. Последовательно уменьшая масштабную единицу ΔX , будем строить относительно угловой точки η кубы со сторонами ΔX .

Переходя к пределу при $\Delta X \rightarrow 0$, получим информационную характеристику куба, все угловые точки которого стремятся к точке η :

$$\text{Inf}(\eta) = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} [\text{Inf}(\eta_x, \eta_y, \eta_z, \Delta X)]. \quad (8)$$

Далее будем считать, что предел (8) определяет информационное содержание точки η в пространстве R^3 , в системе координат $OXYZ$ при равных масштабных единицах по всем осям.

Соединив точку $\eta(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$ с началом координат отрезком $[0\eta]$, определим информационное содержание точки η аналогично плоскому случаю. Для этого вначале выразим информационное содержание отрезка $[0\eta]$, заданного координатами точки $\eta(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$. Относительно отрезка $[0\eta]$ построим локальную систему координат $O^1X^1Y^1Z^1$ с теми же равными масштабами по осям ($\Delta X^1 = \Delta Y^1 = \Delta Z^1$).

Начало координат новой системы координат совместим с началом базовой системы ($O = O^1$), а ось O^1X^1 совместим с отрезком $[0\eta]$. Тогда информационное содержание отрезка $[0\eta]$ определится в локальной системе координат $O^1X^1Y^1Z^1$ через натуральный логарифм:

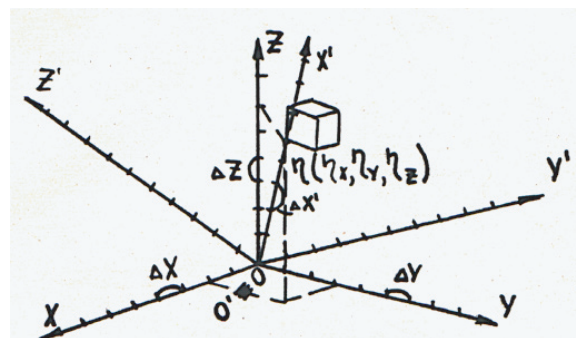


Рис. 2. Схема формирования предельной информации точки поверхности

$$\text{Inf}[0\eta] = \ln\left(\frac{\overline{0\eta}}{\Delta X^1}\right). \quad (9)$$

Выражая длину отрезка $[0\eta]$ через координаты точки η , получим:

$$\text{Inf}[0\eta] = \ln \frac{\Delta X \sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2}}{\Delta X^1} = \ln \sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2}. \quad (10)$$

Далее определим количество информации, приходящейся на единицу измерения ΔX^1 отрезка $[0\eta]$ в локальной системе координат $O^1X^1Y^1Z^1$. В результате получим формулу расчета информационного содержания точки η :

$$\text{Inf}(\eta) = \frac{\ln \sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2}}{\sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2}}. \quad (11)$$

Выражение (11) определяет информационное содержание точки $\eta(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$ в исходной (базовой) системе координат $OXYZ$, независимо от величины масштаба измерения ΔX при условии равенства масштабных единиц по всем осям заданной системы ($\Delta X = \Delta Y = \Delta Z$).

Литература

1. Синицын, С.А. Информационные характеристики доверительных диапазонов параметров ситуационных моделей. — Текст: непосредственный / С.А.Синицын, О.Ф. Гусарова // Оригинальные исследования. — 2019. — Т.9, №4. — С. 4—12.
2. Синицын, С.А. Техническое проектирование — преобразование доверительных диапазонов проектных параметров. — Текст: непосредственный / С.А.Синицын // Оригинальные исследования. — 2021. — Т.11, №9. — С.103—107.
3. Синицын, С.А. Погрешность формообразования поверхности, заданной кинематическим методом / С.А.Синицын. — Текст: электронный // E-Scio: научное сетевое издание. — 2020. — №2 (41). — С. 204—211. — URL: <https://e-scio.ru/wp-content/uploads/2020/02/Синицын-С.-А.pdf> (дата обращения: 18.08.2022).

4. Сеницын, С.А. Погрешность формирования поверхности точечного каркаса / С.А.Сеницын. —Текст: непосредственный // Оригинальные исследования. —2020. —Т.10, №2. —С. 51–56.
5. Левчук, Т.В. Трехмерное моделирование при визуализации математических и технических задач / Т.В. Левчук, А.Р. Ким. —Текст: непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. —2016. —№1. —С. 75–78.
6. Левчук, Т.В. Оптимизация систем массового обслуживания / Т.В. Левчук, М.С. Казаков, А.С. Зверев. —Текст: непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. —2014. —№1. —С. 84–87.
7. Sergey Sinitsyn, Vladimir Panchenko, Valeriy Kharchenko, Pandian Vasant. Optimization of Parquetting of the Concentrator of Photovoltaic Thermal Module // Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 1072, 2020, pp. 160–169, https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_16.
8. Sergey Sinitsyn, Vladimir Panchenko, Valeriy Kharchenko, Andrey Kovalev, Pandian Vasant The Concept of Information Modeling in Interactive Intelligence Systems // Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 1072, 2020, pp. 249–259, https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_25.

ОПТИМИЗАЦИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ УБОРОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ПРИМЕРЕ АО «УЧХОЗ ЗЕРНОВОЕ» ЗЕРНОГРАДСКОГО РАЙОНА РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ



А.Ф. Бельц



Л.Ю. Шевырëв

Показана необходимость оптимизации совместной работы уборочно-транспортных комплексов на примере АО «Учхоз Зерновое». Обоснована ее экономическая эффективность.

Ключевые слова: уборочно-транспортные группы, севооборот, организация перевозок, агросроки

EDN: CQZKXL

Анализ взаимодействия зерноуборочных комбайнов и автомобилей на уборке зерновых 2020 г. в АО «Учхоз Зерновое» показал, что парк подвижного состава предприятия устарел и необходимо оптимизировать транспортное обеспечение уборки зерновых. На предприятии преобладают малопродуктивные грузовые автомобили. Нагрузка на средний комбайн превышает 300 га. В результате по рекомендациям авторов к уборке урожая 2021 г. АО «Учхоз Зерновое» дополнительно приобрело два автомобиля КАМАЗ с прицепами и два комбайна Дон. Также был установлен зерноочистительный комплекс ЗАВ-100 [1]. Кроме того, было обнаружено несоблюдение сроков уборки зерновых. В течение максимум 10

дней уборка зерновых должна быть закончена. Иначе с каждым последующим днем потери будут увеличиваться по нарастающей за счет выпадения зерна из колосьев. Авторами предложена форма организации труда группами (звеньями) по девять комбайнов. Группы больше этой численности уже будут не так управляемы и эффективны.

Материалы, модели, эксперименты и методы

В условиях применяемой формы организации работы оптимизировать работу уборочно-транспортных групп можно путем расчета потребности в транспорте по каждому полю и закреплением уборочно-

Бельц Алексей Федорович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов» Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина. Область научных интересов: технологии и средства механизации сельского хозяйства, управление процессами перевозок, эксплуатация автомобильного транспорта. Автор 71 научной работы.

Шевырëв Леонид Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация и технический сервис наземных транспортно-технологических средств» Азово-Черноморского института Донского государственного аграрного университета. Область научных интересов: технологии и средства механизации сельского хозяйства, управление процессами перевозок, эксплуатация автомобильного транспорта. Автор 70 научных работ.

Каплунов Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация и технический сервис наземных транспортно-технологических средств» Азово-Черноморского института Донского государственного аграрного университета. Область научных интересов: технологии и средства механизации сельского хозяйства, управление процессами перевозок, эксплуатация автомобильного транспорта. Автор 39 научных работ.

транспортных групп за полями севооборотов таким образом, чтобы потребность в транспорте была наиболее равномерной. Посевные площади под зерновыми представлены в табл. 1. Данная работа выполнялась с применением графоаналитических методов и в результате были составлены табл. 2.

В настоящее время на каждом севообороте работает одна уборочно-транспортная группа. На первом севообороте работают девять зерноуборочных комбайнов (пять комбайнов Дон-1500А и четыре комбайна Дон-1500Б). Данные комбайны могут обслуживаться десятью автомобилями КАМАЗ, вмещающими по два бункера зерна комбайнов Дон-1500А и Дон-1500Б или пятью автомобилями с прицепами, вмещающими по четыре бункера зерна комбайнов Дон-1500А и Дон-1500Б. Сроки уборки зерновых составят 11 дней (рис. 1), вместо 12 дней в предшествующем варианте. Максимальная нагрузка на хлебоприемный пункт (ток) от данного севооборота будет составлять до 58 тонн в час.

На втором севообороте работают девять зерноуборочных комбайнов Дон-1500А. Они должны обслуживаться по пику перевозок автомобилями ГАЗ, ЗИЛ и МАЗ числом до 17, вмещающими по одному бункеру зерна. Авторами предлагается (рис. 2), замена устаревшего парка путем приобретения четырех 10-тонных автомобилей и семи прицепов (имеется пять), что позволит заменить устаревшие автомобили, применяемые на втором севообороте. Сроки уборки составят 13 дней (рис. 2) вместо 14 дней в предшествующем варианте. Максимальная нагрузка на хлебоприемный пункт (ток) от данного севооборота будет составлять до 61 тонны в час.

На третьем севообороте (кооператив «Кленовый») работают три зерноуборочных комбайна Дон-1500А. Они обслуживаются шестью автомобилями ГАЗ-53Б, вмещающими по одному бункеру зерна. Здесь не внеслось никаких изменений, поскольку нормативные агросроки соблюдаются. Максимальная нагрузка на

хлебоприемный пункт (ток) от данного севооборота будет составлять до 19 тонн в час.

Итого максимальная нагрузка на хлебоприемные пункты может составить по трем севооборотам до 138 тонн в час [2].

Представленный порядок уборки полей может быть скорректирован в соответствии с фактическим состоянием зерновых (влажность, спелость и т.д.). Такая организация работ является оптимальной в данной схеме использования транспортных и технологических машин.

Суммарные затраты на автомобильные перевозки рассчитываются по формуле:

$$\text{Собщ} = \text{ОТ} + \text{СВ} + \text{АТ} + \text{СМ} + \\ + \text{ТО и ТР} + \text{Ш} + \text{А} + \text{Нр}, \text{ руб.}, \quad (1)$$

где ОТ — расходы на оплату труда водителей, руб.;

СВ — страховые взносы во внебюджетные фонды, руб.;

АТ — стоимость автомобильного топлива, руб.;

СМ — смазочные и другие эксплуатационные материалы, руб.;

ТО и ТР — техническое обслуживание и текущий ремонт подвижного состава, руб.;

Ш — стоимость износа и ремонта шин;

А — годовые амортизационные отчисления на восстановление подвижного состава, руб.;

Нр — накладные расходы, руб.

Исходя из формулы (1) можно сделать вывод, что стоимость часа работы автомобилей ГАЗ и КАМАЗ различна (смазочные и другие эксплуатационные материалы, ТО и ТР подвижного состава и т.д.).

Экономия затрат на операции определяется по формуле:

$$\Delta_3 = C_{\text{общ}}^{\text{исх}} + C_{\text{общ}}^{\text{пр}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{общ}}$ — общие (суммарные) затраты на операции, руб.

Таблица 1

Объемы сбора зерновых колосовых за 2021 г.

Наименование	Площадь, га	Объем, т
Всего зерновых колосовых в хозяйстве, в том числе:	6625,7	21831,1
в севообороте №1	2634	8922,6
в севообороте №2	3108	10269,6
в севообороте №3	883,7	2638,9

Таблица 2

Фрагмент расчетов закрепления уборочно-транспортных групп за полями

№ поля и отделения	Грузооборот по маршрутам		Время работы комбайнов, ч		Число автомобилей, шт.			Варианты распределения уборочно-транспортных звеньев	
	P_{jk}^1	P_{jk}^2	t_{jk}^1	t_{jk}^2	m_{jk}^1	m_{jk}^2	есть	№ 1	№ 2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отделение № 1									
1.2	777,96	—	5,97	—	10	—	8	1-I	—
2.2	713,38	—	3,25	—	10	—	8	1-XVI	—
2.4	713,15	—	3,77	—	10	—	8	1-XVII	—
3.1	607,38	—	3,39	—	8	—	8	1-V	—
3.2	607,43	—	3,72	—	8	—	8	1-VI	—
3.3	604,94	—	3,24	—	8	—	8	1-VII	—
4.1	545,41	—	2,83	—	8	—	8	1-VIII	—
Отделение № 2									
1.1	375,57		9,52	—	5	—	13	1-VII	—
3	465,57		19,7253	—	5	—	13	1-XI	—
3k.2	177,58		2,23	—	4	—	13	1-XXIV	—
3k.3	181,36		2,20	—	4	—	13	1-II	—
4k.1	236,64		1,19	—	5	—	13	1-XXV	—
4k.2	242,19		2,37	—	4	—	13	1-IV	—
4k.3	237,70		1,74	—	5	—	13	1-XXVI	—
6k.1	363,69		5,37	—	5	—	13	1-VI	—
6k.2	355,83		3,45	—	5	—	13	1-XXVIII	—
7k	363,20		7,69	—	5	—	13	1-V	—
Отделение № 3 (кооп. «Кленовый»)									
3.1	118,63	—	7,90	—	5	—	6	1-XXIV	—
3.2	118,56	—	8,35	—	5	—	6	1-XXV	—
3.3	118,63	—	6,12	—	5	—	6	1-XXVI	—
4.1	141,28	—	7,11	—	5	—	6	1-III	—
4.2	59,33	—	3,56	—	4	—	6	1-XXVII	—
4.3	141,28	—	14,74	—	5	—	6	1-IV	—
4.5	141,45	—	5,82	—	5	—	6	1-V	—

Поскольку количество автомобилей по третьему отделению (севообороту) неизменно, в дальнейших расчетах его рассматривать не будем.



агросрока даже в благоприятных погодных условиях. Это неизбежно повлечет потери зерна.

Экономическая оценка предполагаемых автотранспортных мероприятий показала их эффективность. Окупаемость составит немногим более двух лет, что является довольно приемлемым результатом. Кроме того, обновленный автопарк сельхозпредприятия будет работать с большей производительностью. Данные предложения позволят быстрее закончить уборку зерновых и не допустят потери урожайности, как это наблюдается в настоящее время по результатам выхода за нормативные агросроки.

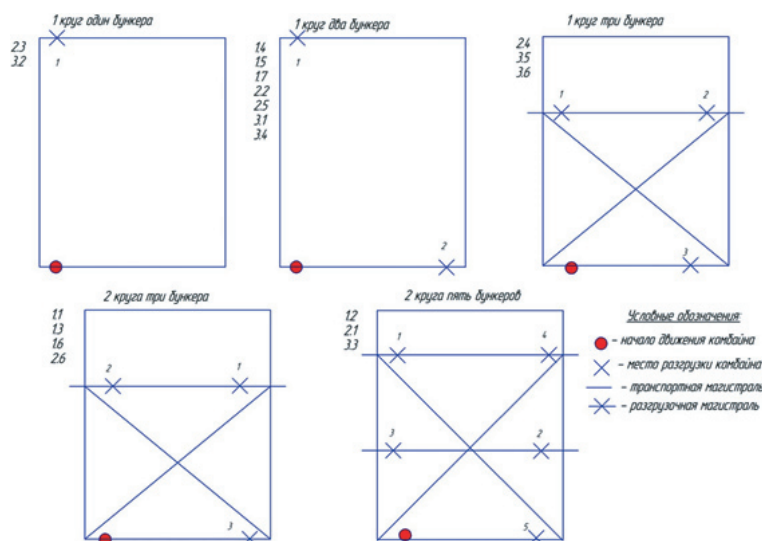


Рис. 3. Транспортные и разгрузочные магистрали

Авторы выражают благодарность АО «Учхоз Зерновое» Зерноградского района Ростовской области за предоставленные материалы и помощь в исследованиях.

Литература

1. Бельц, А.Ф. Оптимизация процесса по варианту перспективного использования в хозяйстве парка автомобилей и технологических машин /А.Ф. Бельц, В.А. Зацаринный, Н.Н. Николаев. —Текст: непосредственный // Совершенствование конструкций и повышение эффективности эксплуатации колесных и гусеничных машин в АПК: межвузовский сборник научных трудов. —Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2010. —С. 46–52.
2. Бельц, А.Ф. Транспортно-складские комплексы: методические указания по выполнению курсового проекта /А.Ф. Бельц. —Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. —30 с. —Текст: непосредственный.
3. Бурьянов, А.И. Оптимизация режимов работы грузового автопарка с применением информационных технологий / А.И. Бурьянов, Н.Н. Николаев. —Текст: непосредственный //Вестник аграрной науки Дона. —2011. —№4. —С. 34–39.
4. Пархоменко, Г.Г. Оптимизация показателей технологических процессов сельскохозяйственного производства в растениеводстве / Г.Г. Пархоменко, С.Г. Пархоменко. —Текст: непосредственный// Хранение и переработка зерна. —2017. —№1 (209). —С. 55–60.
5. Стратегия машинно-технологического обеспечения производства сельскохозяйственной продукции России на период до 2010 года. —РАСХН —Минсельхоз РФ. —Москва, 2003.
6. Экспертное обеспечение транспортной логистики / Н.В. Веселов, А.А. Рогов, И.С. Кравчук, О.А. Бортник: монография. —Москва: ИТК «Дашков и К°», 2013. —230 с. —Текст: непосредственный.
7. Логинов, А.В. Навигационно-связное устройство для спутникового контроля и мониторинга машинно-тракторного парка, работающее на базе глобальной навигационной системы ГЛОНАСС / А.В. Логинов, Д.О. Олейник, О.Н. Пылаева. —Текст: непосредственный // Инновационные подходы к развитию агропромышленного комплекса региона. —Рязань, 2016. —С. 146–151.
8. Бурьянов, А.И. Направления совершенствования уборочных процессов/А.И. Бурьянов, А.И. Дмитренко. —Текст: непосредственный //Техника и оборудование для села. —2010. —№10. —С. 13–16.
9. Чулков, А.С. Математическая модель расчета производительности и количества транспортных средств в уборочно-транспортном комплексе на перевозке зерна от комбайна/ А.С. Чулков, Е.П. Шилова. —Текст: непосредственный // Сельскохозяйственные машины и технологии. —2011. —№6. —С. 42–45.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЦЕПИ ПОСТАВОК

Рассмотрены особенности проектирования цифровых двойников для мониторинга бизнес-процессов в цепях поставок. Авторы предлагают структурировать информационный поток о состоянии бизнес-процессов в звеньях цепи поставок для получения оперативной информации о текущих результатах и повышения точности прогнозирования.

Ключевые слова: транспортная стратегия, управление цепями поставок, цифровой двойник, искусственный интеллект, интернет вещей

EDN: IPQPFK



О.Н. Ларин



А. Оюунгарав

Реализация положений Транспортной стратегии Российской Федерации обеспечит к 2030 году качественное развитие отрасли, что создаст условия для повышения уровня жизни населения страны и конкурентоспособности национальной экономики. В число главных приоритетов Стратегии включены развитие мультимодальных логистических технологий и цифровая трансформация отрасли. При этом в документе отмечается, что недостаточный уровень цифровизации является одной из основных причин сравнительно высоких логистических издержек и низкой надежности доставки грузов по внутрироссийским и международным транспортным коридорам.

Цифровизация транспортной системы страны является комплексным стратегическим проектом, который предусматривает реализацию различных мероприятий для повышения эффективности и безопасности перевозочного процесса. С использованием цифровых технологий уже сегодня организуются перевозки с использованием беспилотного транспорта, ведется мониторинг состояния транспортных средств и объектов линейной инфраструктуры, автоматизируются процессы планирования и управления грузовыми и пассажирскими потоками, внедряется электронный документооборот в мультимодальных сообщениях и трансграничных процедурах, организуется взаимо-

Ларин Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Логистические транспортные системы и технологии» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: развитие транзитного потенциала транспортных систем. Автор более 200 научных работ, в том числе семи монографий.

Оюунгарав Амарсанаа, аспирант кафедры «Логистические транспортные системы и технологии» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: совершенствование технологий управления перевозками. Автор четырех научных работ.

Прибыткова Дарья Андреевна, аспирант кафедры «Логистические транспортные системы и технологии» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: развитие сети грузовых терминалов в крупных агломерациях. Автор трех научных работ.

Моононхуу Цогт, аспирант кафедры «Логистические транспортные системы и технологии» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: развитие сети железнодорожных коридоров. Автор двух научных работ.

Баасан Сарангэрэл, аспирант кафедры «Логистические транспортные системы и технологии» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: совершенствование логистических процессов. Автор двух научных работ.

действие участников транспортно-логистической деятельности с государственными органами по принципу «одного окна» при организации перевозок различными видами транспорта.

Перспективным направлением цифровизации отрасли являются проекты создания «цифровых двойников» (ЦД), которые обеспечивают участников транспортного процесса предиктивной аналитикой о динамике технологических процессов. Применение ЦД обеспечивает:

- отображение (визуализацию) происходящих с объектом изменений в процессе функционирования на основе поступающей в режиме реального времени информации о параметрах работы его компонентов и характеристик внешней среды;
- интеллектуальный анализ параметров работы и выявление несоответствий в работе объекта установленным требованиям;
- выработку способов повышения эффективности функционирования объекта по критериям безопасности, удовлетворенности клиентов и прибыльности бизнеса.

В Стратегии цифровой трансформации отрасли Российской Федерации предусмотрена реализация проекта «Цифровых двойников объектов транспортной инфраструктуры», которые станут основой для ЦД «Единой опорной сети страны». В рамках данного направления планируется создать с использованием BIM-технологий (Building Information Modeling) информационные модели всех объектов транспортной инфраструктуры, для последующего использования на различных этапах жизненного цикла реального физического объекта — проектирование, создание, эксплуатация, ремонт, вывод из эксплуатации.

Основные эффекты применения ЦД объектов транспортной инфраструктуры образуются в виде повышения качества транспортно-логистических услуг, обеспечения их безопасности и надежности, а также уменьшения вредного воздействия на экологию. ЦД транспортной инфраструктуры использует информацию о состоянии объекта, поступающую в режиме реального времени с датчиков контроля, для анализа и предиктивного моделирования с помощью технологий искусственного интеллекта. При отклонении какого-либо рабочего параметра объекта от нормы, ЦД сигнализирует об этом и дает информацию для принятия мер или сам в автоматическом режиме корректирует работу объекта. При этом могут быть и препятствия широкому применению ЦД: значительные финансовые ресурсы на разработку ЦД и модернизацию систем сбора данных; длительные сроки организационных изменений (перестройка бизнес-процессов, выработка компетенций у сотрудников и пр.); неготовность

партнеров и клиентов взаимодействовать с ЦД; риски киберугроз и кражи данных; критическая зависимость от поставщиков ЦД и ИТ-сервисов.

На сегодняшний день в отечественных и зарубежных научных работах можно встретить различные определения понятия ЦД. Например, в [14] под ЦД понимается метод разработки интеллектуальных систем, использующих информацию об объекте в реальном времени. В [3;6;7 и др.] подчеркивается виртуальный характер ЦД, существующих в виде математических моделей, используемых для проектирования структуры и функций реального объекта, прогнозирования отказов, улучшения выполняемых процессов.

В контексте настоящего исследования под ЦД будем понимать информационную систему, которая состоит из трех основных компонентов: цифровая модель реального объекта, средства поддержания двунаправленных информационных связей (передачу данных) между объектом и цифровой моделью; цифровые технологии, обеспечивающие жизнеспособность ЦД. Под цифровой моделью понимается система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов, описывающая структуру, функциональность и поведение объекта. В качестве объекта ЦД могут выступать физические, технические, экономические и даже социальные системы (промышленное предприятие, транспортное средство и его агрегаты, городское хозяйство и пр.). Основными цифровыми технологиями, обеспечивающими жизнеспособность ЦД, являются: интернет вещей (The Internet of Things, IoT); облачные вычисления (Cloud Computing); API и открытые стандарты (APIs & Open Standards); искусственный интеллект (Artificial Intelligence); инструменты цифровой визуализации (Augmented, Mixed, and Virtual Reality). Особенности применения цифровых технологий в разработке ЦД рассмотрены в [2;5].

В последнее время в реальном секторе экономики возрос интерес к «цифровым двойникам цепочек поставок» (ЦДЦП), которые способны собирать и обрабатывать потоки данных о работе сложно структурированных и глобально распределенных участников ЦП [9;16]. Цифровизация ЦП создает базис для интеграции процессов планирования и текущей операционной деятельности компаний, быстрого реагирования на изменчивость спроса и сокращение жизненного цикла продукции. Однако на сегодняшний день пока не выработаны универсальные подходы к построению ЦДЦП, к их функциональному наполнению модели, структурированию двусторонних информационных потоков и др. Получение ответов на данные вопросы является целью настоящего исследования.

Основная часть

Цепочка поставок является сложной по составу и структуре системой территориально-распределенных взаимодействующих участников. К основным участникам ЦП относятся: фокусная компания (производитель товара); поставщики фокусной компании, в многозвенных цепях — поставщики поставщиков и т.д. («upstream»); покупатели основной продукции, в многозвенных цепях — дистрибутеры, торговые сети и другие структуры сбыта («downstream»); перевозчики; владельцы транспортной и логистической инфраструктуры (терминалы, склады и пр.); владельцы подвижного состава, погрузочно-разгрузочных устройств, контейнеров и т.п.; логистические посредники (экспедиторы, организаторы мультимодальных сервисов и пр.).

Целевое назначение ЦП состоит в удовлетворении требований (выполнении «Заказов») потребителей с соблюдением законодательных ограничений. Последовательность, взаимосвязанность и взаимозависимость выполняемых бизнес-процессов участниками ЦП обуславливают целесообразность применения процессного подхода при создании ЦДЦП как единой системы участников, взаимодействующих с целью повышения удовлетворенности потребителей и собственной эффективности. Основная функция ЦДЦП заключается в обеспечении интеллектуальной поддержки участников ЦП при реализации стратегического и оперативного планирования (прогнозирование спроса, пополнение запасов, выполнение заказов и пр.), интеграции, координации и т.п.

Структурно ЦДЦП состоит из подсистем — ЦД участников ЦП и обеспечивает их информационное взаимодействие. Поэтому к ЦДЦП применяется термин «агрегированный ЦД». В [8] рассмотрены особенности построения интегрированных структур ЦДЦП. Примеры ЦД отдельных участников ЦП:

- ЦД складов и распределительных центров — обеспечивает сбор и анализ данных о перемещении товаров и оборудования по складу, выявляет неэффективные операции, ошибки в работе персонала, оценивает эффективность планируемых изменений в конфигурации складских помещений и внедрения нового оборудования;

- ЦД логистической инфраструктуры — обеспечивает сбор и анализ данных о технологических процессах (прибытие подвижного состава, работа погрузочно-разгрузочных машин и оборудования), определение места на терминале для обслуживания транспортного средства с учетом свободного оборудования и персонала.

- ЦД транспортно-логистической компании — обеспечивает сбор и анализ данных о транспортных процессах, оперативный учет затрат на мультимодальную

перевозку с учетом внешних факторов для прогнозирования прибыльности выполнения заказа и реальной себестоимости услуги, чтобы оперативно корректировать тарифные решения.

Типовые функции ЦД участников ЦП:

- определение ресурсов, необходимых для реализации «Заказа», обеспечение их доступности;
- распределение обязанностей, ответственности и полномочий в отношении реализуемых бизнес-процессов;
- оценка отклонений в процессах и внесение в них изменения для достижения плановых показателей;
- учет рисков для минимизации негативных последствий или использования возникающих возможностей;
- обеспечение улучшений бизнес-процессов.

Цифровая модель участника ЦП использует три типа данных:

- узловой сегмент — включает данные из корпоративной ИТ-системы (ERP) о выполнении внутренних процессов (например, данные о местоположении транспортных средств, выполненных производственных операциях, обработке заявок);
- сетевой сегмент — включает данные из систем поставщиков и партнеров (например, наличие запасов на складах поставщиков и потребителей);
- общедоступный сегмент — включает контекстные данные из публичных источников (например, погода, происшествия на дорогах, ограничения в работе инфраструктуры из-за пандемии).

ЦДЦП включают два основных компонента: модуль моделирования и модуль оптимизации. Первый модуль отвечает за моделирование потока внутренних или внешних активностей участников ЦП. Оптимизационный модуль позволяет тестировать стратегии, выявлять и устранять узкие места в отдельных звеньях ЦП. При этом ЦДЦП должен быть источником достоверной и актуальной информации, чтобы создавать доверенную среду взаимодействия участников ЦП [12]. Поэтому важной задачей создания «двойников» является обеспечение надежной фиксации сведений о совершаемых действиях и выполняемых процессах всех участников ЦП. Для этих целей широко применяется технология «Блокчейн» (Blockchain, цепочка блоков), которая является разновидностью «Технологии распределенного реестра» (Distributed Ledger Technology, DLT). В [1; 15; 17; 18], рассмотрены технологические особенности фиксации транзакцией в виде распределенного реестра блоков. Данная технология совмещает надежность защиты и обеспечивает доступность информации для всех участников ЦП.

Прототипом ЦДЦП являются так называемые «диспетчерские вышки» (ДВ) цепей поставок (Supply Chain

Control Tower), которые по сути являются информационными системами, интегрирующими информационные потоки от участников ЦП для реагирования на отклонения и сбои в работе в режиме реального времени [4]. Основная задача диспетчерских вышек цепей поставок (ДВЦП) заключается в обеспечении «сквозной видимости» процессов во всех звеньях ЦП (end-to-end supply chain visibility). Выделяют различные типы ДВЦП. Например, ДВ транспортных процессов, которые генерируют уведомления об отправке, сообщают о доставке, соблюдении сроков, условий перевозки и пр.; ДВ процессов управления запасами — контролируют в режиме реального времени фактический уровень запасов, прогнозируют дефицит товаров. Однако такие ДВ не создают целостную модель ЦП как единой системы многочисленных логистических звеньев, в каждом из которых осуществляется обслуживание множества «Заказов». При этом участники ЦП интересуют процессы не сами по себе (например, как соблюдаются графики перевозки или производства), а то как они влияют или могут повлиять на выполнение «Заказов» их клиентов. Поэтому все участники ЦП (производитель, субпоставщик и пр.) заинтересованы в прослеживании состояний «Заказов» и понимании воздействия различных факторов на результативность (затраты, сроки, качество и пр.) исполнения каждого «Заказа» в отдельности.

Для организации такой прослеживаемости «Заказов» следует определять соотношения между информационными потоками о «Заказах» и бизнес-процессами, связанными с их выполнением. Все участники ЦП выполняют один или несколько бизнес-процессов (производственных, технологических, управленческих, обслуживающих и др.), параметры которых опосредованы «Заказами» других участников ЦП или непосредственных потребителей готовой продукции. Поэтому предлагается «Заказы» в ЦП разделять на два типа:

- «иницирующий (первичный) Заказ» — заявка на выполнение бизнес-процесса, которую Исполнитель получает от своего «потребителя» (участника ЦП, расположенного «ниже по течению»); заказ на поставку товара; заявка на перевозку заказанного товара или произведенной продукции. Для реализации «иницирующего Заказа» исполнитель планирует выполнение собственных бизнес-процессов, а также заказывает необходимые для них ресурсы (материалы, услуги и пр.), по сути инициируя новые заказы в других участниках ЦП;
- «связанный (последующий) Заказ» — заявка на выполнение бизнес-процесса, которую один участник ЦП направляет другим, расположенным «выше по течению» в ЦП. Формирование «связанного Заказа» и

его параметры опосредованы необходимостью выполнения и характеристиками «иницирующего Заказа». Иницирующие и связанные заказы содержат требования, под которыми понимаются ожидаемые количественные или качественные характеристики или свойства поставляемого ресурса (оказываемой услуги). Каждый «связанный Заказ» должен содержать атрибут, указывающий на принадлежность к «иницирующему Заказу». На основе таких атрибутов за каждым бизнес-процессом могут быть определены положение и отношения в сетевой структуре всех бизнес-процессов, реализуемых в ЦП.

С учетом приведенных соотношений процессов и заказов в ЦП предлагается следующая модель работы ЦДЦП. Во-первых, на основе моделей бизнес-процессов их ЦД отдельных участников ЦП проектируются модели агрегированных «сквозных цепочек» бизнес-процессов (СЦБП), которые организуются и выполняются участниками ЦП для реализации «иницирующих Заказов». Во-вторых, ЦДЦП осуществляет идентификацию состояний (контроль, прогноз) «иницирующих Заказов» на основе данных о состоянии СЦБП с учетом атрибутов «связанных Заказов». Сведения о состоянии бизнес-процессов, «связанных» и «иницирующих» заказах, доступны исполнителям, а также могут быть доступны заказчику, подключенному к ЦДЦП.

Модель СЦБП содержит информацию о составе и структуре входящих в такую цепочку бизнес-процессов, а также об их текущих состояниях (реализован, ожидает, отклонение и пр.). Для удобства пользователей проектирования СЦБП в ЦДЦП могут быть предусмотрены библиотеки типовых моделей СЦБП, например:

- модель СЦБП для регулярных поставок по долгосрочным контрактам (источники поставок, пункты назначения и способы транспортировки заранее определены, объемы и сроки могут незначительно корректироваться);
- модель СЦБП для периодических поставок с вариативными параметрами (источники поставок и пункты назначения заранее определены, сроки, объемы и способы транспортировки определяются по заданным алгоритмам на основе текущих данных);
- модель СЦБП для неплановых поставок по разовым заявкам (объемы, сроки, пункты назначения, способы транспортировки заранее не определены, требуется выработка оптимальных логистических решений).

Спроектированные таким образом ЦДЦП будут способны:

- отображать состояние активов участников ЦП (доступность транспортных средств, объектов инфраструктуры, персонала и пр.);

- вести мониторинг транзакций и корректировку бизнес-процессов в режиме реального времени с учетом рисков;

- разрабатывать новые способы доставки и др.

Для создания ЦДЦП рекомендуется использовать программно-технологические платформы (Platform as a Service, PaaS), которые предоставляют среду для разработки и развертывания облачных приложений, обеспечивающих сбор, обработку и анализ данных. В [13] рассмотрены особенности создания ЦДЦП в виде облачного сервиса для проектирования многоструктурных ЦП и управления динамикой процессов их участников. Программно-технологические платформы для ЦДЦП содержат типовые средства:

- управления программным обеспечением компьютерного моделирования;
- управления бизнес-процессами участников ЦП;
- сбора, обработки, анализа, визуализации, каталогизации, хранения, передачи компьютерных моделей и результатов компьютерного моделирования;
- фиксации изменений технологических решений, модификации компьютерных моделей, вариантов конфигураций СЦБП в цепи поставок;
- оформления результатов;
- защиты данных и организации совместной работы участников ЦП в соответствии с правами доступа;
- компьютерного моделирования для планирования оптимальных параметров ЦП.

Дополнительно ЦДЦП может оснащаться специализированным инструментарием для организации взаимодействия с определенными типами оборудования, программного обеспечения или устройств. Например, платформой искусственного интеллекта (AI PaaS); интеграционной платформой (iPaaS); коммуникационной платформой (сPaaS); мобильной платформой (mPaaS). Кроме того, в ЦДЦП должны быть предусмотрены процедуры обратной связи [10;11], чтобы:

- учитывать влияние внешних и внутренних факторов на способность участников ЦП достигать намеченных результатов (создавать продукцию и оказывать услуги, отвечающие требованиям заказчиков);

- проводить мониторинг информации о динамике внешних и внутренних факторов, приводящих к нежелательным несоответствиям;

- производить измерение и оценку соответствия достигнутых результатов деятельности участников ЦП плановым показателям;

- предусматривать выработку мер по предотвращению потенциальных несоответствий и корректировку плановых показателей.

Заключение

Для эффективного решения стратегических задач развития транспортной системы страны необходимо обеспечить масштабную цифровизацию отрасли, которая коснется физических и организационных компонентов системы. Применение цифровых технологий на физическом уровне (в транспортных средствах и инфраструктурных объектах) обеспечит повышение эффективности и безопасности перевозочного процесса, а внедрение цифровых сервисов на организационном уровне позволит упростить взаимодействие клиентов, бизнеса и государственных органов. Вместе с тем, интеграция цифровых решений на физическом и организационном уровнях создаст основу для автоматизации бизнес-процессов всех участников рынка транспортно-логистических услуг, что повысит устойчивость их деятельности и снизит риски в сфере транспортной безопасности.

Поэтому при создании ЦДЦП целесообразно предусмотреть возможность интеграции таких платформ с государственными информационными системами. Это позволит участникам ЦП получать необходимые государственные и коммерческие сервисы и обмениваться юридически значимыми данными друг с другом и с органами исполнительной власти в цифровом формате. Например, взаимодействие ЦДЦП с государственной информационной системой «Электронные перевозочные документы» позволит участникам ЦП оформлять перевозочные и сопроводительные документы для всех видов транспорта, в том числе мультимодальные перевозочные документы, в электронном виде.



Литература

1. Ларин, О.Н. Модель взаимодействия блокчейн-платформ для логистических экосистем / О.Н. Ларин. — Текст: непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. — 2021. — №9. — С. 26–29.
2. Онтологии киберфизических систем национального цифрового двойника Великобритании и BIM на примерах умных городов, железных дорог и других проектов / В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот, А.А. Климов [и др.]. — Текст: непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. — 2021. — Т.9, №3. — С. 91–130.
3. Рахманов, М.Л. Современные цифровые технологии и цифровой двойник / М.Л. Рахманов, А.В. Шишкин. — Текст: непосредственный // Качество и жизнь. — 2021. — №2 (30). — С. 57–59.

4. Сергеев, В. Проблема видимости цепи поставок и использование концепции Supply Chain Control Tower / В. Сергеев, И. Сергеев, К. Хлобыстова. – Текст: непосредственный // Логистика. – 2020. – №3 (160). – С. 35–43.
5. Цифровая железная дорога - ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники / В.П. Куприяновский, В.В. Аленков, А.А. Климов [и др.]. – Текст: непосредственный // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т.13, №3. – С. 129–166.
6. Цифровая трансформация системы планирования на основе цифрового двойника / Е.А. Яковлева, И.А. Толочко, А.А. Ким, А.А. Черняева. – DOI 10.18334/sc.15.7.112351. – Текст: непосредственный // Креативная экономика. – 2021. – Т.15, №7. – С. 2811–2826.
7. Цифровые двойники и системы дискретно-событийного моделирования / Д.Е. Намиот, О.Н. Покусаев, В.П. Куприяновский, М.Г. Жабицкий. – Текст: непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т.9, №2. – С. 70–75.
8. A Digital Twin Framework for Business Transactional Processes in Supply Chains. Editor(s): Metin Türkay, Rafiqul Gani / Hector D. Perez, Satyajith Amaran, Esra Erisen, John M. Wassick, Ignacio E. Grossmann. – DOI 10.1016/B978-0-323-88506-5.50272-2. – Текст: непосредственный // Computer Aided Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 50. – Pp. 1755–1760.
9. Azevedo, S.G. Influence of Green and Lean Upstream Supply Chain Management Practices on Business Sustainability / S.G. Azevedo, H. Carvalho, S. Duarte and V. Cruz-Machado. – DOI 10.1109/TEM.2012.2189108. – Текст: непосредственный // IEEE Transactions on Engineering Management. 2012. – vol. 59. – №.4. – Pp. 753–765.
10. Cheng, Y. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey. / Y. Cheng, Y. Zhang, P. Ji [et al.] – DOI 10.1007/s00170-018-2001-2. – Текст: непосредственный // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – №97. – Pp. 1209–1221.
11. Ding, K. Defining a Digital Twin-based Cyber-Physical Production System for autonomous manufacturing in smart shop floors / K. Ding, F. T.S. Chan, X. Zhang [et al.]. – DOI: 10.1080/00207543.2019.1566-661. – Текст: непосредственный // International Journal of Production Research. – 2019. – №57(20). – Pp. 6315–6334.
12. Ivanov, D. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0 / D. Ivanov, A. Dolgui. – DOI 10.1080/09537287.2020.1768450. – Текст: непосредственный // Production Planning & Control. – 2021. – №32(9). – Pp. 775–788.
13. Ivanov, D. Cloud supply chain: Integrating Industry 4.0 and digital platforms in the «Supply Chain-as-a-Service» / D. Ivanov, A. Dolgui, B. Sokolov. – DOI 10.1016/j.tre.2022.102676. – Текст: непосредственный // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2022. – Vol. 160. – Pp. 102676.
14. Kamble, S. Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends, future perspectives, and an implementation framework / S. Kamble, A. Gunasekaran, H. Parekh [et al.]. – DOI 10.1016/j.techfore.2021.121448. – Текст: непосредственный // Technological Forecasting and Social Change. – 2022. – Vol. 176. – 121448.
15. Quantum Machine Learning for 6G Communication Networks: State-of-the-Art and Vision for the Future / S. J. Nawaz, S. K. Sharma, S. Wyne, M. N. Patwary, M. Asaduzzaman. – DOI 10.1109/ACCESS.2019.2909490. – Текст: непосредственный // IEEE. – 2019. – Vol. 7. – Pp. 46317–46350.
16. Ruiz-Benítez, R. The lean and resilient management of the supply chain and its impact on performance / Rocío Ruiz-Benítez, Cristina López, Juan C. Real. – DOI 10.1016/j.ijpe.2018.06.009. – Текст: непосредственный // International Journal of Production Economics. – 2018. – Vol. 203. – Pp. 190–202.
17. Tiep, N. Knowledge mapping of digital twin and physical internet in Supply Chain Management: A systematic literature review / N. Tiep, H. D. Quang, V. N. Truong, Zh. You, Zh. Li. – DOI 10.1016/j.ijpe.2021.108381. – Текст: непосредственный // International Journal of Production Economics. – 2022. – Vol. 244. – Pp. 108381.
18. Transportation and logistics trends 2019 // Part of PwC's 22nd CEO Survey trend series. – Текст: непосредственный. – 2019. – 11 p.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА

Рассматриваются и анализируются возможности повышения надежности элементов тормозной системы электроподвижного состава метрополитена, в частности за счет усовершенствования блока тормозных резисторов. Обосновывается вариант снижения температуры его нагрева в процессе эксплуатации.



Д.Г. Евсеев

Ключевые слова: системы торможения, пневматическое торможение, электрическое торможение, электропневматическое торможение

EDN: GQARAO

Для поддержания высокого уровня безопасности и комфортности передвижения пассажиров метрополитена все структурные единицы электроподвижного состава должны работать в штатном режиме. Одним из ключевых и важных требований является бесперебойная работа систем торможения и входящих в них тормозного оборудования, обеспеченного высокотехнологичными и безотказными системами торможения для осуществления полной остановки состава с обеспечением безопасности пассажиров.

На сегодняшний день для осуществления торможения электроподвижного состава используются следующие способы торможения: пневматическое, электрическое, электропневматическое. В зависи-

мости от ситуации, машинистом электроподвижного состава используется определенный способ торможения, исключающий возможность возникновения чрезвычайной ситуации.

В реальности чаще используется электрическое (рабочее) торможение вследствие удобства его применения, которое осуществляется при перемещении контроллера машиниста в положение «тормоз» (на себя). Данный способ торможения обеспечивает плавную остановку электроподвижного состава, что повышает комфортность перевозок пассажиров метрополитена. Данный способ торможения осуществляется с помощью блока тормозных резисторов БТР-12Д, входящего в комплект оборудования асинхронного тягового привода, который используется для гашения

Евсеев Дмитрий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)), Заслуженный деятель науки РФ, научный руководитель – координатор Программы «Формирование и развитие высокоскоростного амфибийного транспорта в России». Область научных интересов: транспортное машиностроение, технология производства и ремонта различных видов подвижного состава. Автор более 250 научных работ, в том числе трех учебников, пяти монографий. Имеет более 40 патентов и авторских свидетельств на изобретения.

Уткин Алексей Сергеевич, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: транспортное машиностроение.

вырабатываемой энергии, генерируемой двигателем при торможении вагона в реостатном режиме, преобразовывая ее в тепловую энергию, рассеиваемую в окружающем пространстве. Режим работы блока БТР-12Д периодический—кратковременный, номинальное напряжение питания составляет 920 В (разрешенный диапазон напряжения питания составляет от 550 до 975 В), род тока — постоянный, блок включает в себя следующие устройства:

- три блока резисторов;
- металлический корпус;
- клеммная коробка.

Принцип работы заключается в защите двигателя от перегрузок, а также поглощении и рассеивании электроэнергии при реостатном торможении, при котором кинетическая энергия электропоезда тяговыми электродвигателями в генераторном режиме преобразуется в электрическую энергию. Далее электроэнергия подается на тормозной резистор, где преобразуется и рассеивается в виде тепла. Изменение тормозного усилия осуществляется за счет изменения длительности импульса подачи тока на тормозной резистор.

При этом с уменьшением импульса подачи тока тормозное усилие уменьшается, а с увеличением импульса соответственно увеличивается и тормозное усилие. Данный способ торможения широко используется на практике машинистами электроподвижного состава, так как позволяет осуществить более плавное торможение в отличие от пневматического и электропневматического методов торможения. При движении электроподвижного состава на линиях метрополитена при следовании по перегонам (часть линии метрополитена, расположенная между смеж-

ными станциями) машинистам для соблюдения скоростного режима задаваемой частотой передаваемой с устройств сигнализации централизации и блокировки требуется осуществлять неполное торможение состава с помощью блока БТР-12Д (рис. 1).

Вследствие активного использования блока БТР-12Д, его внутренние комплектующие достигают высоких температур, что приводит к подгару и оплавлению кронштейнов крепления резистивных групп, токопроводящих шин и деформации (выгибанию) резистивных элементов.

При данных несоответствиях эксплуатация электроподвижного состава запрещена, что приводит к внеплановым ремонтам, нарушении графика движения на линиях метрополитена и выплатам штрафных санкций.

В ходе изучения тормозных систем электроподвижного состава выявлено, что наиболее используемая электрическая система торможения имеет свои недостатки в части термических перегрузок резистивных элементов блока тормозных резисторов в связи с недостаточной теплоотдачей перерабатываемой энергии тяговых электродвигателей в окружающую среду.

Для увлечения срока работоспособности и работоспособности блока тормозных резисторов, установленных на электроподвижном составе, необходимо выполнить модернизацию системы теплоотвода. Улучшение системы теплоотвода можно выполнить следующим образом.

Для осуществления поставленной задачи заднюю стенку, имеющую тепловой экран, необходимо изменить в части добавления на ней сквозных охлаждающих отверстий, которые выполнены на передней и боковых стенках. Таким образом, при движении подвижного состава потоки встречного воздуха будут проходить сквозь блок тормозных резисторов независимо от направления движения (рис. 2, 3).

Для наглядности эффективности использования изменения предложенной конструкции произведем расчет выделяемой тепловой энергии. В ходе исследования были взяты следующие данные.

Значение сопротивления резистивных элементов в период эксплуатации $R=0,52$ [Ом].

Время использования блока тормозных резисторов $t=30$ [с].

Значение сила тока $I=1100$ [А].

Масса блока $m=300$ [кг].

В ходе расчетов изначально произведен расчет выделяемой тепловой энергии без учета искусственного охлаждения, данное количество теплоты вырабатывается при движении подвижного состава когда

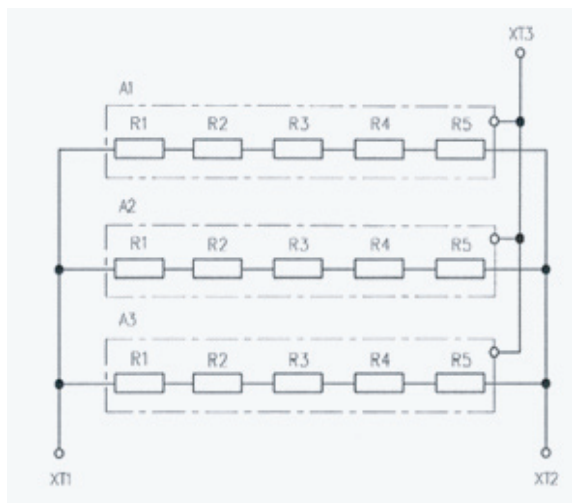


Рис. 1. Электрическая схема блока БТР-12Д

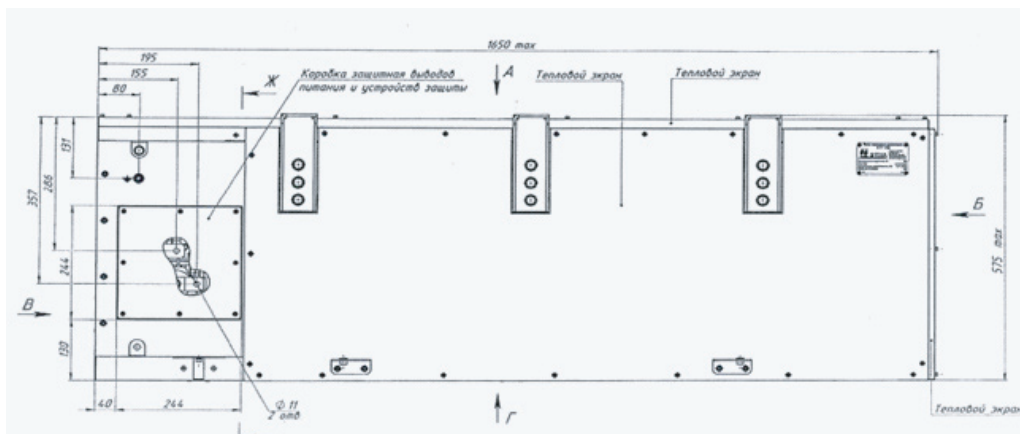


Рис. 2. Задняя стенка блока БТР-12 Д без дополнительной вентиляции

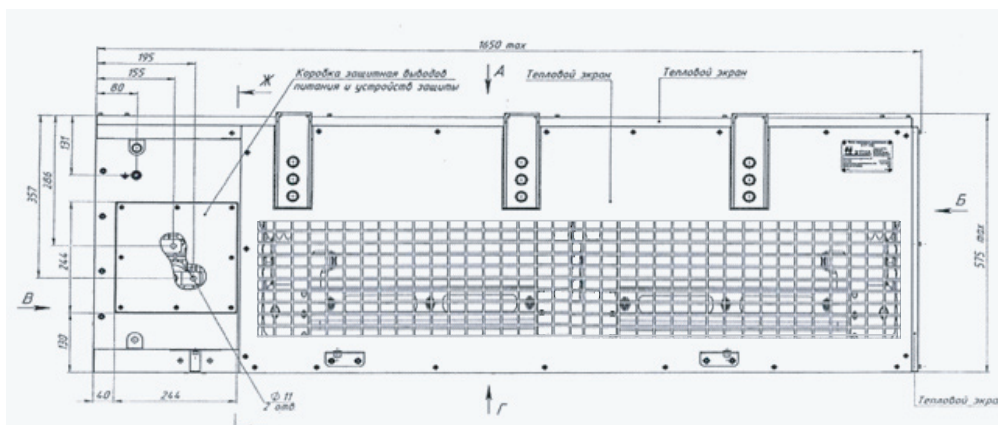


Рис. 3. Задняя стенка блока БТР-12 Д с дополнительной вентиляцией

блок тормозных резисторов практически не охлаждается.

Производимый расчет осуществляется на основе закона Джоуля-Ленца, описывающего явление превращения электрической энергии в тепловую:

$$Q = Pt, \quad (1)$$

где P — активная мощность блока БТР-12 Д; t — время эксплуатации блока БТР-12Д.

Для произведения расчетов согласно (1) произведем расчет вырабатываемой активной мощности по следующей формуле:

$$P = I^2 R = 1100^2 \cdot 0.52 = 629,2 \text{ [кВт]}. \quad (2)$$

Следующим шагом, подставив данные из формулы (2) в формулу (1) для нахождения вырабатываемого количества тепловой энергии, получим

$$Q = Pt = 629200 \cdot 30 = 18,9 \text{ [МДж]}. \quad (3)$$

При движении состава при условии подачи встречного воздуха в отверстия в стенках корпуса исследуемого блока, т.е. движение электроподвижного состава с осуществлением искусственного охлаждения, количество выделяемой тепловой энергии составляет:

$$Q = cm(T_2 - T_1) = 549 \cdot 300 \cdot (150 - 100) = 8,3 \text{ [МДж]}. \quad (4)$$

Данные температуры взяты из опытных данных при эксплуатации блока с заводской конструкцией. В ходе дальнейшего исследования при видоизмененной конструкции значения температур уменьшились, что существенно снизило количество вырабатываемой тепловой энергии.

$$Q = cm(T_2 - T_1) = 549 \cdot 300 \cdot (100 - 70) = 4,9 \text{ [МДж]}. \quad (5)$$

Следовательно, путем изменения конструкции блока тормозных резисторов повышается способность рассеивания выработанной тепловой энергии на резистивных элементах в окружающую среду.

Вывод

Корректировка конструкции блока тормозных резисторов путем добавления на заднюю стенку сквозных охлаждающих отверстий, которые установлены на передней и боковой стенках, привела к тому, что при движении электроподвижного состава потоки встречного воздуха будут проходить сквозь блок тормозных резисторов независимо от направления движения, что обеспечивает снижение риска перегрева и оплавления внутренних комплектующих блока и повышает надежность функционирования тормозной системы. 

Литература

1. Основы электротехники и электроники: учебник для высшего профессионального образования / В.Т. Еременко, А.А. Рабочий, А.П. Фисун, И.И. Невров, А.В. Тютякин, А.Е. Георгиевский; Под общ. ред. В.Т. Еременко. — Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», 2012. — 529 с. — Текст: непосредственный.
2. Теплотехника: учебник для вузов / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт [и др.]; Под ред. А.П. Баскакова. — 2-е изд., перераб. — Москва: Энергоатомиздат, 1991. — 224 с. — Текст: непосредственный.
3. Правила устройств электроустановок: все действующие разделы 6 и 7 изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2015 г. — М.: КНОРУС. — 488 с. — Текст: непосредственный.

ОПТИМАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ПУТЕВОГО РАЗВИТИЯ СТАНЦИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ИНТЕРВАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

В настоящее время все больше уделяется внимание цифровизации организации и управления движением поездов. В статье рассматривается метод внедрения интервального регулирования движения поездов на участках с учетом количества и емкости путевого развития промежуточных и технических станций железнодорожного участка.

Ключевые слова: цифровизация, имитационное моделирование, система интервального регулирования, путевое развитие

EDN: MTLMNA



М.В. Фуфачева



Е.М. Лыткина

В настоящее время цифровизация железнодорожного транспорта набирает большие обороты, и эта тенденция должна благоприятно сказываться на развитии, а главное, на безопасности перевозочного процесса. Данный процесс направлен на выполнение одной из задач, которую должен решать любой транспорт — удовлетворение потребности в перевозках.

Развитию интеллектуальных систем, в том числе с использованием искусственного интеллекта на современном уровне способствуют ранее созданные автоматизированные системы управления перевозочным процессом.

В сложившейся обстановке и нарушением логистических связей между Россией и западной Европой по перевозке грузов, происходит переориентация грузопотоков на восточное и азиатское направления. Следовательно, планируется увеличение поездопотоков на восток. В связи с этим необходимо рассма-

тривать дополнительное увеличение пропускной и провозной способности участков, которые к этому времени вполне справлялись с заданным потоком.

Одной из прогрессивной мерой по увеличению пропускной способности участка, на сегодняшний день, является технология интервального регулирования движения поездов с безопасным минимальным интервалом между попутно следующими поездами.

Для реализации вышеописанного мероприятия создана цифровая многоуровневая система комплексного автоматизированного управления и обеспечения безопасного движения поездов.

Интервальное регулирование движения должно обеспечиваться непрерывным определением величины интервала между поездами, следующим в попутном направлении.

Существующие системы регулирования интервалов способны выполнять координирование поезда, но возникает проблема с обеспечением высокой точно-

Фуфачева Марина Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация железных дорог» Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (КРИЖТ ИрГУПС). Область научных интересов: организация и управление процессами перевозок. Автор 55 научных работ, в том числе одной монографии и 25 учебных изданий.

Лыткина Екатерина Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация железных дорог» Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (КРИЖТ ИрГУПС). Область научных интересов: зональная система повышения надежности тягового подвижного состава. Автор 72 научных работ, в том числе одной монографии. Имеет шесть патентов РФ.

сти передачи информации о занятости пути на поезд, следующий за предыдущим поездом.

На Красноярской железной дороге пилотным полигоном, где внедряется система интервального регулирования, является так называемый «южный ход», где поездопоток, по сравнению с главным ходом, не значительный, но в перспективе планируется увеличение объемов перевозок именно по этому направлению, что потребует увеличения пропускной способности.

Подробно о системе регулирования движения поездов интервалами изложено в [1;2].

Одним из уровней этой системы является линейный (станционный) уровень, который отвечает за автоматическое построение маршрутов поездов по станции и регулировку интервалов между поездами, и верхний уровень, который обеспечивает построение графика движения поездов и контролирует его выполнение, решает конфликтные ситуации и в автоматическом режиме передает команды на автоматический режим ведения поезда в кабину машиниста. Это возможно только при установке в локомотиве приемников навигационной системы ГЛОНАСС во всех поездах, движение которых будет осуществляться по системе интервального регулирования.

Большое количество факторов необходимо учитывать при внедрении интервального движения поездов с использованием множества интеллектуальных систем, которые позволяют внедрить и освоить эту технологию. Эти системы включают в себя несколько самостоятельных подсистем, например, интеллектуальный поезд, станции и т.д., функционирующие в едином комплексе.

Станции являются основным элементом в организации и управлении перевозочным процессом. Поэтому внедрение системы интервального регулирования движения поездов в первую очередь скажется на технологии работы станций, качественных и количественных показателях их работы.

Без сомнения, одним из основных звеньев цифровизации железнодорожного транспорта является моделирование работы участков и станций по пропуску грузовых и пассажирских поездов с определением необходимой пропускной способности. Моделирование все больше становится неотделимой частью проектирования инфраструктуры транспорта [3].

Для создания и эффективной работы имитационной модели необходимо иметь полную и точную информацию о состоянии и мощности инфраструктуры и, в первую очередь, путевого развития станций, объема и структуры поездопотока.

Одним из основных элементов инфраструктуры является путевое развитие отдельных пунктов —

количество и вместимость приемоотправочных путей. Причем это характерно не только для технических станций, но и для промежуточных.

При движении поездов по участку в определенный момент возникает необходимость обгонять менее скорые поезда более скорыми, выполнять остановки составов для ожидания открытия перегона после выполнения работ в «окна», а также производить скрещения поездов на однопутных участках. Это, как правило, происходит на промежуточных станциях, разъездах или обгонных пунктах, поэтому следует иметь по факту минимальное число приемоотправочных путей достаточной вместимости.

В настоящее время большое внимание уделяется реконструкции станций, в частности, увеличению вместимости путевого развития. Но все же на большинстве отдельных пунктов с момента их постройки не выполнялась реконструкция по развитию путей. Причем на некоторых промежуточных станциях вместимость путей осталась на уровне не более 60 условных вагонов.

В технологическом процессе работы участковых и сортировочных станций главными операциями являются переработка составов и обработка транзитных поездов. Если учитывать рост длины грузовых поездов, то удлинение касается практически всех станционных путей, включая сортировочные.

Как правило, отдельные пункты с большим путевым развитием расположены в крупных промышленных центрах и узлах, которые имеют разные гидрогеографические условия, а также разное количество обработки вагонопотоков.

Схема реконструкции отдельного пункта зависит от станционной площадки, размер которой существенно зависит от условий застроенных (урбанизированных) территорий. На имеющихся отдельных пунктах не представляется возможным выполнить необходимую реконструкцию, что препятствует увеличению длины горловин и всей станции в сторону прилегающих участков, в особенности если станция ограничивается наибольшим затяжным подъемом.

Огромное значение на схему реконструкции оказывают существующие радиусы горизонтальных кривых и элементы профиля станционной площадки. Особенно это актуально на участках с пересеченной местностью.

Так как мероприятия по увеличению и удлинению путей в основном влекут за собой укладку дополнительных стрелочных переводов, а также прямых вставок, увеличивается длина реконструируемой горловины, вследствие чего реконструкция станций усложняется.

При проектировании схем реконструкции станций нужно индивидуально подходить к наилучшему использованию уже имеющихся устройств и гарантированно минимизировать проблемы при выполнении технологического процесса работы станции в период реконструкции. Необходимо предусматривать устройство и перенос не только земляного полотна и верхнего строения пути, но и большого количества наземных и подземных коммуникаций.

В большинстве случаев производство строительных работ по реконструкции станций связано с изменением существующего путевого развития и других устройств, с перекладкой путей и горловин. Эти работы еще более усложняются, когда требуется устанавливать дополнительные устройства СЦБ, контактную линию электропередачи и т.д. Учитывая специфику выполнения работ на станции, необходимо специальным для данной станции способом проработать процесс строительства, незначительно нарушающий обычную технологию работы отдельного пункта и безопасность движения поездов.

Непростая технологическая система всех отдельных пунктов, многочисленные параметры оценки их схем вызывают противоречия в стандартных приемах выбора оптимальных и эффективных схемных решений реконструкции.

Основными оценками эксплуатационной работы станций считаются задержки вагонов в ожидании каких-либо операций, маршрутная скорость, интервалы прибытия и отправления, мощность поездопотока, его структура, количество вагонов в составе и масса поездов. Разработка схемы отдельных пунктов для реконструкции нацелена, главным образом, на повышение использования имеющихся устройств и улучшение технологического процесса работы не только станции, но и прилегающих участков. Также основной целью применения реконструкционных мероприятий на станции является повышение пропускной способности всего участка.

Для участковых и сортировочных станций программа реконструкционных мероприятий может состоять не только в увеличении емкости путей, но и реализации следующих схемных решений:

- повышение количества путей;
- увеличение маневренности горловин, путем улучшения ее конструкции;
- реконструкция горки;
- укладка еще одного пути надвига;
- строительство путепроводных развязок на прилегающих к станции участках.

Каждый отдельный пункт — это непростая структура, включающая множество элементов.

Технологической основой оптимальной и эффективной работы станции является расположение этих элементов в виде определенной схемы. Разнообразные комбинации элементов устанавливают основополагающие схемные решения. Для удобства разработки схемных решений нескольких вариантов реконструкции предлагается применять классификатор реконструктивных действий отдельных пунктов, как промежуточных, так и технических, в виде граф-схем «И — ИЛИ ДЕРЕВО» (рис. 1, 2).

Указанные схемы не допустят рассмотрения неприемлемых и неэффективных схем отдельных пунктов, что позволит систематизировать технологические решения по реконструкции станции по их сложности.

После разработки нескольких приемлемых вариантов реконструкции отдельных пунктов необходимо провести имитационное моделирование технологии работы станции при всех выбранных вариантах схемных решений.

Технологический процесс работы любой станции разделяется на простейшие сегменты, которые представляют в некоторой степени заверченный элемент процесса. Процесс исполнения операций, отличающихся по форме и виду работы и совокупности технических устройств, сводится к следующему: рассмотреть условия введения в первую очередь на обслуживание, найти место операции в оперативной очереди в зависимости от уровня срочности и момента ее поступления, обеспечить включение в оперативную очередь, гарантировать выполнение операции.

Все элементы и сегменты необходимо увязать между собой в виде логического порядка для выполнения графика движения поездов по приему, отправлению и пропуску по участку. В этом логическом порядке прописываются условия, при которых после одной операции следует другая. Условия указываются путем проверки вместимости главных и приемоотправочных путей.

При реализации системы интервального движения поездов время отправления составов определяется появлением заявки на отправление при свободном участке пути на перегоне, длина которого будет соответствовать длине поезда и с учетом информации о местоположении идущего впереди поезда в виде координат.

Неритмичность работы железнодорожных участков, а, следовательно и станций по работе с поездопотоками подчиняется биномиальному и показательному законам распределения [4].

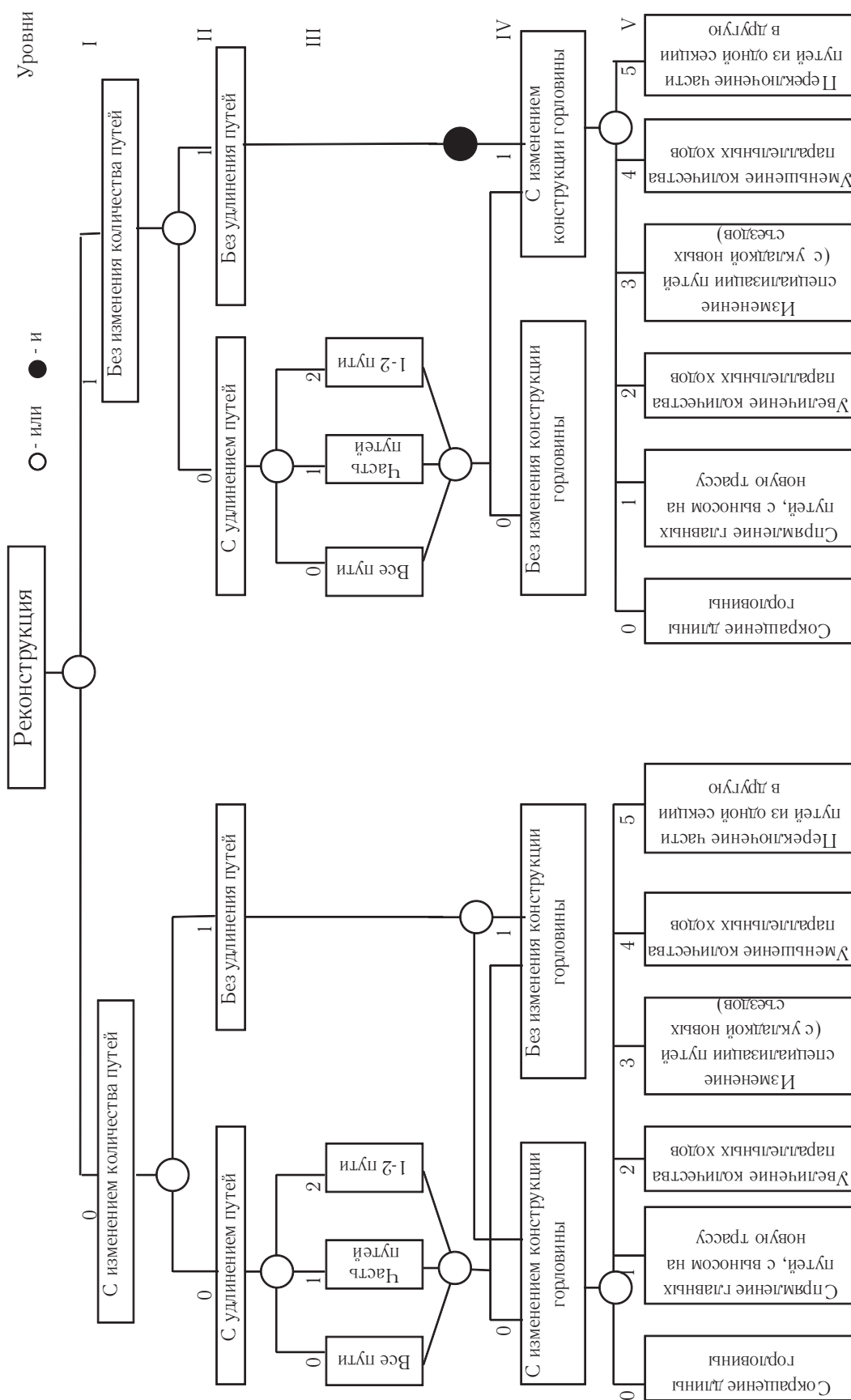


Рис. 1. Дерево реконструкционных мероприятий промежуточных станций

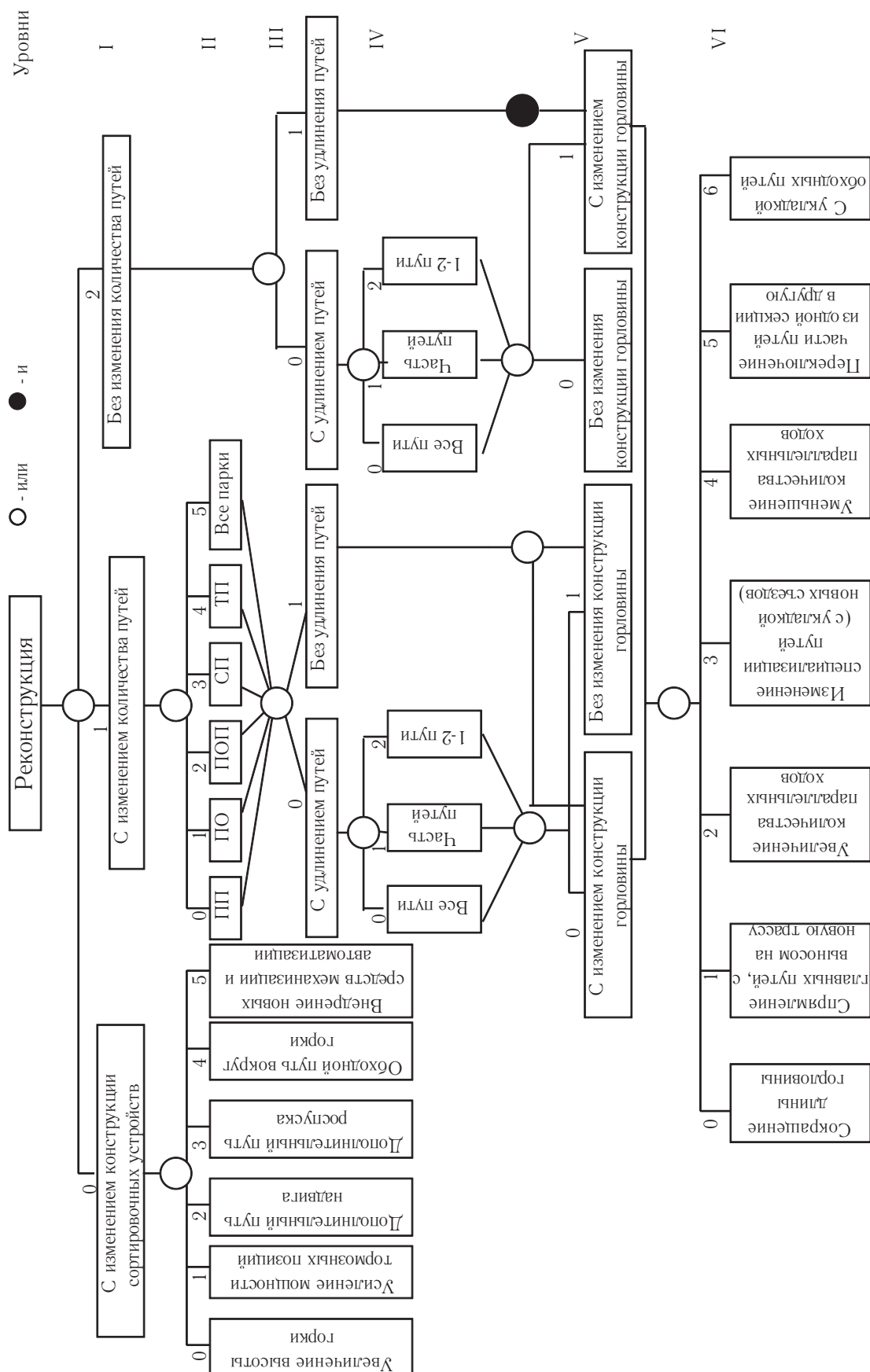


Рис. 2. Дерево реконструкционных мероприятий технических станций

Выводы

Для полноценного внедрения системы интервального движения поездов необходимо в первую очередь оснастить все локомотивы системами передачи данных по радиоканалу и контроля «хвоста» поезда.

Следует обращать внимание на реконструкцию станций по увеличению количества и емкости путей именно на тех участках и линиях, где в первую очередь внедряется интервальное движение.

Необходимо выбирать оптимальные и эффективные схемы реконструкций с помощью имитационного моделирования, с обязательным участием в модели работы прилегающих участков и вариантных графиков движения поездов.



Литература

1. Новикова, О.О. Использование технологии ГЛОНАСС для интервального регулирования движения поездов / О.О. Новикова. — Текст: непосредственный // Сборник материалов конференции «Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке». — Хабаровск: ДВГУПС. — 2018. — Т.2. — С. 96-100.
2. Инновационные технологии интервального регулирования — основа системы управления движением на МЦК / И.Н. Розенберг, В.Г. Матюхин, А.Б. Шабунин, Б.И. Уманский. — Текст: непосредственный. // Автоматика, связь, информатика. — 2019. — №6. — С. 5-10.
3. Розенберг, Е.Н. Глобальные тренды развития интеллектуальных транспортных систем / Е.Н. Розенберг, А.С. Коровин. — Текст: непосредственный // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — №12. — С. 14-19.
4. Фуфачева, М.В. Законы распределения некоторых параметров при организации движения поездов / М.В. Фуфачева. — Текст: непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2021. — №3 (51). — С. 27-39.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА С УЧЕТОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАЕКТОРИИ

Получено распределение случайного отклонения от графика при прибытии поезда на конечную станцию. При этом используется однопоездная стохастическая модель движения поезда, введенная авторами в статье 2020 г. Найденное распределение имеет интегральную форму, зависит от совместного распределения отклонения при отправлении с предпоследней станции и времени хода по последнему перегону.

Ключевые слова: стохастическая модель, отклонение от графика, распределение опоздания, критерий согласия

EDN: FKQESL



Б.И. Давыдов



В.И. Чеботарев

Нарушения графика движения возникают вследствие воздействия случайных факторов, в первую очередь, технических и технологических отказов. Оперативное диспетчерское управление корректирует траектории движения поездов с целью минимизации отклонений. Любое регулировочное решение основывается на прогностической модели, которую выстраивает диспетчер. В условиях интенсивного движения эти решения могут быть далекими от оптимальности, если модель недостаточно обоснована и имеется недостаток исходных данных.

Процесс текущего перепланирования обычно основывается на фиксированных координатных данных, состоянии инфраструктуры и на предположении об их неизменности в предстоящем периоде. Задача прогнозирования результатов диспетчерских действий при этом носит детерминированный характер. Отсутствие точного знания о будущих препятствиях движению поездов часто приводит к ошибкам в определении отклонений от графика и, соответственно, к малоэффективным регулировкам. Как результат, более 2% пассажирских и 43% грузовых поездов прибывают по назначению с нарушениями расписания (согласно

Давыдов Борис Исаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Дальневосточного государственного университета путей сообщения. Область научных интересов: проблемы управления в транспортной отрасли; моделирование транспортных объектов и процессов. Автор 109 научных работ, в том числе одной монографии. Имеет шесть патентов на изобретения.

Чеботарев Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН. Область научных интересов: теория вероятностей и ее применения. Автор 76 научных работ, в том числе одной монографии и трех учебников.

Каблукова Ксения Сергеевна, младший научный сотрудник Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН. Область научных интересов: математическое моделирование, вычислительная математика. Автор 18 научных работ, в том числе одной монографии.

Пазойский Юрий Ошарович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Железнодорожные станции и транспортные узлы» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)), Почётный работник транспорта Российской Федерации, Почётный железнодорожник. Область научных интересов: пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте, совершенствование работы станционных процессов. Автор 176 научных работ, в том числе четырех монографий и трех учебников.

официальной статистике ОАО «РЖД») — несмотря на резервы времени, заложенные в график и усилия диспетчерского персонала.

Показано [1], что при интенсивном движении подход, учитывающий фиксированные интервалы выполнения операций (равномерного хода, ускорений, остановок), дает ошибки прогнозных оценок моментов прибытия в горизонте трех часов, превышающие 5 мин. В реальной обстановке точность прогноза еще ниже, так как текущая информация о движении отягощена случайными погрешностями и, кроме того, нередко запаздывает. Обширный круг литературных источников (см., например, [2–4]) подтверждает, что использование вероятностного подхода при формировании траекторий движения поездов позволяет значительно (на порядок и более) ускорить процесс выработки прогноза и повысить его эффективность.

Предлагаемая в работе стохастическая модель представляет траекторию движения поезда в виде цепи последовательных операций, каждая из которых характеризуется случайным моментом ее начала и продолжительностью. Распределения указанных величин определяются на основе статистических данных, полученных в предшествующие периоды времени. Рассчитывается распределение моментов прибытия на заданную станцию, которое используется для фиксации факта опоздания поезда и оценки эффективности мер по предотвращению межпоездных конфликтов.

При проведении расчета вероятностного распределения моментов прибытия во многих работах (например, [2; 5–7]) используется предположение о статистической независимости интервалов реализации элементарных операций. Это допущение позволяет при нахождении распределения отклонения моментов прибытия от графика ограничиться использованием техники сверток распределений [8, стр. 272].

Изучение статистических данных о реальном движении поездов показывает, что указанное предположение подтверждается далеко не всегда. Чтобы оценить масштаб распространения случаев статистической зависимости, в настоящей работе проводится исследование наличия корреляционной связи между операциями, реализуемыми в процессе движения. Предлагается метод расчета распределений моментов прибытия, который использует статистические данные о продолжительности операционных интервалов. Для проверки адекватности полученных распределений используется критерий Пирсона. Также обсуждается характер распределений времен хода и моментов прибытия, что полезно при качествен-

ной оценке дестабилизирующих влияний на процесс пропуска поездов. Результаты исследования могут быть использованы при решении задач по повышению уровня пунктуальности движения пассажирских поездов и эффективности пропуска потока по грузонапряженным направлениям железных дорог.

Обзор литературных источников

В [2] подчеркивается, что вид распределения моментов прибытия и его параметры зависят от отклонения от графика движения поезда в момент, когда вырабатывается прогноз и от текущей ситуации на впереди лежащих участках его маршрута. Вероятностный подход предполагает, что известен способ расчета распределения моментов прибытия на основе статистики, полученной путем анализа фактических отклонений от графика и прогноза будущих влияющих факторов. В основу методики расчета кладутся статистические связи выходного распределения с указанными факторами, которые должны быть известны до начала расчетной процедуры. Закономерности, которые используются при построении расчетной модели движения поездов, описываются в терминах теории марковских процессов [3] или байесовских сетей [4].

Отметим также работу [9], в которой рассматривается одна прогнозная задача, относящаяся к метрополитену. Более точно, в статье предлагается метод прогнозирования отклонения длительности остановки электропоезда метрополитена от плановой. Метод опирается на модель, которая, в свою очередь, основана на полиномах, являющихся наилучшими в смысле принципа наименьших квадратов приближениями к конечной последовательности фактических отклонений для поездов, которые уже проследовали через данную станцию.

Авторы также занимаются оценкой ошибки, возникающей при такой аппроксимации. В качестве погрешности они предлагают относительное среднеквадратическое отклонение разности прогнозного и фактического отклонений. Показывают, что погрешность аппроксимации выражается в терминах коэффициентов корреляции между указанными выше случайными отклонениями для предыдущих поездов. Однако для вычисления коэффициентов корреляции авторы не занимаются поиском распределений отклонений или совместных распределений пар отклонений. Вместо этого они берут два примера поведения коэффициентов корреляции и приводят таблицу соответствующих погрешностей при различных параметрах, от которых зависят примеры. Заметим, что в [9] не раскрывается, как указанные примеры связаны с реальностью.

Модель формирования распределения моментов прибытия поездов

Описание модели. Постановка задачи

Модель движения поезда представляется в виде последовательности операций движения и графических остановок на станциях, на которых производится высадка / посадка пассажиров или смена локомотива. Будем считать, что длительности операций имеют случайный характер. Предположим, что начальная станция отправления имеет номер 1, конечная станция — номер N . Мы будем пользоваться следующими обозначениями:

d_i — графиковый момент отправления со станции с номером i ;

a_i — графиковый момент прибытия на станцию i ;

δ_i — отклонение от графика при отправлении со станции i ;

ξ_i — отклонение от графика при прибытии на станцию i ;

$\rho_{i,i+1}$ — время хода от станции i до станции $i+1$;

τ_i — продолжительность стоянки на станции i .

Обращаем внимание читателя, что для обозначения случайных величин мы используем греческие буквы.

Рассматривается задача: найти распределение случайной величины ξ_N — величины отклонения от графика при прибытии на конечную станцию.

В основу настоящего исследования положен анализ статистики о фактическом движении контейнерных грузовых поездов в границах Восточного полигона РЖД, следующих по жесткому графику. Рассматривается процесс пропуска по пяти участкам, каждый протяженностью 250–400 км, ограниченным шестью техническими станциями (табл. 1). Соответственно здесь $1 \leq i \leq N=6$.

В рассматриваемом частном случае нас интересует распределение отклонения от графика при прибытии на станцию 6 (см. рис. 1), т.е. распределение случайной величины ξ_6 . Преодоление поездом участка между станциями 1 и 6 описывается следующей последовательностью случайных величин: $d_1 + \delta_1$ — момент отправления со станции 1; $\rho_{1,2}$ — время хода между станциями 1 и 2; τ_2 — время стоянки на станции 2; $\rho_{2,3}$ — время хода между станциями 2 и 3 и т.д.; $\rho_{5,6}$ — время хода между станциями 5 и 6; $a_6 + \xi_6$ — момент прибытия на станцию 6, т.е. последовательностью



Рис. 1. Схема движения поезда между станциями 1 и 6

$$(d_1 + \delta_1, \{\rho_{i,i+1} + \tau_{i+1}\}_{i=1}^4, \rho_{5,6}, a_6 + \xi_6).$$

Схема движения поезда между станциями 1 и 6 изображена на рис. 1.

О распределении случайной величины ξ_6

Учитывая рис. 1, легко понять, что

$$a_{i+1} + \xi_{i+1} - (d_i + \delta_i) = \rho_{i,i+1}$$

при $i = \overline{1,5}$, откуда

$$\xi_{i+1} = \delta_i + \rho_{i,i+1} + d_i - a_{i+1}, i = \overline{1,5}.$$

Таким образом,

$$\xi_6 = \delta_5 + \rho_{5,6} + d_5 - a_6. \quad (1)$$

Замечание 1. Формулу (1) можно получить иначе. Действительно, в силу нашей модели, изображенной на рис. 1,

$$a_6 + \xi_6 = d_1 + \delta_1 + \sum_{i=1}^4 (\rho_{i,i+1} + \tau_{i+1}) + \rho_{5,6}. \quad (1a)$$

Отсюда, учитывая очевидное равенство $\rho_{i,i+1} + \tau_{i+1} = d_{i+1} + \delta_{i+1} - (d_i + \delta_i)$, приходим к (1).

Формулы (1) и (1a) имеют место, когда номер N конечной станции равен 6. Аналогичные формулы справедливы при любом $N \geq 2$: вместо (1) —

$$\xi_N = \delta_{N-1} + \rho_{N-1,N} + d_{N-1} - a_N; \quad (1b)$$

вместо (1a) —

$$a_N + \xi_N = d_1 + \delta_1 + \sum_{i=1}^{N-2} (\rho_{i,i+1} + \tau_{i+1}) + \rho_{N-1,N}. \quad (1ab)$$

Таблица 1

Участок	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6
Протяженность, км	246	245	399	343	318

Из (1b) и (1ab) при $N \geq 3$ вытекает равенство для условных вероятностей

$$P(\xi_N < t | \delta_i, \rho_{i,i+1} + \tau_{i+1}, 1 \leq i \leq N-2, \delta_{N-1}, \rho_{N-1,N}) = \\ = P(\xi_N < t | \delta_{N-1}, \rho_{N-1,N}),$$

напоминающее марковское свойство.

Функцию распределения случайной величины ξ_i обозначим $U_i(t) = P(\xi_i < t)$, $i=2,6$, а функцию плотности (мы считаем, что она существует) — $u_i(t)$. Функции распределения случайных величин δ_i и $\rho_{i,i+1}$ обозначим $F_i(x)$ и $L_{i,i+1}(y)$ соответственно. Их функции плотности обозначим теми же буквами, но строчными: $f_i(x)$ и $l_{i,i+1}(y)$. Введем также обозначение $g_i(x, y)$ для плотности совместного распределения этих случайных величин. Учитывая (1b), получаем

$$U_{i+1}(t) := P(\delta_i + \rho_{i,i+1} < t + a_{i+1} - d_i) = \\ = \iint_{x+y < t+a_{i+1}-d_i} g_i(x, y) dy dx = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{t+a_{i+1}-d_i-x} g_i(x, y) dy \right) dx \quad (2)$$

(см. также [10, формула (4)]). Из (2) вытекает равенство для плотности $u_{i+1}(t)$:

$$u_{i+1}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_i(x, t + a_{i+1} - d_i - x) dx. \quad (3)$$

Предположим, что δ_i и $\rho_{i,i+1}$ независимы. В этом случае $g_i(x, y) = l_{i,i+1}(x) f_i(y)$. Тогда в силу (2) имеем

$$U_{i+1}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{t+a_{i+1}-d_i-x} f_i(y) dy \right) l_{i,i+1}(x) dx = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} F_i(t + a_{i+1} - d_i - x) l_{i,i+1}(x) dx \equiv \\ \equiv (F_i \cdot L_{i,i+1})(t + a_{i+1} - d_i),$$

а в силу (3) —

$$u_{i+1}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(t + a_{i+1} - d_i - x) l_{i,i+1}(x) dx \equiv \\ \equiv (f_i * l_{i,i+1})(t + a_{i+1} - d_i). \quad (4)$$

Здесь $(F \cdot G)(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x-y) dG(y)$ — свёртка функций распределения F и G ;

$(f \cdot g)(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x-y) g(y) dy$ — свёртка плотностей f и g .

Далее формулу (4) будем использовать при $i=5$. В одном из следующих разделов проводится проверка

соответствия полученного модельного распределения реальным статистическим данным.

Статистические данные о движении поездов

Проведен статистический анализ данных о движении контейнерных поездов на участке Восточного полигона РЖД, содержащем шесть технических станций (см. табл. 1). Исследуются вероятностные характеристики отклонений от графика при отправлении, прибытии, времен хода по участкам и продолжительности остановок. Последовательность случайных величин в порядке их возникновения состоит из следующих элементов: $\{\delta_i, \rho_{i,i+1}, \xi_{i+1}, \tau_{i+1}\}_{i=1}^4$, δ_5 , $\rho_{5,6}$, ξ_6 . Нас интересует корреляционная связь между перечисленными 19 случайными величинами.

Выборки из распределения каждой случайной величины последовательности приведены в табл. 2. (единица измерения здесь и далее — час).

Каждая строка табл. 2, начиная со второй, состоит из последовательности наблюдаемых значений случайных величин, которые указаны в первой строке (они описывают движение конкретного поезда). Столбцы таблицы представляют собой соответствующие выборки объемом $n=12$. Малость объема выборок связана со следующей трудностью, которая возникает при сборе статистических данных о временах выполнения цепи операций. Совокупность данных по всей цепи является конечномерным случайным вектором. Отсутствие хотя бы одной компоненты ведет к потере информации и, как следствие, к ошибкам в конкретных реализациях вектора в расчетах. Очевидно, чем большую размерность имеет вектор, тем более сложно получить полноценную выборку. Так, в проведенном исследовании анализируется 19-мерный случайный вектор, для которого удалось получить выборку с объемом, равным всего лишь 12.

Статистические связи в границах элементарных участков

Представим результаты вычислений выборочных парных коэффициентов корреляции между случайными величинами, характеризующими элементы траектории движения.

Напомним, что выборочным коэффициентом корреляции случайных величин X и Y называется величина

$$r^*(X, Y) = \frac{\text{cov}^*(X, Y)}{\sqrt{\mathbf{D}^*(X) \cdot \mathbf{D}^*(Y)}},$$

где $\mathbf{D}^*(Z)$ означает выборочную дисперсию случайной величины Z , а $\text{cov}^*(X, Y)$ — выборочную ковариацию случайных величин X и Y . Отсюда следует, что $r^*(X, Y)$ можно вычислять по формуле:

Таблица 2

δ_1	$\rho_{1,2}$	ξ_2	τ_2	δ_2	$\rho_{2,3}$	ξ_3	τ_3	δ_3	$\rho_{3,4}$	ξ_4	τ_4	δ_4	$\rho_{4,5}$	ξ_5	τ_5	δ_5	$\rho_{5,6}$	ξ_6
-0.1	7.1	-0.7	0.6	-0.1	4.6	0.5	0.1	-0.8	11.6	4.2	0.4	2.6	7.5	4.4	1.6	4.9	6.2	5.4
-0.1	7.1	-0.6	0.9	0.3	4.1	0.4	0.4	-0.5	10.5	3.5	1.4	2.8	10.6	7.8	0.7	7.4	6.7	8.4
0.0	12.0	4.4	0.2	4.5	4.1	4.7	0.8	4.2	8.2	5.7	0.3	4.1	7.6	6.0	0.5	5.5	10.0	9.7
-0.3	8.7	0.7	1.4	2.0	4.8	2.9	0.7	2.3	11.1	6.8	0.9	5.7	9.7	9.8	1.2	9.8	6.6	10.6
0.0	11.0	3.4	0.1	3.5	6.1	5.6	0.6	4.9	15.7	13.9	1.3	13.3	7.2	14.8	0.4	14.1	6.8	15.2
-0.1	12.6	4.9	0.6	5.5	6.4	7.9	0.6	7.1	7.9	8.4	1.4	7.8	7.4	9.5	0.6	9.0	6.6	9.8
0.2	7.6	0.1	0.1	0.2	4.9	1.2	0.5	0.4	9.7	3.6	0.6	2.1	6.7	3.1	0.8	2.8	6.7	3.7
-0.1	8.6	0.9	0.1	1.0	4.6	1.6	0.2	0.5	17.1	10.9	2.1	11.0	7.9	13.3	0.4	12.6	8.0	14.8
0.1	9.3	1.8	0.2	1.9	5.1	3.0	0.8	2.5	8.5	4.3	2.2	4.6	7.7	6.6	0.4	5.9	6.1	6.2
-0.1	12.0	4.2	0.2	4.4	4.0	4.5	0.9	4.0	9.2	6.7	0.9	5.4	7.8	7.6	0.3	6.8	6.3	7.3
-0.2	12.3	4.4	0.1	4.5	4.8	5.3	0.5	4.5	9.2	7.1	0.4	5.5	7.7	7.5	0.6	7.0	8.4	9.6
0.1	10.7	3.1	0.1	3.2	5.6	4.8	2.8	6.3	10.8	10.4	1.6	10.1	6.4	10.9	0.9	10.6	6.1	10.9

$$r^*(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i и y_i — выборочные значения; $\bar{x}$ и $\bar{y}$ — выборочные средние (см., например, [11, с. 83]). Авторы вычислили выборочные коэффициенты корреляции для всех возможных пар, состоящих из величин табл. 2. Из-за ограничений на объем публикации приведены результаты только для участков «1–2» (участок между станциями 1 и 2) и «2–3» (участок между станциями 2 и 3): табл. 3, 4.

Опираясь на известный факт теории вероятностей, что две случайные величины линейно зависимы тогда и только тогда, когда модуль их коэффициента корреляции равен 1, мы будем говорить, что случайные величины почти линейно зависимы, если модуль их выборочного коэффициента корреляции близок к 1.

В силу табл. 3 и 4 имеем: $r^*(\xi_2, \delta_2) = 0.98$, $r^*(\xi_3, \delta_3) = 0.97$. Закономерность сохраняется и для последующих участков «3–4», «4–5»: $r^*(\xi_4, \delta_4) = 0.98$, $r^*(\xi_5, \delta_5) = 0.99$. Поэтому можно считать, что между отклонением при прибытии ξ_i на станцию i и отклонением при отправлении с нее δ_i существует почти линейная зависимость.

Почти линейная связь в начале пути между временем хода $\rho_{i-1,i}$ и отклонением при прибытии ξ_i постепенно ослабевает к концу маршрута. Это можно наблюдать на участках «1–2», «2–3» (см. табл. 3, 4) и на последующих участках. Значения коэффициента корреляции снижаются по цепи: $r^*(\rho_{1,2}, \xi_2) = 0.99$, $r^*(\rho_{2,3}, \xi_3) = 0.61$, $r^*(\rho_{3,4}, \xi_4) = 0.64$, $r^*(\rho_{4,5}, \xi_5) = 0.02$, $r^*(\rho_{5,6}, \xi_6) = 0.29$.

Аналогичный вывод справедлив для отклонения δ_i при отправлении и предшествующего времени хода $\rho_{i-1,i}$: $r^*(\delta_2, \rho_{1,2}) = 0.99$, $r^*(\delta_3, \rho_{2,3}) = 0.61$, $r^*(\delta_4, \rho_{3,4}) = 0.65$, $r^*(\delta_5, \rho_{4,5}) = 0.044$.

Продолжительность стоянки τ_i почти не связана с отклонением прибытия ξ_i и с временем хода $\rho_{i-1,i}$ по предшествующему участку. Связь отклонения δ_i при отправлении и времени стоянки τ_i нестабильна.

Таблица 3

Участок «1–2»					
	δ_1	$\rho_{1,2}$	ξ_2	τ_2	δ_2
δ_1	1				
$\rho_{1,2}$	–0.13	1			
ξ_2	–0.07	0.993	1		
τ_2	–0.63	–0.37	–0.43	1	
δ_2	–0.21	0.993	0.98	–0.24	1

А связь отклонения ξ_i при прибытии с предшествующим отклонением δ_{i-1} при отправлении изменяется от почти некоррелированности к почти линейной зависимости: $r^*(\xi_2, \delta_1) = -0.07$, $r^*(\xi_3, \delta_2) = 0.95$, $r^*(\xi_4, \delta_3) = 0.55$, $r^*(\xi_5, \delta_4) = 0.94$, $r^*(\xi_6, \delta_5) = 0.94$.

О распределении отклонения при прибытии ξ_6

Поскольку выборочный коэффициент корреляции случайных величин δ_5 и $\rho_{5,6}$ равен $r^*(\delta_5, \rho_{5,6}) = -0.055$, т.е. близок к нулю, то можно считать, что указанные случайные величины некоррелированы. Это, в свою очередь, может служить основанием для предположения их независимости. Последнее упрощает вывод функции плотности распределения случайной величины ξ_6 . Для проверки того, насколько модельное распределение отличается от реального, будут применены статистические критерии согласия.

В соответствии с терминологией, случайные величины δ_5 , $\rho_{5,6}$ и соответствующие им плотности $f_5(\cdot)$, $l_{5,6}(\cdot)$ являются входными для формулы (4) при $i=5$. Эти плотности будем находить как аппроксимации для гистограмм, построенных по имеющимся статистическим данным.

Описание входных распределений

Приведем выборку из распределения случайной величины δ_5 . Представим ее в форме вариационного ряда (табл. 5). В табл. 5 первая строка отражает номер варианты j . Вторая — саму варианту $\delta_{5(j)}$. Третья — частоту ω_j (количество идентичных вариантов в выборке). Выборку из распределения $\rho_{5,6}$ приводить не будем из-за ограничений на объем публикации. Объемы выборки для δ_5 и $\rho_{5,6}$: $n_1 = 35$, $n_2 = 43$.

Для моделирования распределений входных случайных величин будем использовать плотность гамма-распределения (см. [12, с. 121], [13]):

$$g_1(x) = I(x > b) \frac{\exp\{-(x-b)/\beta\} (x-b)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, \quad (5)$$

где $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $b \in \mathbb{R}$; $I(x > b)$ означает индикатор множества $\{x: x > b\}$, т.е. $I(x > b) = 1$ если $x > b$ и $I(x > b) = 0$ если

Таблица 4

Участок «2–3»					
	δ_2	$\rho_{2,3}$	ξ_3	τ_3	δ_3
δ_2	1				
$\rho_{2,3}$	0.35	1			
ξ_3	0.95	0.61	1		
τ_3	0.29	0.25	0.34	1	
δ_3	0.92	0.61	0.97	0.56	1

$x \leq b$. Оформим результаты, полученные для входных случайных величин, в форме табл. 6.

Используя критерий согласия Пирсона, проверим, согласуются ли выборочные данные с гипотетическими плотностями из табл. 6. Выпишем эти плотности в явном виде:

$$f_5(t) = I(t > -1.5) \frac{\exp\left\{-(t+1.5)/1.59\right\}(t+1.5)^{2.93}}{(1.59)^{3.93} \Gamma(3.93)} \quad (6)$$

— гипотеза 1 для δ_5 ,

$$l_{5,6}(t) = I(t > 5.42) \frac{\exp\left\{-(t-5.42)/0.77\right\}(t-5.42)^{1.12}}{(0.77)^{2.12} \Gamma(2.12)} \quad (7)$$

— гипотеза 2 для $\rho_{5,6}$.

Критерий Пирсона опирается на так называемую «статистику хи-квадрат»:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (8)$$

где k — число интервалов в подправленном интервальном вариационном ряду (каждый интервал содержит не менее пяти выборочных значений); i — номер интервала; n_i — число выборочных значений, попавших в i -й интервал; p_i — гипотетическая вероятность попадания в этот интервал [8, с. 152, 153].

Выборка из распределения случайной величины δ_5 представлена в табл. 5. Приведем соответствующий

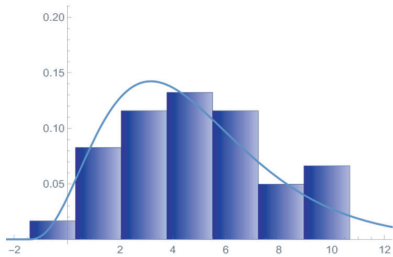
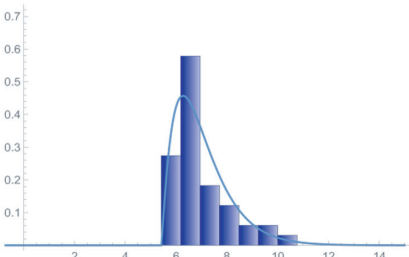
Таблица 5

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\delta_{5(j)}$	-0.55	0.95	1.13	1.32	1.82	1.97	2.38	2.52	2.77	3.25	3.77	4.20	4.40	4.45	4.87	5.17
w_j	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2

Окончание табл. 5

j	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
$\delta_{5(j)}$	5.42	5.45	5.92	6.10	6.17	6.27	6.77	7.00	7.38	7.93	8.80	8.97	9.33	9.38	9.82
w_j	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 6

Случайная величина	Гистограмма и гипотетическая функция плотности	Гипотетическая функция плотности
Отклонение при отправлении δ_5		Плотность гамма-распределения из (5) с параметрами $\alpha=3.93$, $\beta=1.59$ и $b=-1.5$
Время хода $\rho_{5,6}$		Плотность гамма-распределения из (5) с параметрами $\alpha=2.12$, $\beta=0.77$ и $b=5.42$

ей подправленный интервальный вариационный ряд в форме табл. 7, где $(a_j, a_{j+1}]$ обозначает полуоткрытый интервал с номером j и концами a_j, a_{j+1} . Выборка из распределения случайной величины $\rho_{5,6}$ ранее не приводилась; соответствующий ей подправленный интервальный вариационный ряд представлен в форме табл. 8.

Согласно теореме Пирсона, если выдвинутая статистическая гипотеза верна, то при увеличении n распределение статистики (8) приближается к распределению хи-квадрат с r степенями свободы, где $r=k-1-k_H$, а k_H – число параметров, оцениваемых по выборке (k_H совпадает с так называемым числом связей между количествами $n_i, i=\overline{1,k}$) [8, с. 152, 153].

Задается уровень значимости критерия α , близкий к нулю, и определяется критическое значение χ^2_α , удовлетворяющее равенству

$$P(\chi^2(r) > \chi^2_\alpha) = \alpha,$$

где $\chi^2(r)$ – случайная величина, имеющая распределение хи-квадрат с r степенями свободы. Если найденное значение статистики (8) удовлетворяет условию $\chi^{2*} < \chi^2_\alpha$, то гипотеза считается не противоречащей опытным данным по критерию Пирсона с уровнем значимости α . В табл. 9 представлены результаты применения критерия Пирсона с уровнем значимости $\alpha=0.05$.

Таблица 7

j	1	2	3	4	5
$(a_j, a_{j+1}]$	$(-1.414, 2.042]$	$(2.042, 3.77]$	$(3.77, 5.498]$	$(5.498, 7.226]$	$(7.226, 10.68]$
n_j	6	7	8	7	7

Таблица 8

j	1	2	3	4
$(a_j, a_{j+1}]$	$(5.418, 6.182]$	$(6.182, 6.946]$	$(6.946, 7.71]$	$(7.71, 10.766]$
n_j	9	19	6	9

Таблица 9

Случайная величина	Значение статистики χ^{2*} , вывод о согласованности
δ_5	Так как $\chi^{2*} \approx 1.669 < \chi^2_{0.05} \approx 5.991$, то по критерию Пирсона гипотеза 1 не противоречит опытным данным с уровнем значимости $\alpha=0.05$. Пояснение. Два параметра: $\alpha=3.93, \beta=1.59$ найдены по выборке (методом моментов). Поэтому $k_H=2$. Учитывая, что $k=5$, получаем $r=5-1-2=2$. По таблице распределения хи-квадрат [14] находим $\chi^2_{0.05} \approx 5.991$. Параметр $b=-1.5$ подобран эмпирически
$\rho_{5,6}$	Так как $\chi^{2*} \approx 3.135 < \chi^2_{0.05} \approx 3.841$, то по критерию Пирсона гипотеза 2 не противоречит опытным данным с уровнем значимости $\alpha=0.05$. Пояснение. Два параметра: $\alpha=2.12, \beta=0.77$ найдены по выборке. Поэтому $k_H=2$. Учитывая, что $k=4$, получаем $r=4-1-2=1$. По таблице распределения хи-квадрат [14] находим $\chi^2_{0.05} \approx 3.841$. Параметр $b=5.42$ подобран эмпирически

Таким образом, входные распределения, согласующиеся с данными реального движения, заданы. Теперь можно приступить к нахождению плотности $u_6(t)$.

О согласованности модельного распределения со статистическими данными

График функции $u_6(t)$ из (4), изображенный вместе с гистограммой (см. рис. 2), построен с помощью пакета Wolfram Mathematica. Выборка из распределения ξ_6 , по которой построена гистограмма, представлена табл. 10.

Проверим статистическую гипотезу: выборка, которой соответствует гистограмма, изображенная на рис. 2, взята из распределения с плотностью $u_6(t)$, определенной равенством (4), где $d_5=31.98$ час., $a_6=37.3$ час., а плотности $f_5(t)$ и $l_{5,6}(t)$ взяты из (6) и (7) соответственно. Проверку будем проводить, применяя критерий Пирсона с уровнем значимости $\alpha=0.05$. Подправленный интервальный вариационный ряд приведен в форме табл. 11.

По формуле $p_j = \int_{a_j}^{a_{j+1}} u_6(t) dt$ находим гипотетические вероятности: $p_1=0.202079$, $p_2=0.172208$, $p_3=0.173423$, $p_4=0.332924$. Используя (8), получаем $\chi^{2*} \approx 0.9$.

Так как плотность $u_6(t)$ полностью определена и не зависит от выборки из распределения случайной величины ξ_6 , то $k_H=0$. Поэтому $r=4-1-0=3$. По таблице

распределения хи-квадрат [14] находим $\chi^2_{0.05} \approx 7.815$. Таким образом, убеждаемся, что $\chi^{2*} < \chi^2_{0.05}$.

Отсюда следует, что выдвинутая статистическая гипотеза не противоречит опытным данным по критерию Пирсона с уровнем значимости $\alpha=0.05$.

Другими словами, модельная функция плотности, определенная равенством (4), где плотности $f_5(t)$ и $l_{5,6}(t)$ взяты из (6) и (7) соответственно, согласуется со статистическими данными из табл. 10.

Некоторые простые выводы из построенной модели

Учитывая равенство (1), рассмотрим вопрос о влиянии исходных распределений на итоговое в терминах математических ожиданий и дисперсий.

Из (1) и свойств математического ожидания следует, что

$$E\xi_6 = E\delta_5 + E\rho_{5,6} + d_5 - a_6.$$

Таким образом, сдвиг δ_5 на величину c_1 , а $\rho_{5,6}$ — на величину c_2 , приводит к сдвигу $E\xi_6$ на сумму $c_1 + c_2$.

Предположим, что случайные величины δ_5 и $\rho_{5,6}$ некоррелированы. Тогда по свойствам дисперсии

$$D\xi_6 = D\delta_5 + D\rho_{5,6}.$$

Следовательно, если в (1) случайные величины δ_5 и $\rho_{5,6}$ уменьшить в k раз, то $D\xi_6$ уменьшится в k^2 раз. Это значит, что разброс значений случайной величины ξ_6 (измеряемый посредством среднеквадратического отклонения $\sqrt{D\xi_6}$) уменьшится тоже в k раз.

Таблица 10

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\xi_6(j)$	0.23	1.88	2.38	2.52	2.77	2.88	3.52	3.72	3.75	3.93	4.72	5.38	5.55	5.93	5.97	6.05
w_j	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1

Окончание табл. 10

j	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$\xi_6(j)$	6.23	6.43	6.72	6.88	7.30	8.02	8.37	8.50	9.63	9.72	9.80
w_j	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1

Таблица 11

j	1	2	3	4
$(a_j, a_{j+1}]$	$(-0.45, 3.651]$	$(3.651, 5.018]$	$(5.018, 6.385]$	$(6.385, 10.486]$
n_j	7	5	7	11

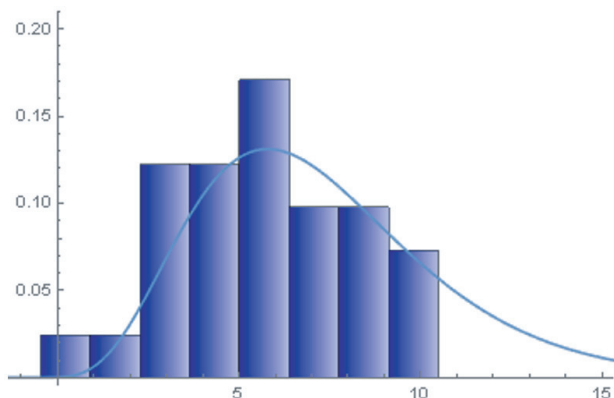


Рис. 2. Гистограмма, построенная по выборке из распределения случайной величины ξ_δ , и функция $u_\delta(t)$ из (4)

Заключение

Использование стохастического моделирования позволяет повысить качество прогнозирования развития поездной ситуации и оперативность принятия решений в условиях интенсивного движения. В результате улучшается пунктуальность движения пассажирских, контейнерных поездов и степень использования пропускной способности железнодорожной линии.

Качество прогноза улучшается, если при расчете вероятностного распределения моментов прибытия

учитывать статистические связи между величинами, характеризующими элементы маршрута, — времени хода и остановок. Проведен корреляционный анализ реальных данных по движению поездов на магистральной железнодорожной линии, который позволяет оценить закономерности в области межэлементной связи. Определено, что интенсивная связь присутствует между отклонениями при отправлении на участок и прибытии на следующую техническую станцию. Что касается времен хода, то их статистическая связь с моментами прибытия по мере движения по маршруту ослабевает.

С другой стороны, оказалось, что для решения задачи нахождения распределения отклонения от расписания при прибытии на конечную станцию не требуется знать корреляционные связи между всеми случайными величинами или их распределения, а достаточно знать только совместное распределение двух следующих случайных величин: отклонения от расписания при отправлении с предпоследней станции и времени хода на последнем участке.

Показано, что теоретическое распределение, полученное в результате предложенной модели, в случае независимости двух указанных случайных величин, согласуется со статистическими данными реального движения. В дальнейшем предполагается рассмотреть более общий случай, когда условие независимости не выполняется. 

Литература

1. Cacchiani, V. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling / V. Cacchiani, D. Huisman, M. Kidd, L. Kroon, P. Toth, L.P. Veelenturf, J. Wagenaar // *Transportation Research, Part B*. —2014. —vol. 63. —P. 15–37.
2. Buker, T. Stochastic modelling of delay propagation in large networks / T. Buker, B. Seybold // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. —2012. —vol. 2. —P. 34–50.
3. Kceman, P. Train delay evolution as a stochastic process / P. Kceman, F. Corman, L. Meng // *The 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailTokyo2015)*. —2015. —P. 1–19 (007).
4. Corman, F. Stochastic prediction of train delays in real-time using Bayesian networks / F. Corman, P. Kceman // *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*. —2018. —vol. 95. —P. 599–615.
5. Berger, A. Stochastic Delay Prediction in Large Train Networks / A. Berger, A. Gebhardt, M. Müller-Hannemann, M. Ostrowski // *The 11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS'11)*, Saarbrücken, Germany. —2011. —P. 100–111.
6. Carey, M. Stochastic approximation to the effects of headways in knock-on delays of trains / M. Carey, A. Kwieciński // *Transportation Research, Part B*. —1994. —vol. 28. —P. 251–267.
7. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей : учебник для студентов вузов / Е.С. Вентцель. —10-е изд., стер. —Москва: Academia, 2005. —572 с. —ISBN 5-7695-2311-5. —Текст: непосредственный.

8. Carey, M. Properties of expected costs and performance measures in stochastic models of scheduled transport / M. Carey, A. Kwieciński // *European Journal of Operational Research*. — 1995. — vol. 83. — P. 182–199.
9. Централизованное управление движением поездов городских железных дорог современного мегаполиса / Л.А. Баранов, Е.П. Балакина, С.Е. Иконников, Д.А. Антонов. — Текст: непосредственный // *Наука и техника транспорта*. — 2020. — № 1. — С. 30–38.
10. Davydov, B. On the distribution of the random arrival time / B. Davydov, V. Chebotarev, K. Kablukova // *WIT Transactions on The Built Environment*. — 2020. — vol. 199. — P. 193–205. DOI 10.2495/CR200181
11. Теория вероятностей и математическая статистика / В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин, Е.В. Адамова, К.К. Шевченко. — Москва: Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2003. — 130 с. — Текст: непосредственный.
12. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Корольюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Наука, 1985. — 640 с. — Текст: непосредственный.
13. Административно-управленческий портал: сайт. — URL: http://www.aup.ru/books/m155/4_16.htm (дата обращения: 14.12.2021). — Текст: электронный.
14. Электронный учебник по статистике: сайт. — URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/sttable.html> (дата обращения: 14.12.2021). — Текст: электронный.

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ «МОСКВА–2020» МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА



Д.С. Шутов



И.И. Лакин

Важную роль в перевозочном процессе Московского метрополитена составляет надежность оборудования эксплуатируемых вагонов. Состояние оборудования моторвагонного подвижного состава напрямую влияет на безопасность движения поездов и интервал их попутного следования, ведь отказ оборудования влечет за собой отправку подвижного состава в внеплановый ремонт и уменьшение количества одновременно эксплуатируемых поездов на линии.

Ключевые слова: показатели надежности, моторвагонный подвижной состав, отказы оборудования, показатели безотказности

EDN: YSCVGQ

Целью исследования является повышение надежности оборудования самых современных на Московском метрополитене вагонов моделей 81-775/776/777 «Москва–2020» (рис. 1). Это позволит уменьшить количество сбоев в графике движения поездов и уменьшить непредвиденные расходы на внеплановый ремонт.

Для указанной модели вагонов рассматривались зарегистрированные отказы по всем электродепо Московского метрополитена. Используемые в статье методы дают возможность определить узлы подвижного состава, которые требуют модернизации.

Проведенное исследование позволяет получить наглядное представление о надежности узлов и определить наиболее частые причины отказов, что позво-

лит принять меры по исключению выхода из строя оборудования подвижного состава [1].

Используемые методы

Проведен анализ сводки Метрополитена по случаям отказов вагонов в период с 01.01.2020 по 31.12.2021 (табл. 1).

На первоначальном этапе построена диаграмма отказов оборудования (рис. 2).

Наибольшее количество отказов указанных вагонов составляет дверное оборудование, которое оказывает непосредственное влияние на качество обслуживания пассажиров Московского метрополитена. Распределение отказов дверного оборудования представлено в табл. 2.

Шутов Денис Сергеевич, аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)), и.о. начальника производственно-технического отдела ГУП «Московский метрополитен» электродепо «Замоскворецкое». Область научных интересов: подвижной состав железных дорог, надежность, метрополитен, модернизация подвижного состава, техническое обслуживание и ремонт. Автор 10 научных работ, в том числе одного учебного пособия.

Лакин Игорь Игоревич, кандидат технических наук кафедры «Электропоезда и локомотивы» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)), руководитель направления дирекции по контролю качества эксплуатации подвижного состава АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ). Область научных интересов: подвижной состав железных дорог, надёжность, бортовая диагностика, АСУ, мониторинг технического состояния, техническое обслуживание и ремонт. Автор 39 научных работ. Имеет два патента на изобретения.



Рис. 1. Состав из вагонов моделей 81-775/776/777

Для контроля качества деталей подвижного состава проведен анализ Парето [2], который показывает, что наибольшее количество отказов дверного оборудования связано с неисправностями блоков управления дверьми (БУД). Анализ Парето представлен на рис. 3.

Осуществлен подбор составов, которые имели место отказа БУД со снятием состава с линии, после которого замена изделия (БУД) на вагоне не производилась. Это необходимо для наблюдения за конкретным БУД и анализа величин пробега, на которых производилось его восстановление (замена программного обеспечения (ПО), восстановление контакта в разъемах и т.д.). Количество подобранных составов составляет $N=10$.

Наработка от начала эксплуатации состава до проведения планового обслуживания БУД в объеме ТО — $t=43000$ км (максимальный пробег при объеме ТО).

Данные по наступлению моментов отказа БУД для десяти отобранных составов представлены в табл. 3.

Построены процессы восстановления каждого состава отдельно и объединенный процесс восстановления (рис. 4).

Средний пробег БУД на отказ определен по формуле (1):

$$T^* = \frac{t}{\bar{m}(t)}, \quad (1)$$

где $\bar{m}(t)$ — среднее значение повторных отказов приходящихся на один БУД, определяется по формуле (2):

$$\bar{m}(t) = \frac{\sum m_i(t)}{N}, \quad (2)$$

где $m_i(t)$ — количество отказов до проведения планового ТО.

Для определения среднего количества отказов, приходящихся на один БУД, произведен расчет по формуле (3):

$$\bar{m}(t) = \frac{33}{10} = 3,3. \quad (3)$$

Далее произведен расчет средней наработки БУД на отказ по формуле (4):

$$T^* = \frac{42060}{3,3} = 12745 \text{ км}. \quad (4)$$

С целью проведения анализа отказов БУД:

1. Пробег, на котором произошли случаи отказа БУД (33 рассматриваемых отказа) распределен по возрастанию t .

2. Рассчитан шаг между рассматриваемыми отказами dt .

3. Рассчитано математическое ожидание m^* при каждом пробеге.

4. Отказы распределены по интервалам пробега с шагом 4300 км (Δt) (от 0 до 43000 км).

5. Указано количество попаданий отказов Δm между интервалами пробега.

Результаты расчета распределения моментов отказа БУД по интервалам пробега сведены в табл. 4.

Определено множество точек математического ожидания m^* на интервале пробега от 0 до 43000 км (между проведениями технического обслуживания в объеме ТО) с шагом 430 км (табл. 5).

На основании табл. 5 построена эмпирическая функция восстановления (рис. 5). Аппроксимация эмпирической функции восстановления теоретической позволяет получить характеристику процесса восстановления [3] БУД $H(t)$. Аппроксимацию проведем до 5 степени уравнения для получения наиболее приближенной теоретической характеристики к эмпирической. Эмпирическая и теоретическая функции восстановления представлены на рис. 6.

После проведения аппроксимации получена полиномиальная линия, которая соответствует уравнению (формула (5):

$$H(t) = -3 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 + 7 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,0009 \cdot x^2 + 0,0466 \cdot x + 0,1392. \quad (5)$$

Статистический параметр потока отказов [2] определен по формуле (6):

$$\omega_i^*(\Delta t) = \frac{\Delta m}{N \cdot \Delta t}, \quad (6)$$

где Δm — количество отказов БУД в каждом из интервалов пробега;

N — количество составов (БУД);

Δt — заданный интервал пробега, тыс.км.

Теоретический параметр потока отказов определен от производной [4] $H(t)$ (формула (7)):

$$\omega_i(t) = \frac{dH(t)}{dt} = -15 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 28 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 15 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,0018 \cdot x + 0,0466. \quad (7)$$

Функция плотности распределения пробега БУД до отказа вычислена по интегральному уравнению Вольтерра [5] (формула (8)):

$$f_j = \frac{\omega_j \left(1 - \frac{\Delta f_0}{2} \right) - \Delta \cdot \sum_{i=1}^{j-1} (\omega_i f_{j-i})}{1 + \frac{\Delta \cdot \omega_0}{2}}. \quad (8)$$

Таблица 1

Отказы вагонов моделей 81-775/776/777

Группа оборудования	Количество отказов	Количество отказов, %
Дверное оборудование	227	25%
Прочее	198	22%
Электрическое оборудование	128	14%
САУ	88	10%
ЦИС	66	7%
Пневматическое оборудование	58	6%
КАТП	46	5%
АСОТП	23	3%
Видеооборудование	16	2%
Противоюзная система	14	2%
СОК ВМ	12	1%
АСНП	9	1%
Механическое оборудование	8	1%
Радиооборудование	6	1%
Всего	899	100%

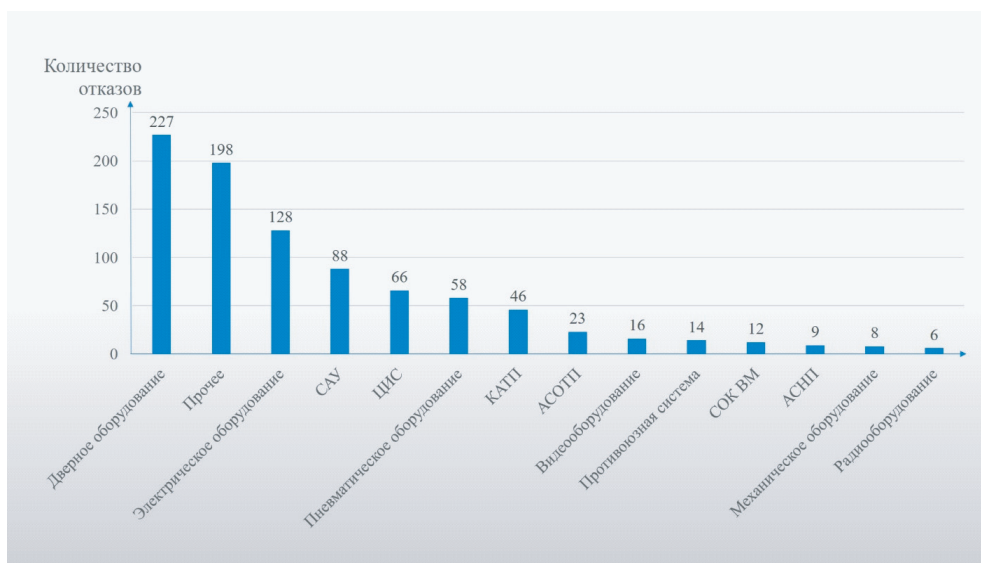


Рис. 2. Диаграмма отказов вагонов моделей 81-775/776/777

Вероятность отказа (формула (9):

$$Q(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt \quad (9)$$

Вероятность безотказной работы (формула (10):

$$P(t) = 1 - Q(t) \quad (10)$$

Интенсивность отказа (формула (11):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - Q(t)} \quad (11)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 6.

Рассчитанные данные позволяют произвести построение зависимостей, приведенных на рис. 7–9.

Выводы

Из графика зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа от пробега (см. рис. 9) видно, что при достижении составом «Москва» пробега 12900 км вероятность отказа БУД составляет 0,452 (45,2%).

После анализа табл. 4 видно, что в интервале пробега от 0 до 12900 км количество попаданий Δm отказов составляет 15 шт. из всех 33 проанализированных отказов (45,4%), что соответствует рассчитанной и изображенной на рис. 8 вероятности отказа.

Анализ отказов БУД показал, что наиболее частой причиной неисправности блоков явилась неисправность программного обеспечения (табл. 7).

Все это указывает на низкую надежность БУД и требует проведения технических мероприятий.

1. Повышение надежности за счет замены ПО [6] по причине наибольшего числа отказов, связанных со сбоем ПО.

2. Обращение в адрес завода-изготовителя с целью проведения им мероприятий и модернизаций, направленных на повышение надежности указанных блоков.

3. Проведение дополнительных работ при плановых обслуживании и ремонтах блоков БУД.

Выполнение указанных мероприятий имеет большое значение для их применения подрядными организациями Московского метрополитена и позволит в значительной мере уменьшить количество отказов оборудования подвижного состава [7].

Таблица 2

Причины отказов дверей и дверного оборудования

Причина отказа	Количество отказов	Количество отказов, %	Нарастающий итог, %
Блок управления дверьми	73	32,2	32,2
Нарушение регулировки проема	48	21,1	53,3
Привод дверей	44	19,4	72,7
Концевые выключатели	29	12,8	85,5
Двери кабины машиниста	19	8,4	93,8
Аварийные выключатели	9	4,0	97,8
Системы управления дверьми	2	0,9	98,7
Воздействие пассажиров	2	0,9	99,6
Датчик положения дверей	1	0,4	100,0
Всего	227	100,0	100,0

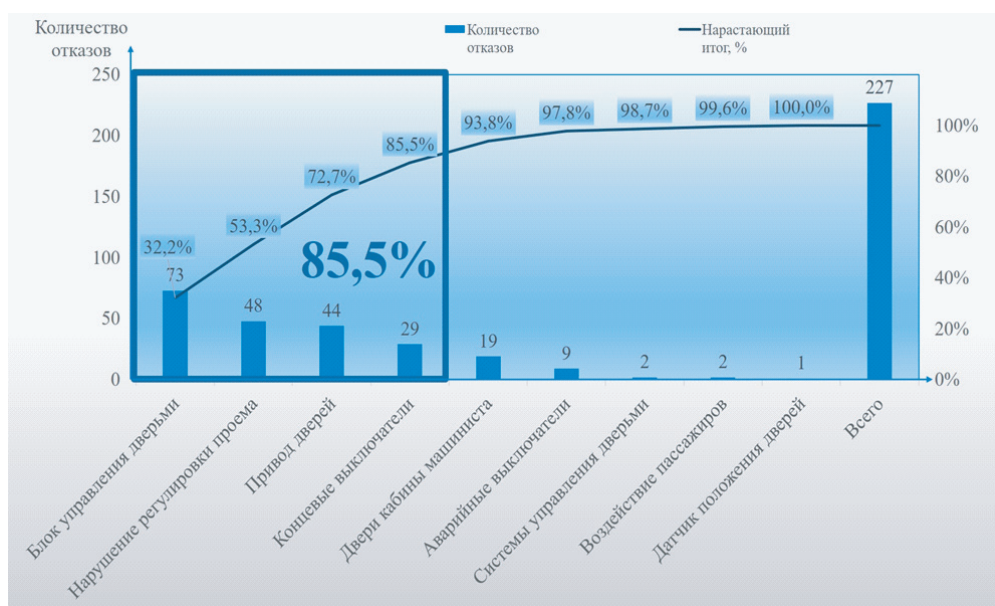


Рис. 3. Диаграмма Парето причин отказов дверей и дверного оборудования

Таблица 3

Распределение пробегов от начала эксплуатации до ТО по отказам БУД

№ состава	Количество отказов	Момент наступления отказа БУД, км				
		1	2	3	4	5
75141–75142	4	1100	4600	5540	10830	—
75017–75018	2	27500	30730	—	—	—
75025–75026	4	80	850	12800	29600	—
75027–75028	1	950	—	—	—	—
75037–75038	2	1340	8600	—	—	—
75069–75070	4	5800	37300	39540	42060	—
75091–75092	2	13870	31950	—	—	—
75107–75108	4	880	5530	7200	13280	—
75113–75114	5	15540	19430	28430	32790	37830
75119–75120	5	11740	19060	24060	28750	33340
Всего отказов	33					

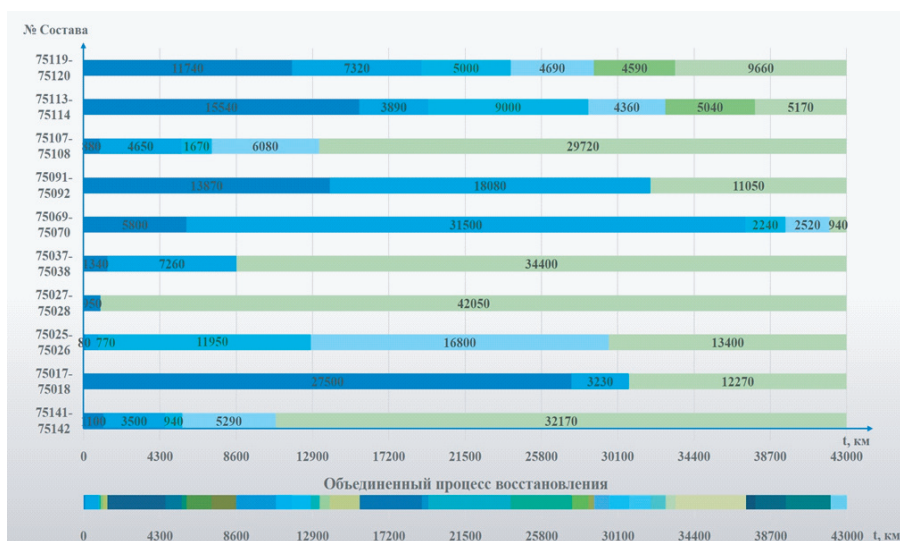


Рис. 4. График процессов восстановления каждого состава и объединенного процесса восстановления

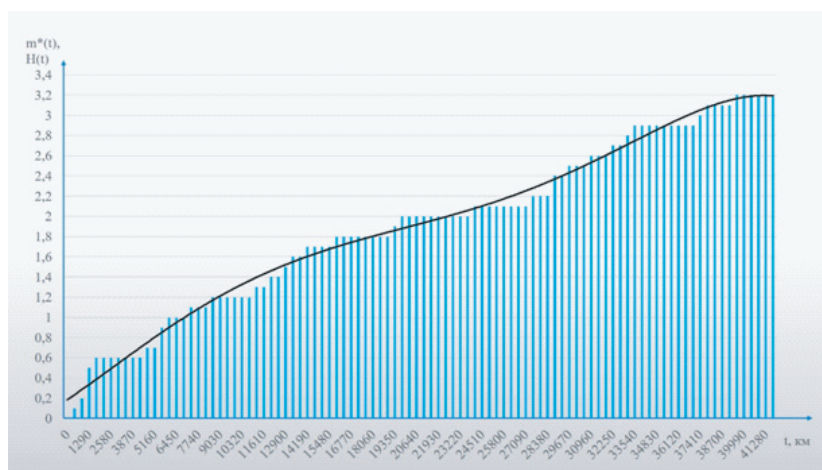


Рис. 5. Эмпирическая функция восстановления

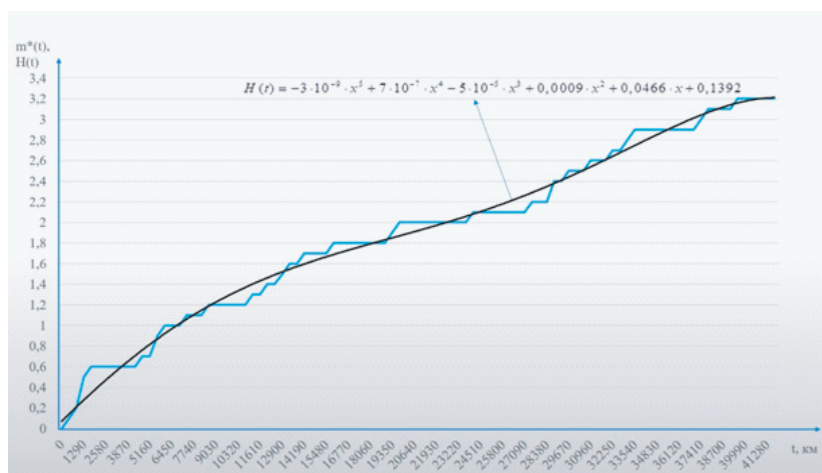


Рис. 6. Эмпирическая и теоретическая функции восстановления

Таблица 4

Распределение моментов отказа БУД по интервалам пробега

n	t	dt	m^*	Δt	Δm
1	80	80	0,1	0–4300	6
2	850	770	0,2		
3	880	30	0,3		
4	950	70	0,4		
5	1100	150	0,5		
6	1340	240	0,6		
7	4600	3260	0,7	4300–8600	6
8	5530	930	0,8		
9	5540	10	0,9		
10	5800	260	1		
11	7200	1400	1,1		
12	8600	1400	1,2		
13	10830	2230	1,3	8600–12900	3
14	11740	910	1,4		
15	12800	1060	1,5		
16	13280	480	1,6	12900–17200	3
17	13870	590	1,7		
18	15540	1670	1,8		
19	19060	3520	1,9	17200–21500	2
20	19430	370	2		
21	24060	4630	2,1	21500–25800	1
22	27500	3440	2,2	25800–30100	4
23	28430	930	2,3		
24	28750	320	2,4		
25	29600	850	2,5		
26	30730	1130	2,6	30100–34400	4
27	31950	1220	2,7		
28	32790	840	2,8		
29	33340	550	2,9		
30	37300	3960	3	34400–38700	2
31	37830	530	3,1		
32	39540	1710	3,2	38700–43000	2
33	42060	2520	3,3		

Таблица 5

Расчет математического ожидания

t	m^*
0	0,1
430	0,2
860	0,3
1290	0,5
1720	0,6
...	...
39990	3,2
40420	3,2
40850	3,2
41280	3,2
41710	3,2

Таблица 6

Результаты расчетов

i	t км	Δt	Δm	$\omega^*(t)$	$\omega^*_{ср}$	$\omega(t)$ 1/тыс. км	$f(t)$ 1/тыс. км	$F(t)$	$P(t)$	$\lambda(t)$ 1/тыс. км
0	0	—	—	—	—	0,0466	0,0466	0	1	0,04660
1	4300	0–4300	6	0,139535	0,076744	0,051783991	0,038118969	0,182	0,818	0,04660
2	8600	4300–8600	6	0,139535	0,076744	0,052684906	0,031181449	0,33	0,67	0,04654
3	12900	8600–12900	3	0,069767	0,076744	0,050453845	0,025506528	0,452	0,548	0,04654
4	17200	12900–17200	3	0,069767	0,076744	0,046118835	0,020864418	0,552	0,448	0,04657
5	21500	17200–21500	2	0,046512	0,076744	0,040584824	0,017067152	0,633	0,367	0,04650
6	25800	21500–25800	1	0,023256	0,076744	0,034633684	0,013960973	0,7	0,3	0,04654
7	30100	25800–30100	4	0,093023	0,076744	0,028924211	0,011420105	0,754	0,246	0,04642
8	34400	30100–34400	4	0,093023	0,076744	0,023992122	0,009341664	0,799	0,201	0,04648
9	38700	34400–38700	2	0,046512	0,076744	0,020250058	0,00764149	0,836	0,164	0,04659
10	43000	38700–43000	2	0,046512	0,076744	0,017987585	0,006250741	0,866	0,134	0,04665

Таблица 7

Причины отказа БУД

Причина отказа	Количество отказов
Неисправность ПО	29
Неустановленные причины, выявляемые на заводе	19
Потеря контакта в разъемах	14
Неисправность реле 30К2	3
Короткое замыкание	1
Всего	66



Рис. 7. Зависимость параметра потока отказов от пробега

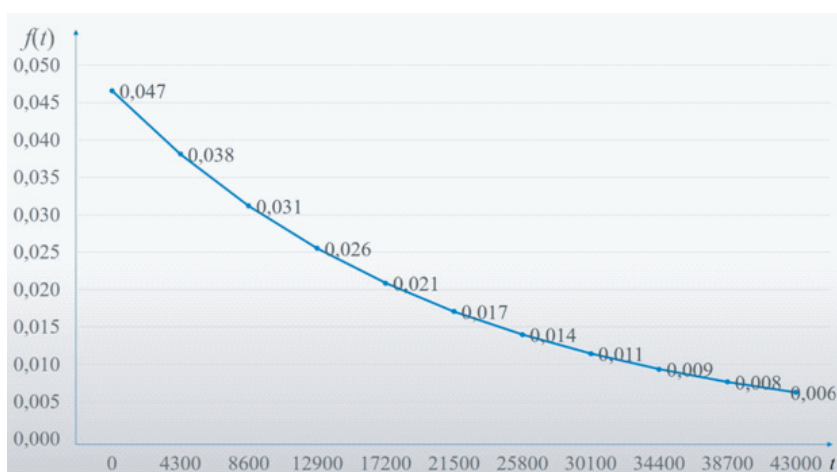


Рис. 8. График зависимости плотности распределения пробега до отказа от пробега

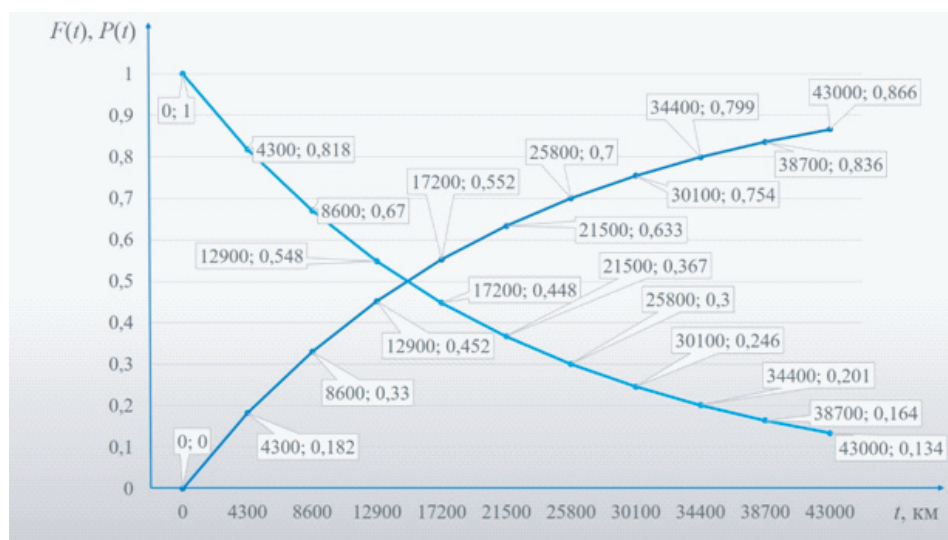


Рис. 9. График зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа от пробега

Литература

1. Шутов, Д.С. Методика расследования, учета и предупреждения неисправностей электропоездов Московского метрополитена на примере вагонов моделей 81-740/741 «Русич» / Д.С. Шутов, И.К. Лакин. — Текст: непосредственный. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. — 2022. — №1. — С. 40–45.
2. Воробьев, А.А. Расчет показателей надежности тягового подвижного состава. Ч.1. Расчет показателей надежности: учебное пособие / А.А. Воробьев, А.В. Горский, А.В. Скребков, Д.С. Шутов; — Москва: РУТ (МИИТ), 2020. — 165 с. — Текст: непосредственный.
3. Русев, В.Н. Аппроксимации функции восстановления и стратегия управления эксплуатационными затратами / В.Н. Русев, А.В. Скориков. — Текст: непосредственный. // Проблемы управления. — 2018. — №4. — С. 28–35.
4. Краковский, Ю.М. Вычислительный алгоритм численной оценки параметра потока отказов многокомпонентного оборудования / Ю.М. Краковский, З.Д. Нго. — Текст: непосредственный. // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2015. — №10. — С. 16–21.
5. Скребков, А.В. Определение оптимальной структуры ремонтного цикла электровозов в конкретных условиях эксплуатации: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Скребков Алексей Валентинович; РУТ (МИИТ). — Москва, 2004. — 24 с. — Библиогр.: с. 24. — Место защиты: РУТ (МИИТ). — Текст: непосредственный.
6. Наумов, А.А. Надежность программного обеспечения и методы ее повышения / А.А. Наумов, А.Р. Айдинян. — Текст: непосредственный. // Инженерный вестник Дона. — 2018. — №2. — С. 98.
7. Безопасность движения и метод повышения надежности предупреждения отказов технических средств по сектору автоматика и телемеханика / С.С. Промышова. — Текст: непосредственный. // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2019. — №3 С. 1–10. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41805308&-ysclid=17ip43suz2704069734> (дата обращения: (01.09.2022).

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ РИСКОВ ОТ КИБЕРУГРОЗ



Б.Ф. Безродный



Л.В. Любимова

Рассмотрен подход к обеспечению техносферной безопасности с точки зрения снижения рисков возникновения опасных воздействий на человека и окружающую среду посредством киберугроз. Описана методика количественной оценки эффективности стратегий защиты автоматизированных систем управления железнодорожным транспортом от киберугроз.

Ключевые слова: безопасность, снижение рисков, ущерб, АСУЖТ, киберугроза, оценка эффективности

EDN: DXYAEА

Техносферная безопасность обеспечивается уменьшением воздействия на человека и окружающую среду вредных и опасных производственных факторов. На сегодняшний день с учетом цифровизации железной дороги одним из наиболее очевидных опасных внешних воздействий являются киберугрозы. Это — возможность проникновения извне в автоматизированные системы управления железнодорожным транспортом (далее — АСУЖТ) с целью нарушения их штатного функционирования. При этом особое значение имеют организационные и технические меры, которые используются на железной дороге для противодействия киберугрозам. В связи с этим, в настоящей статье рассмотрена методика оценки эффективности средств защиты АСУЖТ от киберугроз.

Различные применяемые комбинации организационных и технических мер можно назвать стратегиями защиты АСУЖТ. Оценка, в том числе, количественная, результативности применения стратегий защиты необходима для дальнейшего анализа с целью поддержки и улучшения систем обеспечения кибербезопасности. Для оценки эффективности информационной и кибербезопасности существует множество методик, основанных на сложных математических моделях [1]. Применительно к АСУЖТ авторы статьи предлагают в качестве критерия оценки использовать размер снижения величины прогнозируемого ущерба, наносимого инфраструктуре и подвижному составу ОАО «РЖД», регионам и территориям, по которым пролегают железнодорожные магистрали, а также перевозимым пасса-

Безродный Борис Федорович, доктор технических наук, профессор, начальник Отдела обеспечения кибербезопасности – заместитель начальника Центра кибербезопасности Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), заведующий кафедрой «Прикладная математика» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). Область научных интересов: кибербезопасность автоматизированных систем управления железнодорожным транспортом. Автор 300 научных работ, в том числе двух монографий. Имеет один патент на изобретение.

Любимова Лариса Владимировна, главный специалист по информационной безопасности Отдела обеспечения кибербезопасности Центра кибербезопасности Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»). Область научных интересов: кибербезопасность автоматизированных систем управления железнодорожным транспортом. Автор 10 научных работ.

жирам и грузам по причине форс-мажорных (не страховых) событий, вызванных кибератаками.

Чтобы оценить эффективность применения той или иной стратегии защиты АСУЖТ через размер снижения величины прогнозируемого ущерба от нарушений штатного функционирования этих систем, необходимо рассчитать указанный ущерб для трех случаев:

1. Кибератаки на АСУЖТ отсутствуют.
2. На АСУЖТ направлены кибератаки, но никакие стратегии защиты не применяются.
3. На АСУЖТ направлены кибератаки и применяются стратегии защиты, эффективность которых рассчитывается.

При этом средний ущерб от кибератак на АСУЖТ следует рассчитывать как оценку математического ожидания величины ущерба [2] с учетом распределения нежелательных событий, вызванных реализацией киберугроз, по четырем категориям исходя из возможных негативных последствий. Согласно принятой на железнодорожном транспорте классификации такими категориями являются:

- опасный отказ;
- защитный отказ;
- отказ технических (программно-аппаратных) средств;
- событие, не нарушающее штатное функционирование системы.

Нейтрализацией угрозы безопасности при этом является перевод нежелательного события, наступающего в результате ее реализации, в более низкую, с точки зрения величины ущерба, категорию (вплоть до категории, не наносящей ущерб).

Размер ущерба C , наносимого по причине кибератак на АСУЖТ, можно оценить (рассчитать) по формуле:

$$C \approx (\lambda_{\text{ОО}} C_{\text{ОО}} + \lambda_{\text{ОЗ}} C_{\text{ОЗ}} + \lambda_{\text{ТС}} C_{\text{ТС}} + \lambda_{\text{БУ}} C_{\text{БУ}}) \Delta t, \quad (1)$$

где $C_{\text{ОО}}$ — средний ущерб от одного опасного отказа АСУЖТ;

$C_{\text{ОЗ}}$ — средний ущерб от одного защитного отказа АСУЖТ;

$C_{\text{ТС}}$ — средний ущерб от одного отказа технических (программно-аппаратных) средств АСУЖТ;

$C_{\text{БУ}}$ — средний ущерб от одного события, не приводящего к нарушению штатного функционирования АСУЖТ;

$\lambda_{\text{ОО}}$ — интенсивность потоков опасных отказов АСУЖТ;

$\lambda_{\text{ОЗ}}$ — интенсивность потоков защитных отказов АСУЖТ;

$\lambda_{\text{ТС}}$ — интенсивность потоков отказов технических (программно-аппаратных) средств АСУЖТ;

$\lambda_{\text{БУ}}$ — интенсивность потоков событий, не приводящих к нарушению штатного функционирования АСУЖТ;

Δt — время наблюдения.

Так как события, не приводящие к нарушению штатного функционирования АСУЖТ, не наносят ущерб, то $C_{\text{БУ}} = 0$. И, следовательно, учитывать интенсивность потоков таких событий в предлагаемой авторами методике нецелесообразно.

Размер интенсивности потоков нежелательных событий является величиной переменной и в зависимости от рассматриваемой ситуации (в части влияния на АСУЖТ различных сценариев кибератак и стратегий защиты) принимает разные значения. Интенсивность потоков нежелательных событий λ , для каждой из четырех категорий, включает в себя эталонную интенсивность потока нежелательных событий λ^0 (в случае отсутствия кибератак на АСУЖТ) и величины $\Delta\lambda$ и $\Delta\lambda'$, на которые изменяется λ^0 , когда на АСУЖТ направлены кибератаки без применения стратегий защиты и с применением таковых соответственно.

Эталонные значения интенсивности потоков нежелательных событий определяются из технических условий, ГОСТ 33432-2015, а также нормативных документов, конструкторской и проектной документации на АСУЖТ.

В случае, когда кибератаки на АСУЖТ отсутствуют, интенсивности потоков нежелательных событий равны своим эталонным значениям, т.е. $\lambda = \lambda^0$. Тогда величину ущерба обозначим C_0 и рассчитаем по формуле (1)

$$C_0 \approx (\lambda_{\text{ОО}}^0 C_{\text{ОО}} + \lambda_{\text{ОЗ}}^0 C_{\text{ОЗ}} + \lambda_{\text{ТС}}^0 C_{\text{ТС}}) \Delta t. \quad (2)$$

Кибератаки, осуществляемые по разным сценариям, являются событиями несовместными. В случае, когда на АСУЖТ направлены кибератаки, но никакие стратегии защиты не применяются, интенсивность потоков нежелательных событий увеличивается на величину $\Delta\lambda$, т.е.

$$\lambda = \lambda^0 + \Delta\lambda. \quad (3)$$

Найти величину $\Delta\lambda$ можно, зная вероятности успешной реализации кибератаки на АСУЖТ, полученные на основании экспертных оценок, либо по результатам экспериментальных исследований по оценке актуальных для АСУЖТ киберугроз. С учетом реальной статистики за исследуемые несколько лет известно, что кибератаки на АСУЖТ, являются редкими событиями, а их поток можно считать простейшим, т.е. пуассоновским

$$P_{\text{ОО}} = 1 - e^{-\Delta\lambda_{\text{ОО}} \Delta t}, \quad (4)$$

$$P_{O3} = 1 - e^{-\Delta\lambda_{O3}\Delta t}, \quad (5)$$

$$P_{TC} = 1 - e^{-\Delta\lambda_{TC}\Delta t}, \quad (6)$$

$$P_{BY} = 1 - e^{-\Delta\lambda_{BY}\Delta t}, \quad (7)$$

где P_{OO} — вероятность успешной реализации кибератаки, приводящей к опасному отказу АСУЖТ;

P_{O3} — вероятность успешной реализации кибератаки, приводящей к защитному отказу АСУЖТ;

P_{TC} — вероятность успешной реализации кибератаки, приводящей к отказу технических (программно-аппаратных) средств АСУЖТ;

P_{BY} — вероятность успешной реализации кибератаки, приводящей к событию, не нарушающему штатного функционирования АСУЖТ.

При оценке вероятностей успешной реализации кибератаки на АСУЖТ должна учитываться ее реализуемость. Т.е. каждая вероятность P_{OO} , P_{O3} , P_{TC} , P_{BY} — это произведение вероятности выбора конкретного сценария кибератаки из всего набора возможных на вероятность достижения цели конкретного воздействия.

$$P = P^a \cdot P^y, \quad (8)$$

где P^a — вероятность выбора сценария кибератаки;

P^y — вероятность успеха кибератаки.

Вероятности P^a и P^y можно определить на основе экспертного опроса опытных сотрудников службы информационной безопасности и специалистов железнодорожников, соответственно, либо по результатам экспериментальных исследований, а именно серии пентестов, реализующих различные сценарии кибератак на АСУЖТ. Рекомендованное количество пентестов для каждого сценария кибератаки составляет 100 и более.

Используя зависимость интенсивности потока нежелательных событий от вероятности успешной реализации кибератаки, из формул (4–8) получаем

$$\Delta\lambda_{OO} \approx \frac{\ln(1 - P_{OO}^a \cdot P_{OO}^y)}{\Delta t}; \quad (9)$$

$$\Delta\lambda_{O3} \approx \frac{\ln(1 - P_{O3}^a \cdot P_{O3}^y)}{\Delta t}; \quad (10)$$

$$\Delta\lambda_{TC} \approx \frac{\ln(1 - P_{TC}^a \cdot P_{TC}^y)}{\Delta t}; \quad (11)$$

$$\Delta\lambda_{BY} \approx \frac{\ln(1 - P_{BY}^a \cdot P_{BY}^y)}{\Delta t}. \quad (12)$$

Тогда формула (1) примет вид

$$C \approx ((\lambda_{OO}^0 + \Delta\lambda_{OO})C_{OO} + (\lambda_{O3}^0 + \Delta\lambda_{O3})C_{O3} + (\lambda_{TC}^0 + \Delta\lambda_{TC})C_{TC})\Delta t. \quad (13)$$

Для третьего случая, когда на АСУЖТ направлены кибератаки и применяются стратегии защиты, интенсивность потоков нежелательных событий будет изменяться на величину $\Delta\lambda'$, т.е.

$$\lambda = \lambda^0 + \Delta\lambda'. \quad (14)$$

Величина $\Delta\lambda'$ определяется из данных об изменении категории нежелательного события после применения различных стратегий защиты АСУЖТ. Для каждой конкретной АСУЖТ киберугрозы распределяются на группы от 1 до 4 в зависимости от последствий их реализации. Величина $\Delta\lambda$ — это интенсивность потоков нежелательных событий для группы. Она сохраняется, но при противодействии киберугрозам различными мерами и средствами защиты может пересределяться, так как киберугрозы могут переходить из одной группы в другую. Как правило, при эффективном применении мер и средств защиты киберугрозы из группы событий, приводящих к опасным отказам, переходят в группу событий, приводящих к защитным отказам, а киберугрозы из группы событий, приводящих к отказам технических (программно-аппаратных) средств, переходят в группу событий, не нарушающих штатное функционирование системы. Внутри групп

у каждой кибератаки появляется своя величина $\overline{\Delta\lambda}^i$, сумма всех $\overline{\Delta\lambda}^i$ равна $\Delta\lambda$.

$$\Delta\lambda = \sum_{i=1}^n \overline{\Delta\lambda}^i, \quad (15)$$

где n — количество киберугроз в группе.

Тогда

$$\Delta\lambda' = \Delta\lambda \pm \sum_{j=1}^m \overline{\Delta\lambda}^{ij}, \text{ для } m \leq n, \quad (16)$$

где m — количество киберугроз, перешедших из одной группы в другую.

Величина ущерба C' в таком случае будет равна

$$C' = ((\lambda_{OO}^0 + \Delta\lambda'_{OO})C_{OO} + (\lambda_{O3}^0 + \Delta\lambda'_{O3})C_{O3} + (\lambda_{TC}^0 + \Delta\lambda'_{TC})C_{TC})\Delta t. \quad (17)$$

Рассчитав значения величины ущерба для трех разных случаев наличия или отсутствия кибератак и стратегий защиты, можно сделать вывод об эффективности применяемых стратегий защиты АСУЖТ. Для этого необходимо рассчитать величины ΔC_A и ΔC_B

$$\Delta C_A = C - C', \quad (18)$$

$$\Delta C_B = C' - C_0, \quad (19)$$

где ΔC_A — это величина, которая показывает разницу между величиной ущерба в случае, когда на АСУЖТ направлены кибератаки, но никакие стратегии защиты не применяются, и величиной ущерба, когда на АСУЖТ направлены кибератаки и применяются стратегии защиты;

ΔC_B — это величина, которая показывает разницу между величиной ущерба в случае, когда на АСУЖТ направлены кибератаки и применяются стратегии защиты, и величиной ущерба, когда кибератаки на АСУЖТ отсутствуют.

Стратегию защиты от кибератак, направленных на АСУЖТ, следует считать более эффективной по сравнению с другой стратегией защиты, если величина ΔC_A для нее больше, чем у альтернативной стратегии, а ΔC_B наоборот меньше. Поэтому наиболее предпочтительной следует считать стратегию защиты от кибератак, у которой параметр ΔC_A максимален среди всех комплексов защитных мер, а параметр ΔC_B — минимален.

Заключение

Обеспечение техносферной безопасности за счет снижения опасных воздействий на человека и окружающую среду возможно при эффективном применении стратегий защиты АСУЖТ от киберугроз. Для количественной оценки эффективности целесообразно выбрать в качестве ее критерия размер снижения величины ущерба от форс-мажорных (нестраховемых) событий, вызванных кибератаками. Такой подход дает возможность определить наиболее эффективную стратегию защиты АСУЖТ от кибератак, опираясь на экспертную оценку вероятности реализации этих кибератак и (или) результаты экспериментальных исследований киберзащищенности АСУЖТ, что позволит сократить опасные воздействия и обеспечить техносферную безопасность. 

Литература

1. Хайретдинов, Р. Оценка эффективности информационной безопасности / Р. Хайретдинов. — Текст: непосредственный // Information Security / Информационная безопасность. — 2014. — №2. — С. 48–49.
2. Безродный, Б.Ф. Оценка эффективности решений по повышению киберзащищенности объектов ЖАТ / Б.Ф. Безродный, Л.В. Любимова. — Текст: непосредственный // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — Москва: Российский университет транспорта, 2022. — С. 487–489.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОФИЛАКТИКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ ПЕРСОНАЛА



В.А. Аксенов



А.В. Киселев

Рассмотрены вопросы, касающиеся обучения персонала технике безопасности труда, охраны здоровья и жизнедеятельности на производстве, повышения квалификации и актуализации знаний уже работающего на предприятии персонала, в частности, предложено использовать специализированное программное обеспечение GoContractor, которое позволяет оптимизировать и упростить обучение технике безопасности.

Ключевые слова: безопасность труда, обучение, повышение квалификации, производство, персонал, травматизм, профилактика

EDN: WSDWOH

На сегодняшний день, в эпоху стремительного развития глобализационных процессов и достижений НТР, создание безопасных условий труда является неотъемлемой частью социально-экономического развития общества и составляющим элементом государственной политики. В развитых странах мира травмы занимают третье место в списке причин смертности населения, причем среди людей трудоспособного возраста [1].

В данном контексте производственный травматизм стал актуальным вопросом для большинства государств, приобретая статус одной из важнейших медико-

социальных проблем современности. В течение всего XX века и с началом XXI века, в связи с разворачиванием процессов цифровизации, развитием высокотехнологичного производства значимость проблемы травматизма только возросла, при этом отмечается рост несчастных случаев со смертельным исходом, с переходом на инвалидности с временной утратой трудоспособности [2].

Парадокс начала XXI века заключается в том, что почти за каждым проявлением научно-технического прогресса - новым орудием труда или средством производства, новой технологией или материалом,

Аксенов Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: технология транспортного машиностроения, ресурсосберегающие технологии на транспорте. Автор более 200 научных работ, в том числе четырех монографий, одного учебника и 14 учебных пособий.

Киселев Александр Викторович, аспирант кафедры «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)), специалист по закупкам по охране труда и пожарной безопасности ООО «Кортекс». Область научных интересов: охрана труда, профилактика травматизма. Автор одной научной работы.

Самойлов Вадим Вадимович, аспирант кафедры «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: охрана труда, специальная оценка по условиям труда, профессиональные заболевания. Автор девяти научных работ.

Киселева Екатерина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: условия труда работников массовых профессий городских агломераций, профилактика травматизма, микротравмирование, профессиональные заболевания. Автор более 40 научных работ, в том числе трех учебных пособий и двух монографий.

кроются новые потенциальные опасности для здоровья человека. В результате, несмотря на последние достижения науки и техники, прорывные инновации, предприятия до сих пор не способны создать благоприятные условия для сохранения здоровья и охраны труда людей, занятых на производстве.

В то же время необходимо обратить внимание на тот факт, что безопасные условия труда достигаются и определяются не только действующей законодательной базой, действиями работодателя и ответственных сотрудников предприятия, но и общим уровнем цивилизованности, производственной культурой персонала, своевременной подготовкой кадров и повышением квалификации работников. Статистика и анализ несчастных случаев и чрезвычайных ситуаций показывают, что они часто случаются из-за низкой ответственности и неосведомленности работников о правилах безопасного выполнения работ, отсутствия у многих людей элементарных представлений о возможных опасностях. Как свидетельствует международная практика, вложения в повышение профессионального уровня сотрудников на производстве, их обучение позволяют сократить на 25% количество дорогостоящих поломок оборудования и время простоя, а также снизить затраты предприятия на компенсацию в связи с несчастными случаями на 70% [3].

Таким образом, с учетом вышеизложенного, а также принимая во внимание тот факт, что система культуры охраны труда, ее основные принципы и направления развития находятся в процессе научной дискуссии, исследование возможностей и способов профилактики травматизма на производстве на основе обучения сотрудников является своевременным, теоретически и практически значимым, что и обуславливает выбор темы данной статьи.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых рассматривались аспекты этой проблемы и на которых обосновывается автор; выделение неразрешенных раньше частей общей проблемы. Исследование экономических и социальных аспектов охраны труда на предприятиях были проведены такими учеными, как: Jule, Janet G. [4], Su, Yanan [5], Графкина М.В., Майструк А.В. [6], Шипилова И.А., Переславцева В.А. [7], Смолин А.В., Мазаник И.Е. [8].

Обоснованию необходимости комплексного подхода к оценке влияния производственных факторов, в том числе, и человеческих на динамику травматизма посвящены труды Tremblay, Alec [9]; Badri, Adel [10], Miao, Cheng-lin [11], Malaian, Karpush [12], Пузырев Н.М., Пескарёва Н.Р. [13].

Активно над развитием научно-методических подходов и разработкой профилактических мероприятий,

основанных на программно-целевом методе обучения различных категорий работников предприятия, работают Пестерева Д.В. [14], Файнбург Г.З. [15], Tong, Ruipeng [16], Jule, Janet G. [17].

Однако, несмотря на большое количество проведенных исследований, можно констатировать, что существующие методы и подходы к вопросам анализа и прогнозирования производственного травматизма не дают целостной картины проблемы. Несистемными и фрагментарными являются исследования, в которых раскрывается проблематика неудовлетворительной организации труда и нарушений технологической дисциплины, рассматриваются вопросы неадекватного мышления и безответственного отношения к безопасности участников трудовых и производственных процессов по всей вертикали управления и выполнения заданий.

Формирование целей статьи (постановка задания)

С учетом обозначенных выше обстоятельств, цель статьи заключается в рассмотрении путей и методов повышения эффективности профилактики производственного травматизма путем совершенствования компетенции персонала в области производственных процессов.

Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов

По данным Института труда и здоровья в США, только один из пяти новых работников проходит обучение технике безопасности [18]. Также эта проблема касается и тех сотрудников, которые привлекаются для выполнения временных работ. Очевидно, что такая ситуация заслуживает особого внимания.

Поэтому, по мнению автора [19], для вновь принятого на работу человека необходимо установить степень его подготовки путем проведения тестирования и собеседования по вопросам охраны труда. На основании этого можно обозначить конкретные задачи и целевые ориентиры, которых необходимо достичь в процессе обучения технике труда. Главной ошибкой работодателей является то, что они априорно предполагают, что принимаемый на работу человек знает все нормы, права и обязанности, связанные с безопасным поведением и использованием оборудования.

Не подлежит сомнению тот факт, что новые работники должны пройти инструктаж по технике безопасности, специфический для рабочего места и тех заданий, которые им предстоит выполнять. Проводить инструктаж должны обученные инструкторы, также полезным является участие опытных работников,

которые могут поделиться личными историями, навыками, специфическими особенностями использования технологий, инструментов и т.д. Инструктаж обязательно должен включать практические занятия. Цель инструктажа заключается в том, чтобы дать очень сильное и четкое послание новому сотруднику о необходимости соблюдения правил безопасности на производстве, ее важности для сохранения жизни и здоровья, а также о том, как безопасность будет обеспечиваться на конкретном рабочем месте [20].

Можно выделить следующие обязательные элементы, которые позволят обеспечить проведение эффективной подготовки и ориентации нового сотрудника в сфере охраны труда и безопасности в области производственных процессов:

- предоставление полной информации о конкретном объекте, технологическом процессе, рабочем месте, акцентируя особое внимание на определении существующих и ожидаемых опасностей, наиболее щадящих методов работы, а также необходимых средствах индивидуальной защиты;
- поощрение работников к тому, чтобы они выявляли опасности и сообщали о них руководителю;
- информирование сотрудников об их правах и о том, что они имеют право на безопасное рабочее место, а также отказаться от небезопасной работы;
- возможность сообщать о травмах и инцидентах без последствий;
- четкая формализация действий и особенностей поведения в чрезвычайных ситуациях.

Очевидно, что обучение и повышение квалификации является критически важным не только для

новых сотрудников, но и для тех, которые уже имеют стаж работы на предприятии. В данном случае можно использовать профессиональное программное обеспечение, например, такое как GoContractor, которое позволяет оптимизировать и упростить обучение технике безопасности. Такой подход не только помогает снизить риск заболевания или травмы у сотрудников, но также способствует удержанию и вовлеченности персонала. В дополнение к обучению предотвращения травм целесообразно включить курсы по подготовке к оказанию первой помощи, чтобы сотрудники могли эффективно отреагировать на ситуацию в случае аварии.

Выводы исследования и перспективы дальнейших изысканий данного направления

В современных условиях система управления охраной труда и профилактики травматизма на производстве должна базироваться не только на мероприятиях со стороны государства, но и на заинтересованности субъектов трудовых правоотношений, а также обязательно включать меры по обучению и повышению квалификации персонала.

Перспективным направлением исследований в этой области является изучение возможностей новых технологий и методов, в том числе с использованием виртуальной реальности и компьютерных тренажеров, которые позволят повысить квалификацию и подготовку персонала в области охраны и безопасности труда на производстве. 

Литература

1. Яковлева, Е.В. Культура безопасности как элемент профилактики производственного травматизма / Е.В. Яковлева, П.А.Кузнецов. —Текст: непосредственный // Агротехника и энергообеспечение. —2020. —№1(26). —С. 95—101.
2. Семенова, А.Г. Инновационные технологии как эффективные инструменты снижения производственного травматизма / А.Г. Семенова, Е.В. Данилова. —Текст: непосредственный // Инновации и инвестиции. —2019. —№8. —С. 19—21.
3. AlMahmoud, Tahra Eye Injuries and Related Risk Factors among Workers in Small-scale Industrial Enterprises // Ophthalmic epidemiology. 2020. Volume 27: Number 6; pp 453—459.
4. Jule, Janet G. Workplace Safety: A Strategy for Enterprise Risk Management // Workplace health & safety. 2020. Volume 68: Number 8; pp 360—365.
5. Su, Yanan Evaluating the effectiveness of labor protection policy on occupational injuries caused by extreme heat in a large subtropical city of China // Environmental research. 2020. Volume 186; pp 31—34.
6. Графкина, М.В. Повышение эффективности надзорной и инспекционной деятельности по анализу и профилактике производственного травматизма / М.В.Графкина, А.В. Майструк. —Текст: непосредственный// Управление техносферой. —2019. —Т.2, №4. —С. 433—443.

7. Шипилова, И.А. Производственный травматизм и его предупреждение / И.А. Шипилова, В.А. Переславцева. —Текст: непосредственный // Строительство и недвижимость. —2020. —№1(5). —С. 95–98.
8. Смолин, А.В. Контроль риска травмирования, обусловленного отклонениями производственного процесса от требований безопасности / А.В. Смолин, И.Е. Мазаник. —Текст: непосредственный // Проблемы недропользования. —2020. —№4 (27). —С. 129–135.
9. Tremblay, Alec; Badri, Adel Assessment of occupational health and safety performance evaluation tools: State of the art and challenges for small and medium-sized enterprises // Safety science. 2018. Volume 101; pp 260–267.
10. Badri, Adel A novel tool for evaluating occupational health and safety performance in small and medium-sized enterprises // Safety science. 2018. Volume 101; pp 282–294.
11. Miao, Cheng-lin Safety management efficiency of China's coal enterprises and its influencing factors—Based on the DEA-Tobit two-stage model // Process safety and environmental protection: transactions of the Institution of Chemical Engineers. 2020. Volume 140; pp 79–85.
12. Malaian, Karpush Optimization of costs for labor protection of the enterprise // IOP conference series. Materials science and engineering. 2019. Volume 666.; pp 14–19.
13. Пузырев, Н.М. Методика оценки организационного уровня производства и ее влияние на общий уровень безопасности труда/ Н.М. Пузырев, Н.Р. Пескарёва. —Текст: электронный // Научный электронный журнал Меридиан. —2019. —№16(34). —С. 6–8. —URL: <https://meridian-journal.ru/site/article?id=2375-&ysclid=l81ebktxaq725222716> (дата обращения: 14.09.2022).
14. Пестерева, Д.В. Формирование культуры безопасности труда на предприятиях с травмоопасным производством /Д.В. Пестерева. —Текст: непосредственный // Социальные науки. —2020. —№2 (29). —С. 69–75.
15. Файнбург, Г.З. Основы должной организации качественного обучения по охране труда и безопасности производства / Г.З.Файнбург. —Текст: непосредственный // Безопасность и охрана труда. —2021. —№1(86). —С. 22–30.
16. Tong, Ruipeng Progress of work safety standardization in China: A case study of hundred local standards in Beijing // Process safety progress. 2021. Volume 40: Number 1; pp 3–11.
17. Jule, anet G. Workplace Safety: A Strategy for Enterprise Risk Management // Workplace health & safety. 2020. Volume 68: Number 8; pp 360–365.
18. Nyawera, James Xolani Critical drivers towards generative process health and safety culture // Journal of engineering, design and technology. 2020. Volume 19: Number 2; pp 385–411.
19. Мажкенов, С.А. Новые возможности развития культуры безопасности труда на основе обучения по методике TWI/ С.А. Мажкенов. —Текст: непосредственный // Безопасность труда в промышленности. —2020. —№7. —С. 60–66.
20. Шарипов, С.А. Повышение производительности труда и эффективности использования производственных ресурсов предприятий аграрного бизнеса / С.А. Шарипов, Н.Л. Титов, Г.А. Харисов. —Текст: непосредственный // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. —2021. —№1. —С. 2–7.
21. Локтев, Д.А. Возможность распознавания лиц в инфракрасном диапазоне /Д.А. Локтев, В.А. Кочнев, А.А. Локтев. —Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. —2019. —№2. —С. 77–83.
22. Локтева, О.С. Безопасный труд как основа государственно-частного партнерства на железной дороге/ О.С. Локтева, В.А. Кочнев, Д.А. Локтев. —Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. —2019. —№4. —С. 80–85.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ РАБОТНИКОВ ИНФРАСТРУКТУРНОГО КОМПЛЕКСА



А.А. Кириллин



О.С. Сачкова

Рассмотрены средства индивидуальной защиты работников инфраструктурного комплекса, занятых при ремонтных и строительных работах. Проведен анализ вредных и опасных факторов, действующих в рабочей зоне.

Ключевые слова: спецодежда, технологии, ткани, охрана труда, факторы среды, химические факторы

EDN: FUKAE0

В данной статье рассматриваются средства индивидуальной защиты работников, задействованных при строительных и ремонтных работах на железнодорожном транспорте. Комплексный анализ вредных и опасных факторов, действующих в рабочей зоне, позволяет установить вредный класс условий труда (3.1). Основными факторами, действующими на организм работника, являются шумовой, химический и тяжесть трудового процесса.

При изучении химического фактора установлено многократное превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) пыли. Превышение может достигать значения в 170 раз, что создает дополнительную значительную нагрузку на органы дыхания. В основном места, где выявлено превышение ПДК,

связаны с сыпучими материалами, такими как песок или цемент.

Изучение шумового фактора говорит о превышении предельно допустимого уровня (ПДУ) шума и вибрации от инструментов, используемых во время производства работ, а также от проезжающих составов. Основные превышения выявлены при частоте более 250 Гц на рабочих местах пескоструйщика и дозировщика бетономесительной установки, а также на рабочих местах монтажников на расстоянии до 10 метров от центра пескоструйной очистки.

Метеорологические условия являются неотъемлемыми при выполнении строительных работ на железнодорожном транспорте, так как все работы производятся под открытым небом. Особенно в холодное

Кириллин Александр Андреевич, аспирант кафедры «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: охрана труда, безопасность производства работ. Автор девяти научных работ.

Сачкова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории коммунальной гигиены и эпидемиологии отдела медико-биологических исследований ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожной гигиены» (ВНИИЖГ Роспотребнадзора), профессор кафедры «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: исследования полимерсодержащих материалов для железнодорожного транспорта, гигиеническая сертификация подвижного состава железнодорожного транспорта. Автор 190 научных работ, в том числе пяти монографий, четырех учебников и восьми учебных пособий. Имеет пять патентов на изобретения.

Климова Диана Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: безопасность транспортных систем городских агломераций, системный анализ безопасности, охрана труда. Автор более 110 научных работ, в том числе 10 учебных пособий.

время года этот фактор способен оказывать неблагоприятное влияние на организм работников. Основное влияние на организм строителей оказывают высокие и низкие температуры, повышенная влажность, сильные порывы ветра. Особенно неблагоприятными для человеческого организма являются резкие перепады перечисленных показателей. Подобные перепады часто встречаются при работах вблизи рек, когда работники передвигаются с береговой линии на открытую площадку непосредственно над водой.

Совокупность различных неблагоприятных факторов усиливает эффект воздействия на организм человека, когда во время строительных работ используется большое количество машин и механизмов, в том числе механизированного инструмента. Такие инструменты, как пневматические перфораторы и трамбовочные инструменты, создают высокий уровень шума, при этом другие ручные инструменты вызывают сильную вибрацию. В результате вибрация оказывает отрицательное влияние на организм человека, что усиливает совокупное негативное влияние, особенно при пониженных температурах.

Рассмотрим обеспечение средствами индивидуальной защиты работников, реализующих искусственные сооружения, в чьи обязанности входят ремонт и техническое содержание мостов, тоннелей и труб. В настоящее время эти работники при обеспечении средствами индивидуальной защиты приравниваются к профессии «монтер пути», несмотря на то, что их условия труда сильно различаются. При этом нормы выдачи и применения специальной одежды не отличаются.

Согласно нормативной документации работников этой профессии необходимо обеспечить либо хлопчатобумажным костюмом, либо костюмом из смешанных тканей для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий. Костюмы из хлопчатобумажной ткани по сравнению с современными синтетическими тканями имеют более низкие физико-механические характеристики. При сравнении хлопчатобумажной и синтетической тканей при одинаковой плотности (200 г/м^2) разрывная нагрузка по основе и по утку меньше почти в 2 раза, раздирающая нагрузка меньше в 3 раза, стойкость к истиранию меньше почти на 20%. Результаты сравнения показателей разрывной нагрузки и стойкости к истиранию смесовой и синтетической тканей приведены на рис. 1, 2.

Применение материалов с более совершенными физико-механическими свойствами в сочетании с уменьшенной плотностью позволяют спроектировать более эргономичную конструкцию костюма при меньшем весе, что непосредственно оказывает влияние на условия труда работников.

Проектирование костюмов для работников с улучшенными эргономическими свойствами является важным фактором, так как связано с тем, что движения и положения, которые работники принимают во время работы, кардинально отличаются от тех, которые мы осуществляем во время повседневной жизни. Главная задача конструктора — сделать костюм, соответствующий потребностям работника и не сковывающий движения в течение всей рабочей смены.

Для того, чтобы выяснить мнение работников о качестве, преимуществах и недостатках выдаваемой специальной одежды, нами проведено анкетирование работников, занятых при строительстве и ремонте искусственных сооружений. Результаты анкетирования сведены в таблицу. Респондентам были заданы вопросы, касающиеся качества материалов, применяемых в используемой ими спецодежде, удобства конструкции спецодежды и факторов, влияющих на работников во время производства работ. Для получения достоверных результатов было привлечено порядка 600 респондентов из разных компаний.

По результатам анкетирования работников следует, что большая часть костюмов, изготовленных из хлопчатобумажной ткани, не выдерживают нормативный срок носки и изнашиваются раньше положенного.

Качество готового костюма и его защитные функции требуют дальнейшего совершенствования. Многие работники строительного комплекса отмечают, что спецодежда не защищает от воздействия топлива и масел. На практике использование спецодежды является особо важным для работников, применяющих горючие и смазочные материалы в работе.

Дополнительно следует отметить проблему несвоевременной выдачи спецодежды и спецобуви. Данное нарушение приводит к тому, что отмечены ситуации, когда работникам приходилось использовать для производства работ свои личные вещи, не предназначенные для соответствующих работ.

Преждевременный износ спецодежды был отмечен всеми респондентами. Большинство работников строительного комплекса отметили, что оптимальный срок носки зимней спецодежды — 1 сезон, летней спецодежды — 6 месяцев, спецобуви — 1 сезон.

Материалы, из которых изготавливаются средства индивидуальной защиты, также как и нормы использования средств индивидуальной защиты, применяемые в настоящее время, постепенно устаревают, их необходимо заменять и постепенно обновлять, приводя в соответствие с требованиями времени. Использование современных технологий даст возможность создавать принципиально новые костюмы, которые будут отвечать высоким требованиям безопасности и позволят сделать работу строителей более комфортной. 

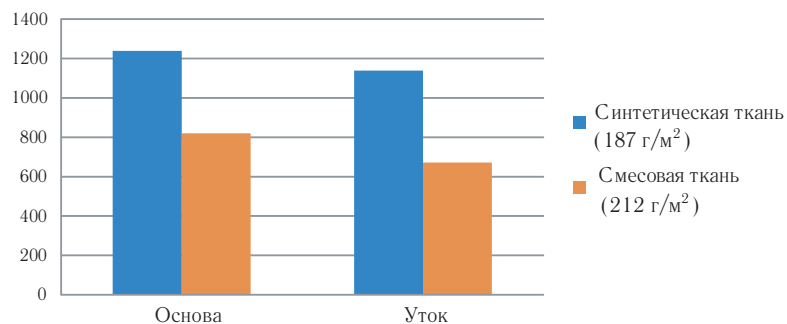


Рис. 1. Сравнение показателей разрывной нагрузки (Н) смесовой и синтетической тканей

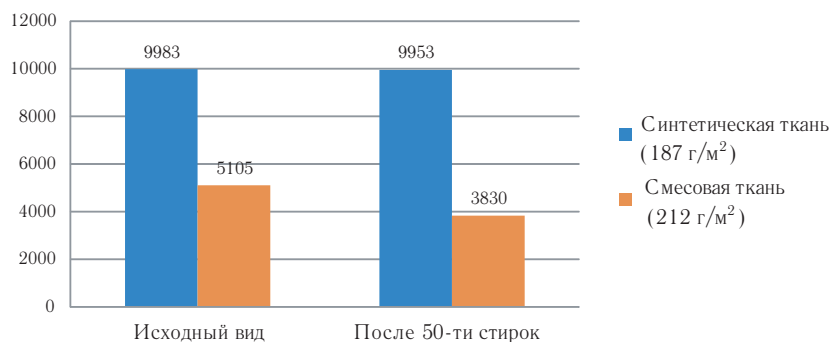


Рис. 2. Сравнение показателей стойкости к истиранию (циклы) смесовой и синтетической тканей

Таблица

Оценка удобств конструкции и защитных свойств спецодежды и спецобуви (в % к общему числу рабочих данной профессии)

Профессии	Оценка	Факторы				Удобство конструкции спецодежды, удобно/не удобно
		холод		дождь	пыль	
		зимняя спецодежда	зимняя спецобувь	летняя спецодежда	спецодежда	
Монтажники	Защищает	70,3	43,2	17,1	34,3	34,3/65,7
	Не защищает	29,7	56,8	82,9	65,7	
Дизелисты	Защищает	80	40	—	—	20,0/80,0
	Не защищает	20	60	100	—	
Плотники-бетонщики	Защищает	100	100	—	—	68,0/32,0
	Не защищает	—	—	100	—	

Литература

1. ГОСТ 12.4.011-89. ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация = Occupational safety standards system. Means of protection. General requirements and classification: межгосударственный стандарт: издание официальное: введен в действие в качестве государственного стандарта СССР Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 27 октября 1989 г. № 3222: взамен ГОСТ 12.4.011-87: дата введения 1990-07-01. — Режим доступа: Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000277> (дата обращения: 23.09.2022). — Текст: электронный.
2. Сачкова, О.С. Соблюдение санитарно-эпидемиологических норм при работах на искусственных сооружениях / О.С. Сачкова, А.А. Кириллин // Гигиена, экология и риски здоровью в современных условиях : Материалы XI межрегиональной научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора с международным участием, Саратов, 14–16 апреля 2021 года. — Саратов: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «КУБиК», 2021. — С. 137–138. — EDN: DDIATZ.
3. Чернякова, П.В. Производственный травматизм на фоне роста расходов на компенсации, средства индивидуальной защиты в строительстве / П.В. Чернякова. — Текст: непосредственный // Человек, экономика, общество: грани взаимодействия: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, Белгород, 28 декабря 2019 года; Под общей редакцией Е.П. Ткачевой. — Белгород: Общество с ограниченной ответственностью «Агентство перспективных научных исследований», 2019. — С. 126–133. — EDN: CHLKNZ.
4. Ягунова, Ю.С. Современные средства индивидуальной защиты работников строительной отрасли / Ю.С. Ягунова, М.В. Торопова. — Текст: электронный // Молодые ученые — развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). — 2020. — № 1. — С. 763–765. — EDN: BLZDUI. — URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42862558&ysclid=l8e2gszmuf684528456> (дата обращения: 23.09.2023).
5. Литвиненко, И.Г. Инновационные средства индивидуальной защиты и их применение в отраслях промышленности / И.Г. Литвиненко. — Текст: непосредственный // Инновационная наука. — 2020. — № 10. — С. 29–31. — EDN: RMTIFL.
6. Евдокимов, В.И. Средства индивидуальной защиты органов дыхания: развитие патентования и структура изобретений в мире (2000–2019 гг.) // В.И. Евдокимов. — Текст: непосредственный // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. — 2021. — № 1. — С. 66–81. — DOI: 10.25016/2541-7487-2021-0-1-66-81. — EDN: TFBZDT.
7. Солонщиков, П.Н. Средства индивидуальной защиты : учебно-методическое пособие / П.Н. Солонщиков, Р. М. Горбунов. — Киров: Вятская государственная сельскохозяйственная академия, 2016. — 35с. — EDN: CYLFWU. — Текст: непосредственный.
8. Об утверждении Правил обеспечения работников средствами индивидуальной защиты и смывающими средствами : приказ Министерства труда и социальной защиты от 29 октября 2021 года № 766н. — Текст: электронный. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112290039?index=0&rangeSize=1> (дата обращения: 23.09.2022).
9. Об утверждении Единых типовых норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств: приказ Министерства труда и социальной защиты от 29 октября 2021 года № 767н. — Текст: электронный. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112290045?ysclid=l8e4q3egqq794393690> (дата обращения: 23.09.2022).
10. Локтева, О.С. Безопасный труд как основа государственно-частного партнерства на железной дороге / О.С. Локтева, В.А. Кочнев, Д.А. Локтев. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2019. — № 4. — С. 80–85.

Уважаемые авторы!

Редакция журнала «Наука и техника транспорта» просит представлять оригиналы статей, оформленные в соответствии с нижеперечисленными требованиями:

1. Рекомендуемый объем: 5–10 стр.
2. Материалы представляют в бумажном и электронном вариантах на компакт-дисках, набранные в текстовых редакторах MS Word для Windows.
3. Файл — в формате DOC, DOCX или RTF.
4. Формат страницы — A4 (210x297 мм), при этом левое, верхнее и нижнее поля должны быть не менее 20 мм, а правое поле — не менее 10 мм, ориентация страниц книжная.
5. Шрифт Times New Roman (Сур), размер шрифта 14 pt, межстрочный интервал — полуторный, выравнивание текста по ширине, автоматический перенос, для разметки документа рекомендуется использовать стили текста (назначить нужные стили можно выбрав меню **Формат → Стил**...). В тексте не должно быть двойных пробелов и двойных абзацев (пустых строк). Все необходимое форматирование (например, расстояние между разделами) можно задавать с помощью тех же стилей, просто установив для стиля заголовка отступы (отбивки) перед и после абзаца.
6. Латинские буквы и простые однострочные формулы вида $A_r = B^2 + CD^2$ набирают прямо в строке MS Word; для вставки одиночных специальных символов, таких как $\leq$, $\geq$, $\pm$, ∞ , $\cup$, $\cap$, $\rightarrow$ и другие, а также греческих букв используется команда меню **Вставка → Символ...** (используемый шрифт Symbol). Многострочные сложные формулы, формулы с дробями, корнями, матрицы, векторы, системы уравнений и прочие помещают в документ как объект Microsoft Equation или Math Type 5 (**Вставка → Объект...**). Не допускается делить одну формулу на несколько объектов или часть формулы набирать в строке, а часть ее помещать как объект.
7. Любые таблицы набирают непосредственно в MS Word (команда меню **Таблица → Добавить → Таблица...**), либо в тексте дают заголовок таблицы, а таблицу — отдельным файлом MS Excel. Не допускается набор таблиц в тексте с разделением пробелами или табуляцией и сеткой сделанной инструментами рисования, а также помещение в документ Word'a таблиц Excel.
8. Изображения принимаются в форматах:
 - для фото *.tif (без сжатия или LZW) или *.jpg

(с максимальным качеством), в разрешении 300 dpi при печатном размере;

- для рисунков, схем, графиков *.tif, *.jpg, *.bmp, *.gif, *.eps, MS Visio, Corel Draw, Adobe Illustrator (все надписи должны быть переведены в кривые).

Каждое изображение должно быть представлено отдельным файлом. Если нет возможности качественно отрисовать или отсканировать имеющееся изображение, просьба предоставить оригинал (можно от руки).

9. Допускается включение в текст диаграмм, схем и графиков, в том числе выполненных средствами MS Word, при этом рисунок должен быть помещен в текст как объект.

10. К тексту статьи отдельным файлом прилагают аннотацию (4–7 строк), ключевые слова (5–8 слов) и указывают шифр научной специальности.

11. Необходимо представить следующую информацию об авторах:

- фамилия, имя, отчество;
- ученая степень, звание;
- почетные звания, участие в академиях, сведения о наградах;
- место работы (почтовый индекс, адрес, номера контактных телефонов);
- должность;
- область научных интересов (направление исследований);
- общее количество научных работ;
- количество монографий;
- количество учебников;
- количество патентов.

12. В отдельном файле в цифровом виде следует приложить качественные цветные фотографии авторов размером не менее 400x600 пикселей (см. требования к предоставляемым фото) или, при отсутствии цифровых, фотоснимки на глянцевой бумаге.

13. После рецензирования и проверки рукописи в системе «Антиплагиат» автору(ам) предоставляется Лицензионный договор (в 2-х экз.) с целью его подписания.

14. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Уважаемые читатели!

Редакция с благодарностью примет предложения по повышению эффективности работы журнала и по улучшению его дизайна.